

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ  
ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Методические указания к лабораторной работе № 1 по физике

Екатеринбург

УрФУ

2017

УДК 531.424 (076.5)

Составители: В. П. Левченко, В. С. Черняев, Е. Д. Плетнева, А. Г. Волков

Научный редактор – д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Повзнер

**Определение плотности тел правильной геометрической формы :**  
методические указания к лабораторной работе № 1 по физике / сост.  
В. П. Левченко, В. С. Черняев, Е. Д. Плетнева, А. Г. Волков. –  
Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 17 с.

В данной работе определяется плотность тел правильной геометрической формы. Экспериментальная часть включает описание методик измерения массы тела с помощью электронных весов и линейных размеров тел с помощью микрометра и штангенциркуля. Приведены формулы для статистической обработки результатов прямых и косвенных измерений.

Указания предназначены для студентов всех специальностей всех форм обучения.

Рис. 5. Прил. 2.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный  
университет, 2017

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Плотностью однородного тела называется физическая величина, численно равная отношению массы тела к его объему:

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

где  $m$  – масса тела;  $V$  – объем тела.

Как видно из формулы (1), для нахождения плотности тела необходимо измерить его массу и определить его объем. Масса определяется взвешиванием на электронных или аналитических весах, обладающих различной погрешностью. Поскольку тела, исследуемые в работе, имеют правильную геометрическую форму, для определения объема достаточно измерить их размеры и вычислить объем по соответствующим математическим формулам.

## 2. ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ

При измерении длины цилиндра масштабной линейкой отсчитывается число делений и на глаз оценивается доля деления. Для повышения точности отсчета долей деления линейки (до десятых и сотых миллиметра) масштабную линейку снабжают дополнительным устройством, называемым нониусом. Нониус представляет собой дополнительную линейку с делениями, свободно передвигающуюся вдоль основной масштабной линейки.

Существует несколько типов нониусов, но чаще используются два. В одном из них (рис. 1, а)  $(n - 1)$  делений масштабной линейки равны делениям нониуса (9 делений масштабной линейки равны 10 делениям нониуса). В другом  $(2n - 1)$  делений масштабной линейки (рис. 1, б) равны  $n$  делениям нониуса (19 делений масштабной линейки равны 10 делениям нониуса).

Таким образом, одно деление нониуса оказывается несколько меньшим одного (см. рис. 1, а) либо двух (см. рис. 1, б) делений масштабной линейки.

Разность между длиной одного (рис. 1, а) или двух (рис. 1, б) делений масштабной линейки и одного деления нониуса называется точностью нониуса,

или его постоянной, она равна отношению цены наименьшего деления масштабной линейки к числу делений нониуса.

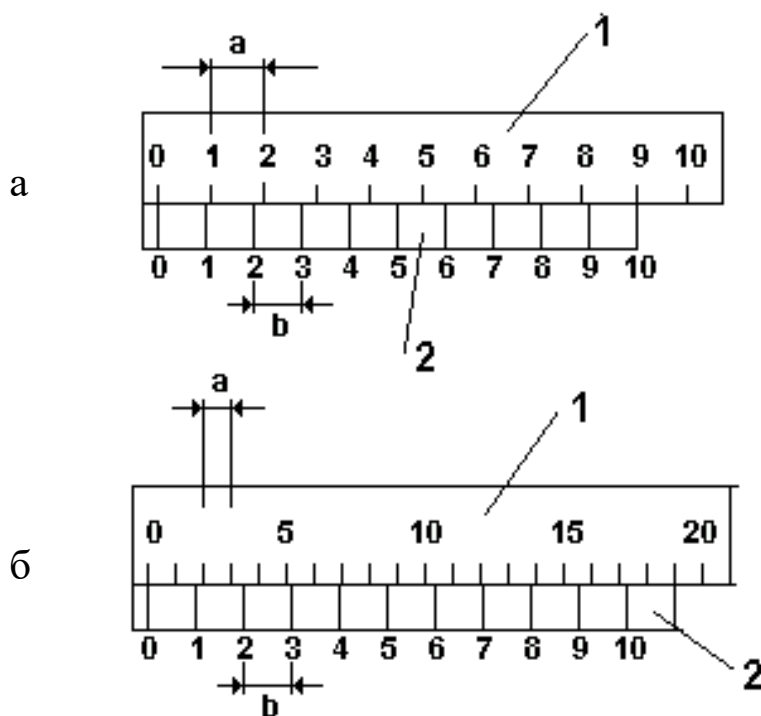


Рис. 1. Схема устройства нониусов двух типов:  
1 – масштабная линейка, 2 – нониус

