

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР –
факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова

Кафедра физики

Общий физический практикум

Лабораторная работа № 1.0

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ
ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ
ФОРМЫ**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Целью работы является ознакомление с простейшими методами физических измерений массы и длины, овладение элементарными навыками обработки результатов измерений, включая оценки их погрешностей, на примере определения плотности тел правильной геометрической формы.

Теоретическая часть

Плотность однородного тела определяется массой единицы его объема. Если m - масса тела, а V - его объем, то плотностью ρ называется величина:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

В работе измеряются масса m и объем тела V и рассчитывается плотность тел по формуле (1). Масса тела измеряется непосредственно взвешиванием на весах, а объем тела определяется косвенно: непосредственно измеряются линейные размеры тел штангенциркулем или микрометром, затем вычисляется их объем. Рассмотрим подробно методику измерений и описание приборов.

Измерение массы тела взвешиванием

При работе с лабораторными весами следует соблюдать следующие правила:

1. В нерабочем состоянии весы необходимо арретировать. Это достигается опусканием коромысла с помощью винта, при этом чашки весов стоят на столике и опорная призма освобождается от нагрузки.

2. Изменение нагрузки на чашках также осуществляется при арретированных весах.
3. Разновесы следует брать пинцетом (нельзя класть разновесы на стол!).
4. Разновесы следует класть по порядку, от больших к меньшим.
5. До окончательного подбора разновесов можно не освобождать арретир полностью. При грубом несоответствии массы гирь массе тела неуравновешенность весов обнаруживается уже в самом начале отпускания арретира.
6. После окончания работы нужно немедленно арретировать и разгрузить весы. Ни в коем случае не оставлять неарретированные весы под нагрузкой.

Порядок взвешивания

1. Установите весы на рабочем столе, отрегулировав их с помощью вращающихся ножек. Правильность установки весов проверяется по отвесу.
2. Уравновесьте их при помощи регулировочных грузов на коромысле. Заарретируйте готовые к взвешиванию весы.
3. На одну чашку весов положите взвешиваемое тело, на другую - разновесы. Слегка приподнимая коромысло и меняя гири, приведите весы в равновесное состояние, выполняя правила работы с весами. Затем повторите взвешивание на другой чашке весов. За результат взвешивания принимают:

$$m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2} \quad (2)$$

где m_1 и m_2 - результаты, полученные при взвешивании на разных чашках. За ошибку измерения массы примите приборную погрешность весов $\Delta m = \Delta m_{\text{прибор}} = 0,01$ г.

Арретируйте весы при каждой операции!

Измерение линейных размеров тела штангенциркулем

Штангенциркуль представляет собой прибор для проведения линейных измерений (длины, ширины, высоты, диаметра тел, глубины и диаметра отверстий, ширины и глубины канавок и т.п.). Для увеличения точности отсчета, помимо основной шкалы, штангенциркуль снабжен специальной дополнительной шкалой, называемой нониусом.

Устройство нониуса

Линейным нониусом называется маленькая линейка с делениями, которая может скользить вдоль большой линейки также с делениями, называемой масштабом (рис. 1).

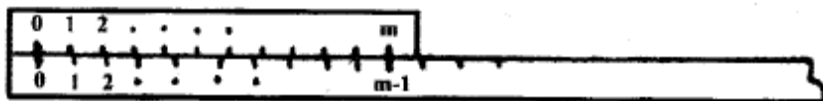


Рис. 1. Схема устройства нониуса.

Пусть цена деления нониуса равна x , а цена деления масштаба y , причем на $(m-1)$ делений масштаба приходится m делений нониуса, т.е. $(m-1)y = mx$. Если нулевые деления линеек совпали, то первое деление нониуса отстоит от первого деления масштаба на величину $\Delta = y/m$, второе - на 2Δ , третье - на 3Δ и т.д. Если нониус сдвинут относительно масштаба на величину Δ , то совпадут первое деление нониуса и первое деление масштаба, если сдвинуть нониус на величину 2Δ , то совпадут вторые деления и т.д.

