

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

по дисциплине «ФИЗИКА»
для студентов всех специальностей
дневной и заочной форм обучения

Брест 2009

УДК 538.91, 539.22, 620.18, 548.73

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Физика». Содержат теоретические сведения, задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: А.А. Гладышук, к.ф.м. наук, доцент;
И.С. Янусик, старший преподаватель

Рецензент: В.С. Костко, к.ф.м.наук, доцент кафедры
общей физики БрГУ им. А.С.Пушкина

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

1. **Цель работы:** изучить движение заряжённых частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Измерить удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$ методом магнетрона.
2. **Приборы и принадлежности:** электронная лампа с цилиндрическим анодом, соленоид, миллиамперметр, амперметр и вольтметр постоянного тока, реостаты, источник постоянного тока, выключатели, миллиметровка.
3. **Общий вид установки:**

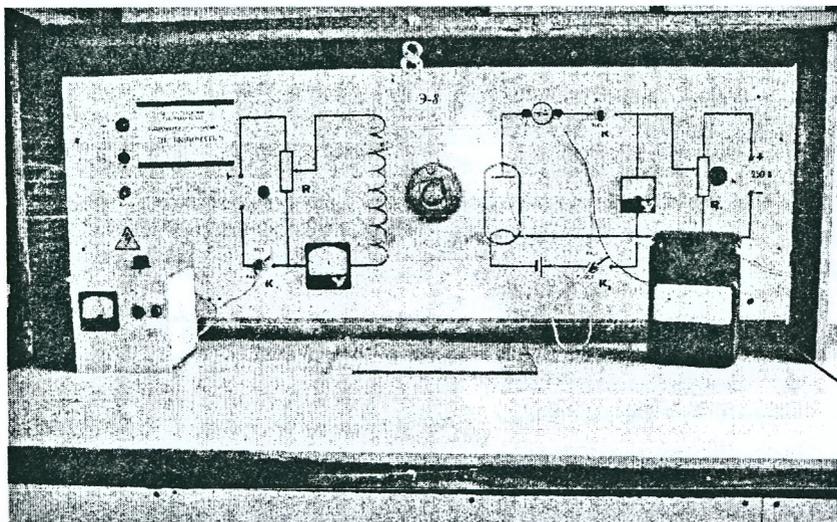
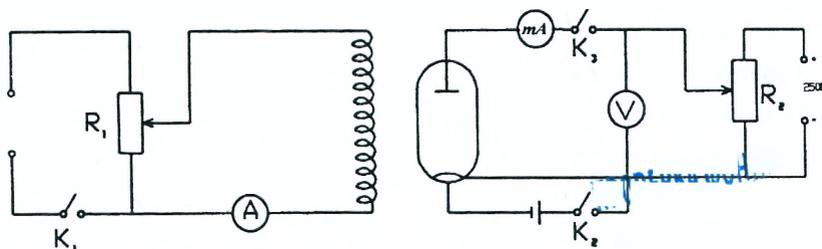


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема установки



4. Теория метода

Удельным зарядом частицы называется отношение её заряда q к массе m .

Величина $\frac{q}{m}$ сугубо индивидуальная для каждой частицы. Существуют различные методы её определения.

В настоящей работе удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$, (e – заряд электрона) определяется при помощи метода, получившего название «метод магнетрона». Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей очень напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот. *Магнетрон – это электронная вакуумная лампа, в которой катод и анод образуют коаксиальную систему, помещённую в продольное однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом, соосным электронной лампе.*

Движение электронов в этом случае происходит в кольцевом пространстве, заключённом между цилиндрическими, коаксиальными катодом и анодом двухэлектродной лампы (диод). Нить накала лампы (катод) располагается вдоль оси цилиндрического анода так, что электрическое поле направлено по радиусу от анода к катоду. Лампа помещается внутри соленоида, создающего однородное, магнитное поле, параллельное катоду. Ось лампы совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля \vec{B} . В таких скрещенных взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях действует на электрон сила:

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_л = e\vec{E} + e[\vec{V} \times \vec{B}],$$

где \vec{V} – скорость движения электрона,

\vec{E} – напряжённость электрического поля,

\vec{B} – индукция магнитного поля.