На рис. 1, а и 1, б изображены нониусы, точность которых равна  $1/10$  деления масштаба. Бывают нониусы с точностью  $1/5$ ,  $1/25$ ,  $1/50$  и  $1/100$  деления масштаба.

Применение нониуса основано на способности человеческого глаза с высокой точностью фиксировать совпадение штрихов.

Измерение длины какого-либо тела (образца) масштабной линейкой с нониусом производится следующим образом. Масштаб прикладывается своим нулевым делением к одному краю образца (рис. 2), а к другому подводится нулевое деление нониуса. Отсчитывают целое число делений масштабной линейки, находящееся слева от нуля нониуса (на рис. 2 – три деления). Затем смотрят, какое деление нониуса сливается в одну линию с делением масштабной линейки. Номер совпавшего деления нониуса (на рис. 2 – 6-е деление) умножают на точность нониуса ( $1/10$ ) и получают дробную часть

длины образца (6/10). Окончательный результат измерения равен сумме найденных величин, т. е. 3,6 деления.

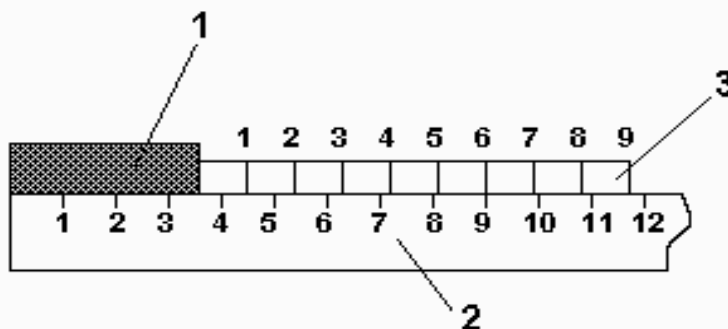


Рис. 2. Измерение длины образца масштабной линейкой с нониусом:  
1 – образец, 2 – масштабная линейка, 3 – нониус

Таким образом, прежде чем пользоваться нониусом, нужно определить точность.

Штангенциркуль (рис. 3) представляет собой масштабную линейку (с делением через 1,0 или 0,5 мм), на конце которой имеется клювовидный выступ *A*.

На линейку надета скользящая обойма с прорезью, снабженная выступом *B*. На скосе прорези обоймы нанесены деления нониуса. Когда выступы масштабной линейки и обоймы находятся вплотную друг к другу, нулевые деления масштаба и нониуса совпадают. Штангенциркуль обычно снабжен дополнительными выступами *A'* и *B'*, позволяющими определить внутренние размеры предмета (например, внутренний диаметр трубок). У некоторых штангенциркулей (рис. 3) на масштабную линейку надет еще хомутик с микровинтом 6 и винтом 3. Для измерения размеров предмета его помещают между выступами *A* и *B*, закрепляют хомутик винтом 3 и с помощью микровинта 6 зажимают предмет (без больших усилий) так, чтобы он не выпадал из выступов. Затем винтом 2 зажимают обойму и отсчитывают длину по масштабной линейке и нониусу, как указано выше (см. рис. 2). Предел основной погрешности штангенциркулей равен точности их нониусов.