Величина $\Delta = y - x = y/m$ называется точностью нониуса. Применим нониус для определения длины тела А (рис.2.)

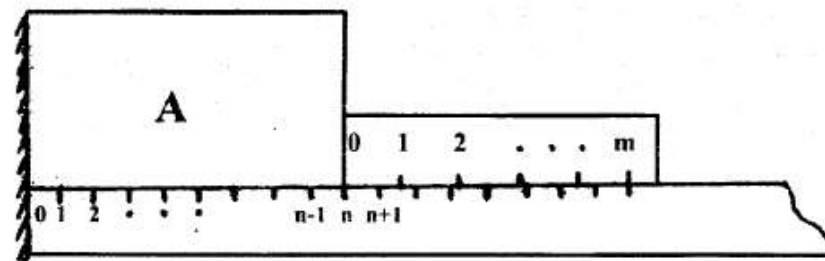


Рис. 2 Схема измерения при помощи нониуса.

Как видно из рисунка, в нашем случае длина L тела А равна $L = ny + m\Delta$.

При более высокой точности нониуса его деления делают более крупными, например, $x_1 = 2y - y/m$, что дает $mx_1 = (2m-1)y$. Точностью нониуса по-прежнему является величина $\Delta = y/m$.

Нониус штангенциркуля устроен так, что $10x = 19y$, где $y = 1$ мм, т.е. $x = 1,9$ мм и $\Delta = 0,1$ мм. Таким образом, нониус позволяет измерять штангенциркулем длину с точностью до 0,1 мм; эту величину принимают за приборную ошибку штангенциркуля $\Delta x_{\text{приб}} = 0,1$ мм. В более точных штангенциркулях применяют нониусы с $m = 20$, и тогда таким прибором можно измерять с точностью $\Delta x_{\text{приб}} = 0,05$ мм (обратите внимание, какая точность измерения будет написана на вашем штангельциркуле).

При определении диаметра отверстия необходимо учитывать толщину губок штангенциркуля, вводимых внутрь отверстия. Она указана на самих губках.

Внешний вид штангенциркуля и способы его применения для различных измерений показаны на рис. 3.

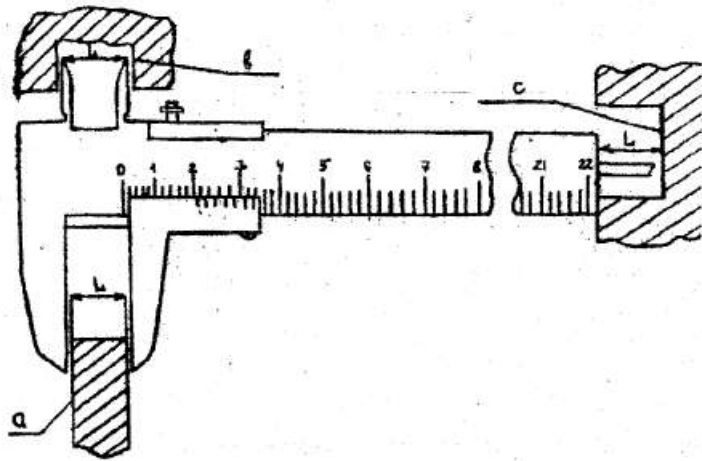


Рис. 3 Внешний вид и способы применения штангельциркуля: а) измерение внешнего размера тела; б) измерение диаметра отверстия; с) измерение глубины отверстия.

Измерение линейных размеров тела микрометром

Для более точных измерений длин нередко применяют микрометрические винты - винты с малым и очень точно выдержанным шагом резьбы, равным 0,5 мм. Такой винт употребляется в микрометре. Микрометр служит для измерений внешних линейных размеров тел, в нашем случае не превышающих 25 мм, например, диаметра проволоки, толщины пластинки и т.п. Его внешний вид и схема измерения представлена на рис.4, где измеряемый объект F зажат между винтом D и упором E.