5. Задания для самостоятельной работы:

1. Включить установку. Для этого:

а) включить сеть;

б) замкнуть ключи K_3 и с помощью потенциометра R_2 выставить по вольтметру анодное напряжение U_a , предварительно согласовав выбор U_a с преподавателем (100 В; 120 В; 130 В; 140 В; 150 В);

в) замкнуть ключ K_2 и в течение 5 минут прогреть катод; после прогрева в анодной цепи должен появиться анодный ток I_a , который регистрируется в mA ;

г) включить цепь соленоида ключом K_1 и с помощью потенциометра R_1 выставить ток в соленоиде I_c ;

2. Изменяя силу тока в соленоиде I_c , определить соответствующие значения силы анодного тока I_a . Шаг изменения I_c выбрать самостоятельно. В области резкого уменьшения I_a шаг изменения I_c должен быть особенно частым;

В процессе измерения тока I через катушку при вращении потенциометра R_1 по часовой стрелке несколько изменяется и U_a . Поэтому при снятии кривых зависимости $I_a = f(I_c)$ следует после каждого измерения восстанавливать прежнее значение U_a :

3. Провести исследование зависимости анодного тока от тока в соленоиде $I_a = f(I_c)$ для четырёх различных значений U_a . Данные занести в таблицу 1;

4. Для каждого значения анодного напряжения U_a на миллиметровке построить т. н. сбросовые характеристики (графики зависимости $I_a = f(I_c)$), откладывая по оси ординат силу анодного тока, а по оси абсцисс – силу тока в соленоиде;

5. Из графиков $I_a = f(I_c)$ для каждого значения U_a определить значение критического тока $I_{кр}$ и рассчитать значение $I_{кр}^2$.

В правильно работающей установке, кривые $I_a = f(I_c)$, при некоторых значениях I_c должны резко падать. В реальной установке ток I_a не падает до нуля ни при каком значении тока в катушке. Это связано с тем, что всегда имеется разброс скоростей электронов, вылетающих из катода, некоаксиальность катода и анода, непараллельность катода оси соленоида и т.п. Поэтому для нахождения $I_{кр}$ по графику зависимости $I_a = f(I_c)$, нужно провести касательную до пересечения с осью I_c в той области кривой, где она имеет наибольший наклон (фактически выбирается прямолинейный участок спада графика). Точка пересечения касательной с осью I_c и будет критическим значением тока $I_{кр}$ (см. рис.8);

6. Рассчитайте значения $I_{кр}^2$. Занесите полученные значения в таблицу 2;

7. Построить график зависимости $U_a = f(I_{кр}^2)$. Убедиться, что все полученные значения $I_{кр}^2$ и заданные U_a лежат на одной прямой;

8. По формуле (19) вычислить отношение заряда электрона к его массе $\frac{e}{m}$ (см. Приложение 2). Постоянная установки A задана. Сравнить с табличным значением;

9. По графику $U_a = f(I_{кр}^2)$ оценить разброс точек и вычислить относительную погрешность вычислений $\frac{e}{m}$.

Приложение 1. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

На заряд, движущийся в магнитном поле, действует магнитная сила, которую называют силой Лоренца. Эта сила определяется зарядом q , скоростью его движения \vec{v} и магнитной индукцией \vec{B} в той точке, где находится заряд в рассматриваемый момент времени. Модуль силы Лоренца F_L пропорционален каждой из трёх величин q , v , B . Кроме того, можно ожидать, что F_L зависит от взаимной ориентации векторов \vec{v} и \vec{B} .

Опытным путём установлено, что сила Лоренца определяется в СИ формулой:

$$\vec{F} = q[\vec{V} \times \vec{B}]$$

Модуль магнитной силы равен

$$F = qVB \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{V} и \vec{B} .

Следовательно, если заряд движется вдоль линий магнитного поля, то он не испытывает действия магнитной силы ($\alpha = 0$).

Направлена магнитная сила перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы \vec{V} и \vec{B} . Если заряд q положителен, направление силы совпадает с направлением вектора $[\vec{V} \times \vec{B}]$. В случае отрицательного q направления векторов \vec{F} и $[\vec{V} \times \vec{B}]$ противоположны (рис. 2).

Если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 90^\circ$ к направлению \vec{B} , то она далее будет двигаться по окружности радиуса R (рис. 2). В этом случае сила Лоренца играет роль центростремительной силы, и по второму закону Ньютона можно записать:

$$\frac{mV^2}{R} = qVB \Rightarrow R = \frac{mV}{(qB)}$$

Радиус этой окружности зависит от скорости частицы, магнитной индукции поля и отношения заряда частицы к её массе. В этом случае период T обращения частицы по окружности ($T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi m}{qB}$) и циклическая частота ω

($\omega = 2\pi/T = qB/m$) не зависят ни от скорости частицы, ни от радиуса траектории. Это положено в основу работы некоторых ускорителей элементарных частиц.