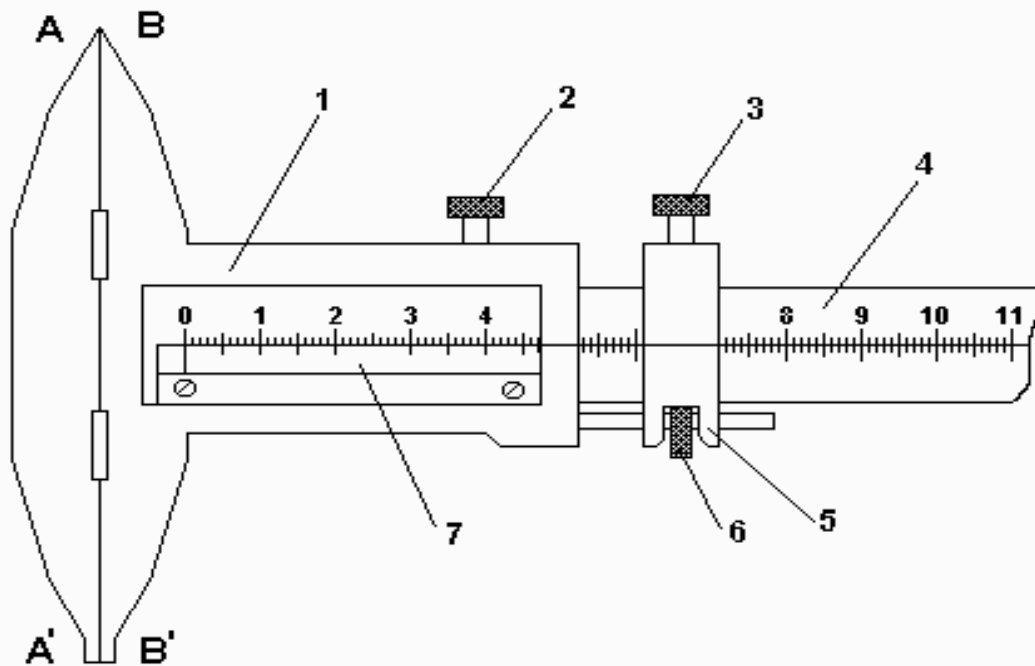


Рис. 3. Штангенциркуль:  
 1 – обойма, 2 и 3 – винты обоймы и хомутика, 4 – масштабная линейка,  
 5 – хомутик, 6 – микровинт, 7 – нониус

### 3. МИКРОМЕТР

Для измерения малых размеров с точностью до 0,01 мм применяется микрометр. Он основан на принципе преобразования угловых перемещений в линейные с помощью винтовой пары (гайка – болт) с малым шагом винта. Такую пару называют микрометрическим винтом.

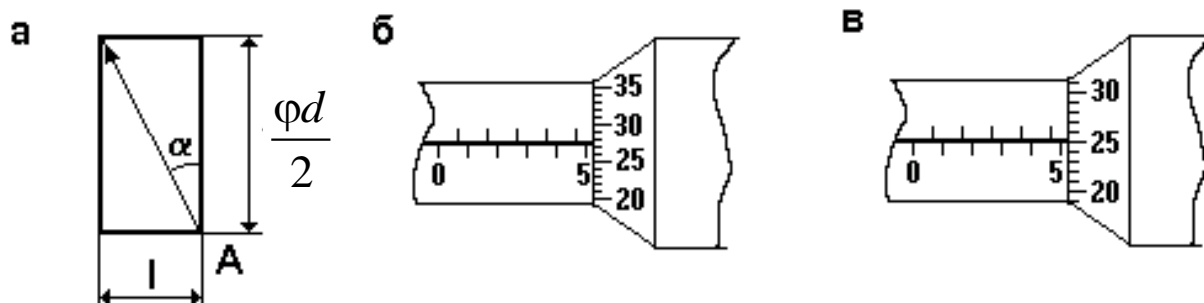


Рис. 4. Принципиальная схема измерения малых линейных размеров (а) и примеры отсчета с помощью микрометрического инструмента (б и в)

Например, на рис. 4, б ( $l_1$ ) и 4, в ( $l_2$ ):

$$l_1 = (5,00 + 0,27) \text{ мм} = 5,27 \text{ мм};$$

$$l_2 = (5,00 + 0,25) \text{ мм} = 5,25 \text{ мм}$$

В этом устройстве линейное перемещение пропорционально шагу винта и углу поворота:

$$l = h \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $l$  – линейное перемещение винта;  $\varphi$  – угол поворота винтов в радианах;  $h$  – шаг винта (смещение барабана вдоль линейной шкалы за один оборот).