Один оборот барабана микрометра передвигает его винт на 0,5 мм. Барабан, связанный с винтом, разбит на 50 делений. Поворот на одно деление соответствует смещению винта на 0,01 мм. На стержне нанесена линейная миллиметровая шкала (нижняя) и сдвинутая относительно нее на 0,5 мм вторая миллиметровая шкала (верхняя). Отсчет показаний микрометра

ведется следующим образом: если ближайший к барабану штрих принадлежит нижней шкале, то нужно взять целое число миллиметров, соответствующее этому штриху, и к нему прибавить число сотых, которое соответствует делению на барабане, установившемуся против средней линии стержня; если ближайший к барабану штрих принадлежит верхней шкале, то к соответствующему числу целых миллиметров надо прибавить 0,5 мм, а к получившемуся числу уже прибавлять число сотых по показанию барабана. Так, на рисунке показание микрометра равно:

$$L=9 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} + 0,20 \text{ мм} = 9,70 \text{ мм.}$$

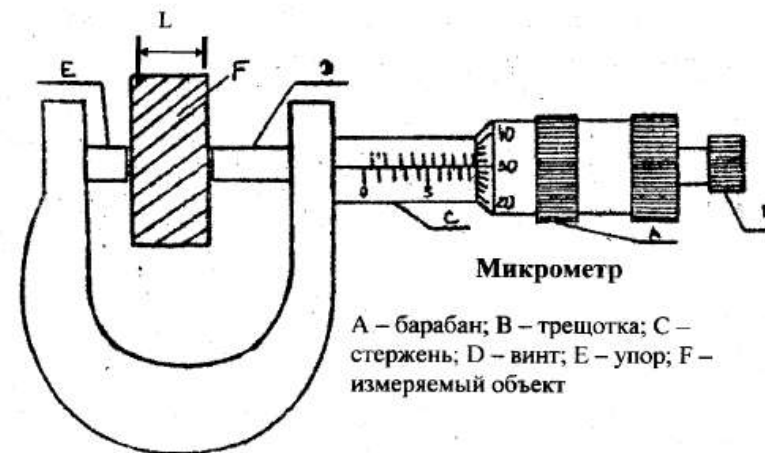


Рис. 4 Внешний вид и схема измерения размеров тел микрометром.

Винт с малым шагом преобразует незначительные усилия руки, поворачивающей барабан микрометра, в большие силы, действующие на измеряемый предмет, что, во-первых, вызывает его деформацию, уменьшая точность измерения,

во-вторых, может привести к поломке прибора. Чтобы этого не происходило, барабан снабжен специальной рукояткой В, (см. рис. 4) - "трещоткой", позволяющей создавать при измерении небольшое постоянное воздействие на измеряемый предмет. Фиксированное усилие обеспечивается жесткостью пружины, вставленной в трещотку. Момент сжатия предмета сопровождается слабым треском. После этого вращение трещотки В бесполезно, а барабана А - недопустимо.

ВНИМАНИЕ!

ВРАЩАТЬ БАРАБАН СЛЕДУЕТ ТОЛЬКО С ПОМОЩЬЮ ТРЕЩОТКИ!

Это гарантирует правильность измерений и сохраняет микрометр от поломки.

Экспериментальная часть

Каждый выполняющий работу должен измерить плотность двух тел: цилиндра и тонкой пластинки с отверстием, сделанных из различных материалов. Измерения для каждого тела следует проводить отдельно для четкой регистрации результатов. Все результаты записываются в лабораторный журнал ручкой (не карандашом), образец журнала приведен в конце этого описания.