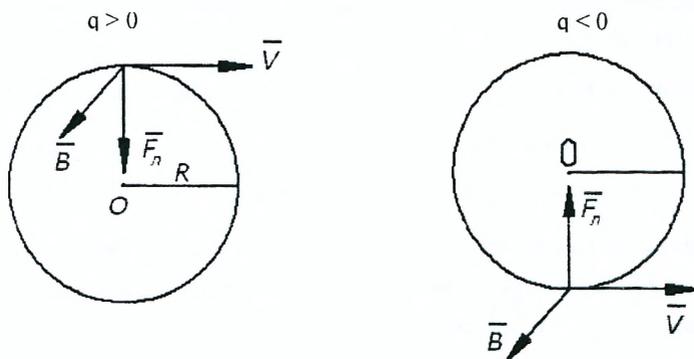


Рисунок 2

В случае, если скорость заряженной частицы образует с направлением однородного магнитного поля угол α , отличный от прямого, вектор скорости раскладывается на две составляющие: \vec{V}_\perp – перпендикулярную к \vec{B} и \vec{V}_\parallel – параллельную \vec{B} (рис. 3). Модули этих составляющих равны

$$V_\perp = V \sin \alpha, \quad V_\parallel = V \cos \alpha$$

Магнитная сила имеет модуль

$$F = qVB \sin \alpha = qV_\perp B$$

и лежит плоскости, перпендикулярной к \mathbf{B} . Создаваемое этой силой ускорение является для составляющей V_{\perp} нормальным.

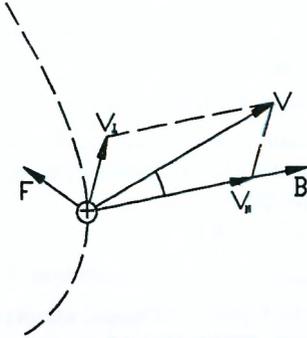


Рисунок 3

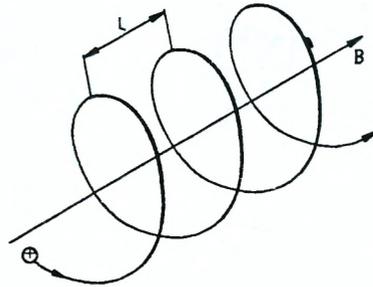


Рисунок 4

Составляющая магнитной силы в направлении \mathbf{B} равна нулю; поэтому повлиять на величину V_{\parallel} эта сила не может. Таким образом, движение частицы можно представить как наложение двух движений: 1) перемещения вдоль направления \mathbf{B} с постоянной скоростью $V_{\parallel} = V \cos \alpha$ 2) равномерного движения по окружности в плоскости, перпендикулярной к вектору \mathbf{B} . Радиус окружности определяется формулой ($R = \frac{mV}{qB}$) с заменой V на $V_{\perp} = V \sin \alpha$. Траектория движения представляет собой винтовую линию, ось которой совпадает с направлением \mathbf{B} (рис. 4). Шаг линии L можно найти, умножив V_{\parallel} на определяемый формулой ($T = 2\pi \frac{m}{qB}$) период обращения T :

$$l = V_{\parallel} T = 2\pi \frac{m}{qB} V \cos \alpha \quad (1)$$

Направление, в котором закручивается траектория, зависит от знака заряда частицы. Если заряд положителен, траектория закручивается против часовой стрелки. Траектория, по которой движется отрицательно заряженная частица, закручивается по часовой стрелке (предполагается, что мы смотрим на траекторию вдоль направления \mathbf{B} ; частица при этом летит от нас, если $\alpha < \pi/2$, и на нас, если $\alpha > \pi/2$).

Приложение 2. Теория метода

2.1. Рассмотрим траекторию электронов, движущихся под действием рассматриваемой комбинации электрического и магнитного полей. Для вычисления воспользуемся цилиндрической системой координат и будем положение электрона характеризовать параметрами цилиндрической системы координат r, ϕ, z (рис. 5). Напряжённость электрического поля в цилиндрическом конденсаторе, образованном катодом и анодом, имеет только радиальную компоненту E_r и определяется известной формулой:

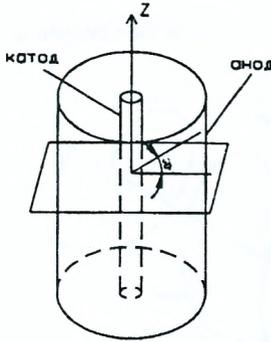


Рисунок 5

$$E_r = -\frac{U_a}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)} \frac{1}{r}, \quad (2)$$