Из рис. 4, а видно, что при движении точки  $A$  по винтовой линии с небольшим углом подъема  $\alpha$  ее малые линейные перемещения  $l$  в осевом направлении значительно легче и точнее измерять, отсчитывая угловое перемещение. С этой целью на окружности отсчетного барабана нанесены деления (рис. 4, б), позволяющие отсчитывать малые линейные перемещения винта. Для измерения числа целых оборотов служит линейная шкала.

Пусть  $h$  – шаг винта;  $n$  – число делений, на которое разделен барабан. Тогда цена деления микрометрического инструмента, соответствующая его повороту на одно деление барабана, равна отношению шага винта к числу делений круговой шкалы и называется точностью прибора:

$$l = \frac{h}{n}. \quad (3)$$

Например, если шаг винта  $h = 0,5$  мм, а число делений на барабане  $n = 50$ , то точность круговой шкалы

$$l = \frac{0,5 \text{ мм}}{50 \text{ дел.}} = 0,01 \text{ мм/дел.}$$

Размер предмета, измеряемый микрометрическим инструментом, определяется расстоянием от края скоса барабана до нулевого деления линейной шкалы инструмента. Следовательно, длина предмета с точностью до 0,5 деления отсчитывается по линейной шкале, а десятые и сотые доли миллиметра – по круговой шкале барабана.

Примеры отсчета указаны на рис. 4, б и в.

Микрометр (рис. 5) состоит из скобы 1, на которой крепятся основные детали, стопорного винта 2, вращающегося шпинделя 3 с микровинтом, стопорного винта 4 для закрепления шпинделя, гильзы 5 с линейной основной шкалой 6, барабана 8 с круговой шкалой 7, колпачка 9 для крепления барабана на шпинделе и трещотки 10, служащей для равномерного нажатия шпинделя на измеряемый образец.

Линейная шкала 6 на гильзе 5 имеет цену деления 0,5 мм/дел. Скошенный край барабана 8 разделен на 50 делений и при вращении движется поступательно вдоль линейной шкалы микрометра, смещаясь при этом на 0,5 мм за один оборот.

Перед работой с микрометром необходимо проверить правильность установки нуля. Для этого необходимо, вращая барабан при помощи трещотки, привести шпиндель в соприкосновение с пяткой. При правильной установке нуля линейной и круговой шкал совпадают (установка нуля производится лаборантом или преподавателем).

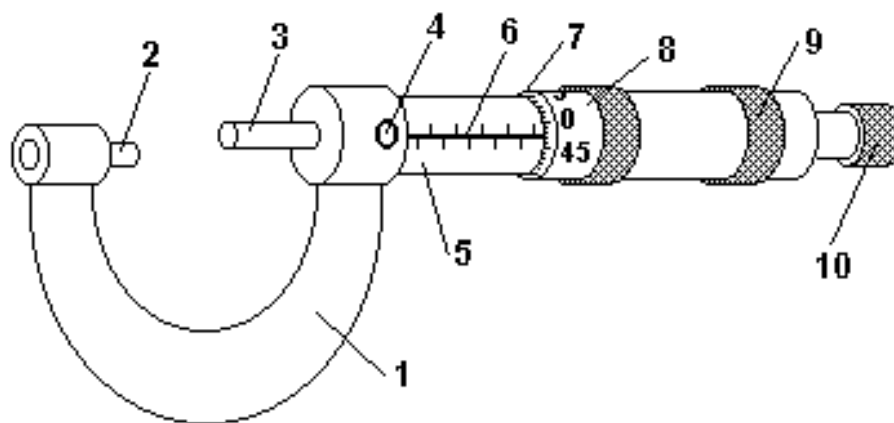


Рис. 5. Общий вид микрометра:

1 – скоба, 2 – пятка, 3 – шпиндель, 4 – стопорный винт, 5 – гильза, 6 – линейная шкала, 7 – шкала барабана, 8 – барабан, 9 – колпачок, 10 – трещотка

Измерение с помощью микрометра производится следующим образом. Предмет помещают между пяткой 2 и шпинделем 3 и, вращая барабан при помощи трещотки 10, доводят шпиндель до упора, сигналом чего служат



щелчки трещотки. По положению скошенного края барабана отсчитывают целое число делений линейной шкалы, десятые и сотые доли миллиметра отсчитывают по делению круговой шкалы, оказавшемуся против горизонтальной линии основной шкалы (см. рис. 4, б и в).

Поскольку наименьшее деление равно 0,01 мм, в качестве систематической погрешности при однократном измерении (а также при многократных измерениях, дающих одно и то же значение) принимают половину этой величины, т. е. 0,005 мм (ГОСТ 6507–60).

#### **4. ВЗВЕШИВАНИЕ ТЕЛА**

Масса тела в работе определяется на электронных цифровых весах в соответствии с прилагаемой к ним инструкции.

#### **5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

В нашей работе объектами измерения служат цилиндрические тела, изготовленные из различных материалов. Поскольку объем цилиндра

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}, \quad (4)$$

то формула (1) примет вид

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}, \quad (5)$$

где  $\pi = 3,1416$  (следует брать для расчетов именно 5 значащих цифр, т. к. привычное 3,14 внесет некоторую дополнительную погрешность в конечный результат);

$m$  – масса цилиндра;

$d$  – диаметр образца;

$h$  – высота образца.

Из формулы (5) видно, что для определения плотности цилиндра необходимо знать его высоту, диаметр и массу. В данной работе рекомендуется высоту измерять штангенциркулем, а диаметр – микрометром. Поскольку

высота и диаметр могут в разных местах оказаться неодинаковыми, их измерение следует производить не менее 5 раз. Для этого нужно при измерении высоты цилиндр поворачивать вокруг оси, а диаметр измерять в разных местах по высоте цилиндра. Затем взвешивают образец. Взвешивание можно производить один раз. При этом погрешность определения массы будет определяться пределом основной погрешности весов, которыми пользуются. Впрочем, операцию взвешивания можно произвести и несколько раз. Результаты всех измерений записывают в таблицы отчета (см. Приложение).

При проведении расчетов помните, что погрешность  $\Delta_p$  окончательного результата записывается с точностью до одной значащей цифры, а промежуточные погрешности  $S$ ,  $\theta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  – с точностью до двух (значение цифры приближенного числа – все его цифры, кроме нулей, стоящих в начале числа).

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте цель работы.
2. Перечислите основные измерительные операции и их последовательность.
3. Выведите формулу для плотности образца, имеющего цилиндрическую форму.
4. Что такое нониус?
5. Что называется постоянной нониуса, и как она определяется?
6. Как определить цену деления на барабане микрометра?
7. Как проверить правильность установки нуля микрометра?
8. Какова последовательность операций при взвешивании на электронных весах?



## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛ. 1

Таблица П. 1

### Плотность некоторых материалов (кг/м<sup>3</sup>)

Материал	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	Материал	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )
Алюминий	2700	Бронза	8700–8900
Железо	7870	Латунь	8400–8700
Золото	19300	Сталь	7500–7900
Медь	8930	Лед	913
Титан	4500	Стекло	2400–2800
Уран	18700		

ПРИЛ. 2

**УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра физики**

**О Т Ч Е Т**

**по лабораторной работе №1**

**«Определение плотности твердых тел правильной формы»**

Студент(ка)\_\_\_\_\_

Группа\_\_\_\_\_

Преподаватель\_\_\_\_\_

Дата\_\_\_\_\_

### 1. Расчетная формула

$$\langle \rho \rangle = \frac{4m}{\pi \langle d \rangle^2 \langle h \rangle},$$

где  $\langle \rho \rangle$  – \_\_\_\_\_;  $m$  – \_\_\_\_\_;  
 $\langle d \rangle$  – \_\_\_\_\_;  $\langle h \rangle$  – \_\_\_\_\_.