Порядок выполнения работы

1. Взвесьте измеряемое тело на разных чашках весов,
2. определяя m_1 и m_2 , и определите $m_{\text{ср}}$.
3. Измерьте каждый линейный размер тела по 7 раз в различных местах. Длина, ширина тел и диаметр отверстия в пластинке измеряются штангенциркулем. Диаметр цилиндра и толщину пластинки измеряют микромет-

ром. Все полученные результаты записываются в таблицы для цилиндра и пластинки отдельно. Расчет средних величин и случайных ошибок проводится при подготовке к защите работы. -

4. Проводите оценочный расчет определяемой величины (прикидку). Для выполнения прикидки возьмите набор данных из одной серии измерений и вычислите искомую величину. Эта операция позволит проверить правильность выполненных измерений и вычислений.
5. Приведите рабочее место в порядок. Сдайте разновесы и измерительный инструмент преподавателю. Получите подпись преподавателя в рабочей тетради о выполнении работы, представив ему результаты своих измерений и прикидки. Убедитесь в том, что в журнале практикума стоит подпись преподавателя, подтверждающая выполнение Вами работы.

Расчётная часть

Напомним еще раз, что все вычисления средних величин и погрешностей следует проводить с одной-двумя запасными цифрами и только в окончательном результате проводить округление погрешностей до одной, а средних - до сомнительных цифр. В дальнейших расчетах следует использовать значения средних с запасной цифрой с тем, чтобы не накапливать ошибки округления. Вычисления удобно проводить в следующем порядке.

Цилиндр

1. Вычислите среднюю массу по формуле (2); за погрешность измерения массы примите погрешность технических весов ($\Delta m = \Delta m_{\text{прибор}} = 0,01 \text{ г}$).

- Вычислите средние диаметр D и высоту H цилиндра, случайные и полные ошибки; за погрешность штангенциркуля примите 0,1 мм или 0,05мм (в зависимости от модели используемого в эксперименте штангельциркуля), а микрометра - 0,005 мм.
- Вычислить объем цилиндра по формуле:

$$V_{cp} = \frac{\pi D_{cp}^2 H_{cp}}{4} \quad (3)$$

Относительную ошибку определения объема вычислите по формуле:

$$\varepsilon_V = \sqrt{(2\varepsilon_D)^2 + \varepsilon_H^2} \quad (4)$$

а абсолютную - по формуле:

$$\Delta V = \varepsilon_V V_{cp} \quad (5)$$

- Вычислить плотность материала цилиндра по формуле (1), а относительную погрешность - по формуле:

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_V^2} \quad (6)$$

абсолютную погрешность - по формуле

$$\Delta \rho = \rho_{cp} \varepsilon_\rho \quad (7)$$

- Определите материал, из которого изготовлен цилиндр.

Пластина с отверстием

- Определите m_{cp} пластины;
- Аналогично расчетам, проведенным с данными для цилиндра, рассчитайте средние толщину (h_{cp}), ширину (a_{cp}), длину пластины (b_{cp}), диаметр отверстия (d_{cp}), а также абсолютные погрешности их определения Δa , Δb , Δd , Δh ;

- Объем пластины вычисляется по формуле:

$$V_{cp} = (a_{cp} b_{cp} - \frac{\pi d_{cp}^2}{4}) \cdot h_{cp} \quad (8)$$

Формулу для относительной ошибки определения объема пластины с отверстием можно вывести с учётом известной **общей формулы расчёта абсолютной ошибки определения значения функции** $V(a,b,d,h)$, считая известными абсолютные погрешности значений её аргументов Δa , Δb , Δd , Δh (см. методичку Сергеев С.П. «Обработка результатов физического эксперимента»):

$$\Delta V = \sqrt{(\frac{\partial V}{\partial a} \cdot \Delta a)^2 + (\frac{\partial V}{\partial b} \cdot \Delta b)^2 + (\frac{\partial V}{\partial d} \cdot \Delta d)^2 + (\frac{\partial V}{\partial h} \cdot \Delta h)^2} \quad (9)$$

где $\frac{\partial V}{\partial a} = b \cdot h$ - частная производная функции $V(a,b,d,h)$ по переменной «a»;

где $\frac{\partial V}{\partial b} = a \cdot h$ - частная производная функции $V(a,b,d,h)$ по переменной «b»;

где $\frac{\partial V}{\partial d} = -\frac{\pi d}{2} \cdot h$ - частная производная функции $V(a,b,d,h)$ по переменной «d»;

где $\frac{\partial V}{\partial h} = (ab - \frac{\pi d^2}{4})$ - частная производная функции $V(a,b,d,h)$ по переменной «h».