где U_a – разность потенциалов между анодом и катодом; r_a – радиус анода; r_k – радиус катода, r – расстояние от оси катода до исследуемой точки. Сила, действующая на электрон в таком поле, направлена по радиусу и определяется формулой:

$$F_{эл} = eE_r \quad (3)$$

Рассмотрим теперь силы, действующие на электрон со стороны магнитного поля. Поскольку магнитное поле в нашем случае направлено вдоль оси z , то $F_{z\text{магн}} = 0$, а остальные две составляющие найдём с помощью формулы Лоренца:

$$F_{\varphi\text{магн.}} = -eV_r B \quad (4)$$

$$F_{r\text{маг}} = eV_{\dot{\varphi}} B \quad (5)$$

Из простых кинематических соображений ясно, что входящие в формулы (4) и (5) V_r и $V_{\dot{\varphi}}$ равны.

$$V_{\dot{\varphi}} = r\dot{\varphi} = r \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

$$V_r = \dot{r} = \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

Так как вдоль оси z на электрон не действуют никакие силы, то движение вдоль этого направления является равномерным. Движение в плоскости ($r\varphi$)

удобно описывать с помощью уравнения моментов:

$$\frac{d}{dt}(I \cdot \dot{\varphi}) = M_z \quad (8)$$

где $I = mr^2$, момент инерции электрона относительно оси z ;

Величина $M_z = r \cdot F_{\dot{\varphi}}$. С помощью (4) найдём:

$$M_z = -er \cdot V_r B \quad (9)$$

Подставляя (6) и (9) в (8), найдём:

$$\frac{d}{dt}(mr^2\dot{\varphi}) = -eBr \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{2}eB \frac{d(r^2)}{dt} \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (10) и замечая, что заряд электрона отрицателен, получаем:

$$r^2\dot{\varphi} + C = \frac{|e|Br^2}{2m}, \quad (11)$$

где C – постоянная интегрирования, которую с хорошей точностью можно положить равной нулю (электроны с катода вылетают с малой скоростью и в начале движения радиус r равен радиусу катода, т.е. очень мал).

Уравнение (11) приобретает при этом простой вид:

$$\dot{\varphi} = \frac{|e|B}{2m} \quad (12)$$

Рассмотрим теперь движение электрона вдоль радиуса. Так как магнитное поле работы не производит, то

$$eU = \frac{1}{2}mV^2 \quad (13)$$

Так как $V^2 = V_r^2 + V_\varphi^2$, то

$$eU = \frac{1}{2}m\left(V_r^2 + V_\varphi^2\right) \quad (14)$$

С помощью (6), (7), (12) найдём:

$$eU = \frac{m}{2}\left(\dot{r}^2 + \left(\frac{reB}{2m}\right)^2\right) \quad (15)$$

Уравнение (15) полностью определяет радиальное движение электрона.

2.2. Рассмотрим теперь траекторию электронов, вылетевших из катода при потенциале анода U_a . В отсутствие магнитного поля (рис. 6) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса (мы рассматриваем идеальный вариант, считая, что все электроны вылетают под прямым углом к оси катода)

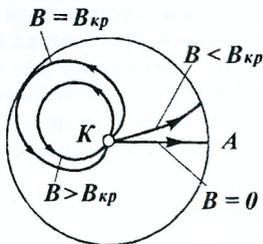


Рисунок 6

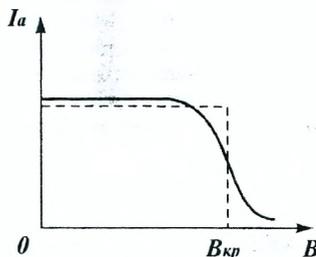


Рисунок 7

При слабом поле траектория несколько искривляется, но электрон всё же попадает на анод. При некотором критическом значении индукции магнитного поля $B_{кр}$ траектория искривляется настолько, что коснётся анода. Наконец, при $B > B_{кр}$ электрон вовсе не попадает на анод и возвращается к катоду. Заметив, что при $B_{кр}$ радиальная скорость электрона \dot{r} при $r=r_a$ обращается в нуль, получим из (15) выражение:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2} \quad (16)$$

С учётом, что магнитное поле создаётся в нашем случае катушкой и критическое значение индукции магнитного поля равно:

$$B_{кр} = \mu\mu_0 \frac{nI_{кр}}{2} (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$$

Запишем,
$$\frac{e}{m} = \frac{16U_a}{r_a^2 \mu^2 \mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)^2} \quad (17)$$

Обозначив $A = \frac{16}{r_a^2 \mu^2 \mu_0^2 n^2 (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)^2}$ – постоянная установки, окончательно получим:

$$\frac{e}{m} = A \frac{U_a}{I_{кр}^2} \quad (18)$$

Выражение (18) является рабочей формулой.

