

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»
КАФЕДРА ФИЗИКИ

**СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ
ГИСТЕРЕЗИСА**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Методические указания
для студентов всех специальностей
дневной и заочной формы обучения

Могилев 2015

УДК 532.516

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры физики

Протокол № 9 от 17.04.2015

Составитель: Д.Я.Каранчук

Рецензент:
к. ф.- м. н., проф. В.Л. Малышев

Аннотация
магнитного гистерезиса

в работе изучается явление

©УО«Могилевский государственный
университет продовольствия», 2015

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 10

"СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА"

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследование магнитных свойств вещества с помощью петли гистерезиса.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: два соленоида на деревянной скамье, буссоль, стальной стержень, выпрямитель, амперметр на 1 А, два реостата на 100 Ом, 2 А; двухполюсный переключатель, соленоид на подставке - 220 В, 3 А; регулятор напряжения, соединительные провода, штангенциркуль.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Различные вещества в магнитном поле намагничиваются, т.е. сами становятся источниками магнитного поля. Вещества, способные к намагничиванию, называются магнетиками, результирующее магнитное поле в магнетиках является суммой внешних полей и создаваемых намагниченной средой.

Причина намагничивания заключается в том, что во всех веществах существуют мельчайшие электрические токи, замыкающиеся в пределах каждой молекулы (молекулярные токи). В отсутствие внешнего магнитного поля молекулярные токи в магнетиках расположены беспорядочно, так что суммарное их действие равно нулю. Во внешнем магнитном поле расположение молекулярных токов становится частично или полностью упорядоченным. Поэтому намагниченный магнетик можно представить как систему мельчайших ориентированных токов.

В изотропных магнетиках магнитная индукция \vec{B} связана с напряженностью намагничивающего поля \vec{H} следующим образом:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная, μ - относительная магнитная проницаемость вещества, $\mu = B/B_0$, показывает, во сколько раз магнитная индукция B в веществе отличается от магнитной индукции B_0 в вакууме. При этом величина μ может быть как больше, так и меньше единицы.

Вещества, для которых $\mu < 1$, называются диамагнитными или диамагнетиками, а вещества с $\mu > 1$ - парамагнитными или парамагнетиками. Обычно для парамагнетиков μ не намного больше единицы.

Магнитный момент \vec{P}_m - это произведение площади S контура, тока I и вектора единичной нормали \vec{n} , который связан с направлением тока правилом правого винта $\vec{P}_m = IS\vec{n}$. Всякое вещество является магнетиком, т. е. оно способно под действием внешнего магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Для понимания механизма этого явления необходимо рассмотреть действие магнитного поля на движущиеся в атоме электроны.

Ради простоты предположим, что электрон в атоме движется по круговой орбите. Если орбита электрона ориентирована относительно вектора \vec{B} произвольным образом, составляя с ним угол α (рис. 1), то установлено, что она приходит в такое движение вокруг \vec{B} , при котором вектор магнитного момента \vec{P}_m , сохраняя

постоянным углом α , вращается вокруг вектора \vec{B} с некоторой угловой скоростью. Такое движение в механике называется **прецессией**. Прецессию вокруг вертикальной оси, проходящей через точку опоры, совершает, например, диск волчка при замедлении движения.

Таким образом, электронные орбиты атома под действием внешнего магнитного поля совершают прецессионное движение, которое эквивалентно току. Так как этот микроток индуцирован внешним магнитным полем, то согласно правилу Ленца, у атома появляется составляющая магнитного поля, направленная противоположно внешнему полю. Наведенные составляющие магнитных полей атомов (молекул) складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. Этот эффект получил название **диамагнитного эффекта**, а вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле против направления поля, называются **диамагнетиками**.

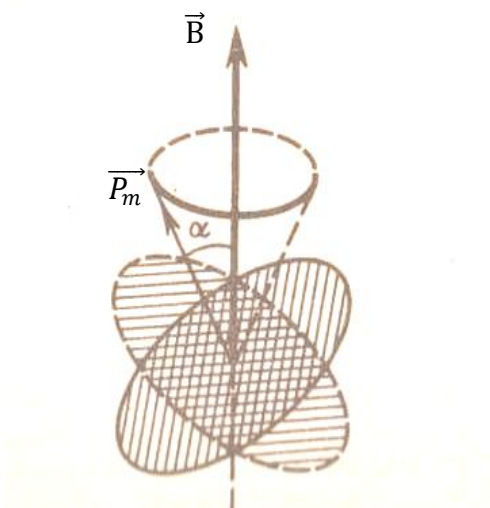


Рисунок 1 – Прецессионное движение электронной орбиты

В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетик ненамагничен, поскольку в данном случае магнитные моменты электронов взаимно компенсируются, и суммарный магнитный момент атома (он равен векторной сумме магнитных моментов (орбитальных и спиновых) составляющих атом электронов) равен нулю. К диамагнетикам относятся многие металлы (например, Bi , Ag , Au , Cu), большинство органических соединений, смолы, углерод и т. д.