В итоге, подставляя в приведенные выше выражения для частных производных средние значения величин a_{cp} , b_{cp} , d_{cp} , h_{cp}

получаем формулу для расчёта абсолютной ошибки объёма:

$$\Delta V = \sqrt{(b_{cp} h_{cp} \Delta a)^2 + (a_{cp} h_{cp} \Delta b)^2 + (\frac{\pi d_{cp} h_{cp} \Delta d}{2})^2 + ((a_{cp} b_{cp} - \frac{\pi d_{cp}^2}{4}) \Delta h)^2} \quad (10)$$

4. Относительная погрешность ε_V определения объема рассчитывается по формуле (5), в которую подставляется значение V_{cp} , рассчитанное по формуле (8).
5. Расчеты заканчивайте вычислением средней плотности и погрешности определения плотности материала пластинки.
6. Определите материал, из которого изготовлена пластинка.

Окончательные результаты и выводы

Представьте в письменном виде окончательные результаты определения плотностей материалов цилиндра и пластинки. По таблице плотностей определите материалы, из которых изготовлены тела и сделайте вывод о совпадении (несовпадении) табличных данных с экспериментальными. Поясните возможные причины несовпадения. При сильном расхождении ($\rho_{cp} - \rho_{табл} > 3\Delta\rho$) экспериментальных результатов с табличными необходимо выяснить причину систематической погрешности и все измерения провести заново, т.к. Вы столкнулись с тем, что называется промахом в измерениях.

Вопросы для допуска

1. Как подготовить весы к работе? Как взвешивать тела?
2. Зачем масса измеряется дважды на разных чашках весов?
3. Как считывать показания штангенциркуля? Проведите считывание.
4. Как считывать показания микрометра? Проведите считывание.
5. Как устроен нониус? Чему равна точность нониуса?
6. Какие из проводимых измерений прямые, а какие - косвенные?

8. Что такое случайная ошибка? Как можно уменьшить величину случайной ошибки?
9. Как вычисляется относительная ошибка разности, суммы, частного, произведения и степени?
10. Как найти величину абсолютной ошибки измеренной величины, если известна относительная ошибка измерений?
11. Когда мы делаем вывод, что допустили промах в измерениях?

Вопросы для защиты

1. Как рассчитать среднеквадратичную ошибку проведенных измерений?
2. Как рассчитать абсолютную погрешность измерений?
3. Покажите справедливость формул (4) и (6), исходя из общей формулы (9).
4. Как изменился бы результат измерений плотности, если бы Вы каждую из измеряемых величин определяли бы 3 раза, 30 раз, 300 раз?
5. Расскажите об устройстве нониуса и порядке считывания показаний штангенциркуля.
6. Расскажите об устройстве микрометра и порядке считывания показания микрометра.
7. Поясните различие между случайной и систематической ошибками.
8. Расскажите, каким образом Вы проводили 7 измерений диаметра цилиндра.
9. Какие выводы нужно сделать, если величина плотности тела, определенная Вами, отличается от табличного значения более чем на $3\Delta\rho$?
10. Какие замечания и предложения по проделанной работе Вы можете сделать?

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ

Рекомендованная литература

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Механика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н., «Механика: учебное пособие», т. 1.
3. Сивухин Д.В., «Общий курс физики», т. 1.
4. Ландсберг Г.С., «Элементарный учебник физики», т. 1.
5. Сергеев С.П. «Обработка результатов физического эксперимента».

Приложение.