Если бы все электроны имели одинаковые скорости, то при достижении $B=B_{кр}$ ток через лампу прекратился бы сразу. Но поскольку электроны, испускаемые нагретым катодом, имеют различные начальные скорости, реальная кривая зависимости силы анодного тока I_a от индукции магнитного поля \vec{B} (т. н. сбросовая характеристика) оказывается сглаженной (сплошная кривая на рис. 7). В этом случае значение $B_{кр}$ соответствует наиболее быстрому спаду сбросовой характеристики.

Следует заметить, что сглаживание сбросовых характеристик происходит ещё и по ряду других причин: из-за неточной коаксиальности катода и анода, нестрогой однородности магнитного поля, неабсолютной его параллельности катоду и др. А вот наличие у скорости вылетающего из катода электрона составляющей вдоль оси катода на анодный ток не влияет. Если соленоид достаточно длинный и лампа расположена далеко от его концов, то индукцию магнитного поля можно считать пропорциональной силе тока в соленоиде I_c :

$$B = \mu_0 N \frac{I_c}{l} = \mu_0 n I_c,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$ – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; l – его длина; n – число витков соленоида на единицу его длины (плотность намотки). Тогда сбросовые характеристики удобнее представлять не в виде функции $I_a = f(B)$, а в виде $I_a = f(I_c)$, т.е. строить график в координатах I_a, I_c и находить значение силы тока в соленоиде $I_{кр}$, соответствующее наиболее быстрому спаду сбросовой характеристики $I_a = f(I_c)$. (см. рис. 8)

Из формулы (18) следует, что найденные по сбросовым характеристикам значения $I_{кр}^2$ должны быть прямо пропорциональными U , т.е. график $U = U(I_{кр}^2)$ должен быть прямой линией. Если по этому графику определить её угловой коэффициент $\text{tg}\gamma = \frac{U_a}{I_{кр}^2}$, то

$$\frac{e}{m} = A \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (19)$$

γ – угол наклона прямой к оси абсцисс.

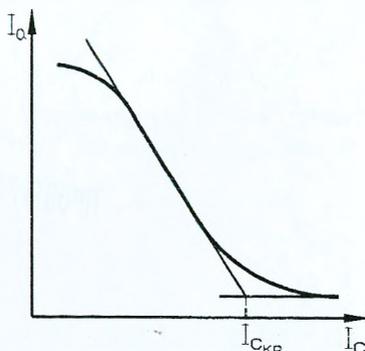


Рисунок 8

Таблица 1

$U_a, \text{В}$		$U_a, \text{В}$		$U_a, \text{В}$		$U_a, \text{В}$	
$I_c, \text{А}$	$I_a, \text{мА}$						

Таблица 2

$U_a, \text{В}$	$I_{c,кр}, \text{мА}$	$I_{c,кр}^2, \text{мА}^2$

6. Контрольные вопросы

- Опишите движение электронов во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях.
- Вывод рабочей формулы (18).
- В чём сущность измерения методом магнетрона?
- Как влияет магнитное поле на движение электрона в лампе?
- Что такое сбросовые характеристики? От чего они зависят?
- Как повлияет на результат изменение направления тока в соленоиде?
- Как определяются значения критического поля $B_{кр}$ и критической силы тока $I_{кр}$ в соленоиде?
- Методика выполнения работы.

Литература

- Савельев, И.В. Курс общей физики. Электричество и магнетизм / И.В. Савельев – М.: Наука, 1982. – С. 208 – 226.
- Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников – М.: Наука, 1970. – § 98. – С. 198 – 205.
- Наркевич, И.И. Физика / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко – Мн.: ООО «Новое знание», 2004. – С. 355 – 360.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

Гладышук Анатолий Антонович
Янусик Ирина Семеновна

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы №8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА
по дисциплине «ФИЗИКА»
для студентов всех специальностей
дневной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск:

Редактор: **Строкач Т.В.**

Компьютерная верстка: **Кармаш Е.Л.**

Корректор: **Никитчик Е.В.**

Подписано к печати 09.09.2009 г. Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 0,69.
Уч. изд. л. 0,75. Заказ № 815. Тираж 56 экз. Отпечатано на ризографе
учреждения образования «Брестский государственный технический
университет», 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.