### 2. Средства измерений и их характеристики

Наименование средства измерения	Предел измерений или номинальное значение	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности $\theta_{\text{осн}}$

Образец № ...

### 3. Результаты измерений

#### 3.1. Измерение массы образца

$$m = \dots \text{ г}; \quad \Delta_m = \theta_m = 1,1 \cdot \sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = \dots \text{ г.}$$

#### 3.2. Измерение диаметра образца

$d_i$ мм	$(d_i - \langle d \rangle)$ , мм	$(d_i - \langle d \rangle)^2$ , мм <sup>2</sup>

$\langle d \rangle = \dots$  мм.

$$\sum_{i=1}^n (d_i - \langle d \rangle)^2 = \dots \text{ мм}^2.$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \langle d \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \text{ мм.}$$

Граница случайной погрешности

$$\varepsilon_d = t_{P,n} S_{\langle d \rangle} = \dots \text{ мм},$$

где  $t_{P,n}$  – коэффициент Стьюдента для числа измерений  $n$  и доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

Граница неисключенной систематической погрешности

$$\theta_d = \theta_{\text{очн}} = \dots \text{ мм}.$$

Граница полной погрешности результата измерения диаметра

$$\Delta_d = \sqrt{\varepsilon_d^2 + \theta_d^2} = \dots \text{ мм}.$$

Результат измерения диаметра:

$$\langle d \rangle = \dots \text{ мм},$$

$$\Delta_d = \dots \text{ мм}, \quad P = 0,95.$$

### 3.3. Измерение высоты образца

$h_i$ , мм	$(h_i - \langle h \rangle)$ , мм	$(h_i - \langle h \rangle)^2$ , мм <sup>2</sup>

$$\langle h \rangle = \dots \text{ мм}, \quad \sum_{i=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2 = \dots \text{ мм}^2.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_{\langle h \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \text{ мм}.$$

Граница случайной погрешности

$$\varepsilon_h = t_{P,n} S_{\langle h \rangle} = \dots \text{ мм}.$$

Граница неисключенной систематической погрешности

$$\theta_h = \theta_{\text{очн}} = \dots \text{ мм}.$$

Граница полной погрешности результата измерения высоты

$$\Delta_h = \sqrt{\varepsilon_h^2 + \theta_h^2} = \dots \text{ мм}.$$

Результат измерения высоты:

$$\langle h \rangle = \dots \text{ мм,}$$

$$\Delta_h = \dots \text{ мм,} \quad P = 0,95.$$

4. Расчет искомой величины в СИ:

$$\langle \rho \rangle = \frac{4m}{\pi \langle d \rangle^2 \langle h \rangle} = \dots \text{ кг/м}^3.$$

5. Оценка границы относительной погрешности результата измерения плотности:

$$\gamma = \frac{\Delta_\rho}{\langle \rho \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_m}{m}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta_d}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_h}{\langle h \rangle}\right)^2}$$
$$\gamma = \sqrt{\dots} = \dots$$

6. Оценка границы абсолютной погрешности результата измерения плотности:

$$\Delta_\rho = \gamma \langle \rho \rangle = \dots \text{ кг/м}^3, \quad P = 0,95.$$

7. Окончательный результат:

$$\rho = (\langle \rho \rangle \pm \Delta_\rho) = (\dots \pm \dots) \text{ кг/м}^3, \quad P = 0,95.$$

8. Выводы.



*Учебное издание*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ  
ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Составители: **Левченко** Виталий Петрович  
**Черняев** Валентин Сергеевич  
**Плетнева** Елена Давыдовна  
**Волков** Аркадий Германович

Редактор *В. И. Новикова*  
Компьютерный набор *Н. Н. Суслиной*

Подписано в печать г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 0,87.  
Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: rio@ustu.ru

Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического центра УрФУ  
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
E-mail.: press.info@usu.ru