Образец лабораторного журнала

Рабочая тетрадь (лабораторный журнал) должна быть подписана (Ф.И.О., класс). Рабочая тетрадь должна иметь 96 листов формата А4. Записи в рабочей тетради делаются только ручкой (исключение – графики и таблицы, которые рисуются с использованием карандаша и линейки) чётко, систематизировано, ясно, без применения корректирующей краски "штрих" (высота строчки таблиц должна позволять исправить ошибочно записанные данные простым зачеркиванием). Записывайте данные сразу начисто - экономьте время. Рабочую тетрадь со всеми проделанными работами должен иметь каждый.

Ниже прилагается примерный вариант оформления задачи в рабочей тетради.

Лабораторная работа № 1.0

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Вслед за заголовком работы размещается следующая таблица:

	Дата	Отметка	Подпись преподавателя
Допуск			
Выполнение			
Защита			

Затем указывается цель лабораторной работы и кратко излагаются теоретические основы её проведения:

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

.....

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ПЛОТНОСТЬ ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

$$\rho = \frac{m}{V}$$

где m - масса тела, V - его объем.

Относительная и абсолютная погрешности определения плотности:

$$\epsilon_{\rho} = \sqrt{\epsilon_m^2 + \epsilon_V^2}$$

$$\Delta\rho = \rho_{cp} \varepsilon_\rho$$

МАССЫ ТЕЛ

$$m_{cp} = \frac{m_1 + m_2}{2}$$

где m_1 и m_2 - результаты измерения массы тела на разных чашках весов. Погрешность измерения массы: $\Delta m = \Delta m_{\text{прибор}}$.

ОБЪЕМЫ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Цилиндр

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$$

где D и H - диаметр и высота цилиндра.

Относительная и абсолютная погрешности определения объема соответственно:

$$\varepsilon_V = \sqrt{(2\varepsilon_D)^2 + \varepsilon_H^2}$$

$$\Delta V = \varepsilon_V V$$

Прямоугольная пластинка с отверстием

$$V = \left(ab - \frac{\pi d^2}{4}\right) \cdot h$$

где a , b , h - длина, ширина и толщина пластинки, d - диаметр отверстия.

Относительная и абсолютная погрешности определения объема рассчитываются соответственно:

$$\Delta V = \sqrt{(b_{cp} h_{cp} \Delta a)^2 + (a_{cp} h_{cp} \Delta b)^2 + \left(\frac{\pi d_{cp} h_{cp} \Delta d}{2}\right)^2 + \left((a_{cp} b_{cp} - \frac{\pi d^2}{4}) \Delta h\right)^2}$$

$$\Delta V = \varepsilon_V V$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ

Цилиндр

$$m_1 = \dots \quad m_2 = \dots$$

Пластинка

$$m_1 = \dots \quad m_2 = \dots$$

ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ

Приборная погрешность штангенциркуля _____

Приборная погрешность микрометра _____

Цилиндр

№	D, мм	ΔD, мм	H, мм	ΔH, мм
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
Средние				

Пластинка

№	a, мм	Δa, мм	b, мм	Δb, мм	h, мм	Δh, мм	d, мм	Δd, мм
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
Средние								

РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

Цилиндр

1. Масса цилиндра:

$$m_{cp} = \dots \quad \Delta m_{прибор} = 0,01 \text{ г}$$

$$\Delta m = \Delta m_{прибор}$$

Окончательный результат:

$$m = m_{cp} \pm \Delta m$$

$$\varepsilon_m = (\Delta m / m_{cp}) \cdot 100\% = \dots$$

2. Диаметра цилиндра:

$$D_{cp} = \dots$$

$$\Delta D_{прибор} = \dots$$

$$\Delta D_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(D_i - D_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta D = \sqrt{\Delta D_{сл}^2 + \Delta D_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_D = \Delta D / D_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$D = D_{cp} \pm \Delta D \quad \varepsilon_D = \dots$$

3. Высота цилиндра:

$$H_{cp} = \dots$$

$$\Delta H_{прибор} = \dots$$

$$\Delta H_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(H_i - H_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta H = \sqrt{\Delta H_{сл}^2 + \Delta H_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_H = \Delta H / H_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$H = H_{cp} \pm \Delta H \quad \varepsilon_H = \dots$$

4. Объем цилиндра:

$$V_{cp} = \frac{\pi D_{cp}^2 H_{cp}}{4} = \dots$$

$$\Delta V = \varepsilon_V V_{cp} = \dots \quad \varepsilon_V = \sqrt{(2\varepsilon_D)^2 + \varepsilon_H^2} \cdot 100\% = \dots$$

Окончательный результат:

$$V = V_{cp} \pm \Delta V \quad \varepsilon_V = \dots$$

5. Определение плотности материала цилиндра:

$$\rho_{cp} = \frac{m_{cp}}{V_{cp}} = \dots \quad \varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_V^2} \cdot 100\% = \dots$$

$$\Delta \rho = \varepsilon_\rho \rho_{cp} = \dots$$

Окончательный результат:

$$\rho = \rho_{cp} \pm \Delta \rho = \dots \quad \varepsilon_\rho = \dots$$

Пластинка с отверстием

1. Масса пластинки:

$$m_{cp} = \dots \quad \Delta m_{прибор} = 0,01 \text{ г}$$

$$\Delta m = \Delta m_{прибор}$$

Окончательный результат:

$$m = m_{cp} \pm \Delta m$$

$$\varepsilon_m = (\Delta m / m_{cp}) \cdot 100\% = \dots$$

2. Длина пластинки:

$$a_{cp} = \dots$$

$$\Delta a_{прибор} = \dots$$

$$\Delta a_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - a_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta a = \sqrt{\Delta a_{сл}^2 + \Delta a_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_a = \Delta a / a_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$a = a_{cp} \pm \Delta a \quad \varepsilon_a = \dots$$

3. Ширина пластинки:

$$b_{cp} = \dots$$

$$\Delta b_{прибор} = \dots$$

$$\Delta b_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(b_i - b_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta b = \sqrt{\Delta b_{сл}^2 + \Delta b_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_b = \Delta b / b_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$b = b_{cp} \pm \Delta b \quad \varepsilon_b = \dots$$

4. Толщина пластинки:

$$h_{cp} = \dots$$

$$\Delta h_{прибор} = \dots$$

$$\Delta h_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(h_i - h_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta h = \sqrt{\Delta h_{сл}^2 + \Delta h_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_h = \Delta h / h_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$h = h_{cp} \pm \Delta h \quad \varepsilon_h = \dots$$

5. Диаметр отверстия:

$$d_{cp} = \dots$$

$$\Delta d_{прибор} = \dots$$

$$\Delta d_{сл} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - d_{cp})^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_{сл}^2 + \Delta d_{прибор}^2} = \dots \quad \varepsilon_d = \Delta d / d_{cp} \cdot 100\%$$

Окончательный результат:

$$d = d_{cp} \pm \Delta d \quad \varepsilon_d = \dots$$

6. Объём пластинки:

$$V_{cp} = (a_{cp} b_{cp} - \frac{\pi d_{cp}^2}{4}) \cdot h_{cp} = \dots$$

$$\Delta V = \sqrt{(b_{cp} h_{cp} \Delta a)^2 + (a_{cp} h_{cp} \Delta b)^2 + (\frac{\pi d_{cp} h_{cp} \Delta d}{2})^2 + ((a_{cp} b_{cp} - \frac{\pi d_{cp}^2}{4}) \Delta h)^2} = \dots$$

$$\varepsilon_V = \Delta V / V_{cp} \cdot 100\% = \dots$$

Окончательный результат:

$$V = V_{cp} \pm \Delta V \quad \varepsilon_V = \dots$$

7. Определение плотности материала пластинки:

$$\rho_{cp} = \frac{m_{cp}}{V_{cp}} = \dots \quad \varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_V^2} = \dots$$

$$\Delta \rho = \varepsilon_\rho \rho_{cp} = \dots$$

Окончательный результат:

$$\rho = \rho_{cp} \pm \Delta \rho = \dots \quad \varepsilon_\rho = \dots$$

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

.....