Так как диамагнитный эффект обусловлен действием внешнего магнитного поля на электроны атомов вещества, то диамагнетизм свойствен всем веществам. Однако наряду с диамагнитными веществами существуют и **парамагнитные** – вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля.

У парамагнитных веществ при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты электронов не компенсируют друг друга, и атомы (молекулы) парамагнетиков всегда обладают магнитным моментом. Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно, поэтому парамагнитные вещества магнитными свойствами не обладают. При внесении

парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. Этот эффект называется **парамагнитным**. При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается. К парамагнетикам относятся редкоземельные элементы, Pt, Al, и т. д. Диамагнитный эффект наблюдается и в парамагнетиках, но он значительно слабее парамагнитного и поэтому остается незаметным.

Наряду с диа- и парамагнетиками имеются вещества, магнитная проницаемость которых при обычных температурах измеряется многими сотнями и тысячами единиц (до 10^6). Такие вещества, способные к сильному намагничиванию, получили название ферромагнетиков. Ферромагнетики, помимо способности намагничиваться, обладают рядом свойств, существенно отличающих их от диа- и парамагнетиков. Характерной особенностью ферромагнетиков является сплошная нелинейная зависимость между индукцией B и напряженностью H внешнего поля (рис.2).

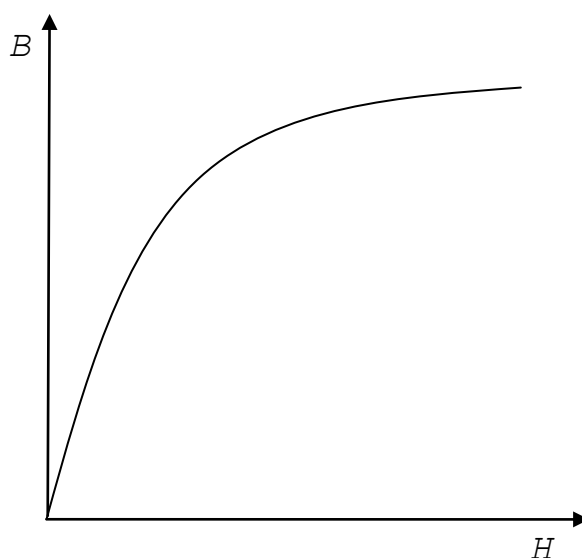


Рисунок. 2 -- Зависимость индукции B от напряженности H внешнего поля

Индукция сначала сильно увеличивается с ростом H , но по мере намагничивания ферромагнетика ее нарастание замедляется, наступает так называемое насыщение. Это говорит о том, что магнитная проницаемость $\mu = B / (H \mu_0)$ в случае ферромагнетиков является функцией величины напряженности намагничивающего поля $\mu = \mu(H)$. Эта зависимость представлена на рисунке 3. Значение индукции в ферромагнетике определяется не только существующим магнитным полем, но еще и зависит от предыдущих состояний намагничивания, причем происходит своеобразное отставание изменения величины индукции B от изменения напряженности поля H . Это явление получило название магнитного гистерезиса, а кривая зависимости B от H при циклическом перемагничивании называется петлей гистерезиса (рис. 4).

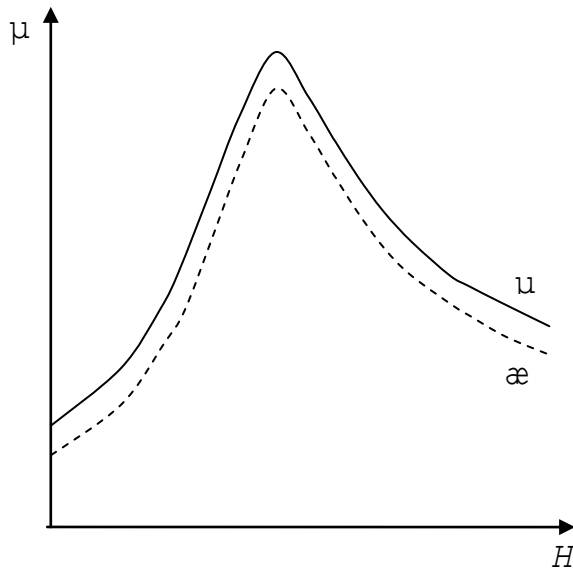


Рисунок 3 -- Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности H

На рисунке 4 OA является кривой, характеризующей первоначальное намагничивание ненамагниченного ферромагнетика. При достаточно больших H кривая OA пойдет почти параллельно оси H , т.е. наступит насыщение. Если, дойдя до точки A , начать уменьшать намагничивающее поле H , то индукция будет уменьшаться по кривой AD , т.е. с некоторым отставанием. Величина индукции, равная отрезку OD , называется остаточной индукцией $B_{ост}$. Полное размагничивание наступает в случае, если создать отрицательную напряженность намагничивающего поля H (т.е. изменить направление H), численно равную отрезку OK . Величина этой напряженности называется задерживающей или коэрцитивной силой.

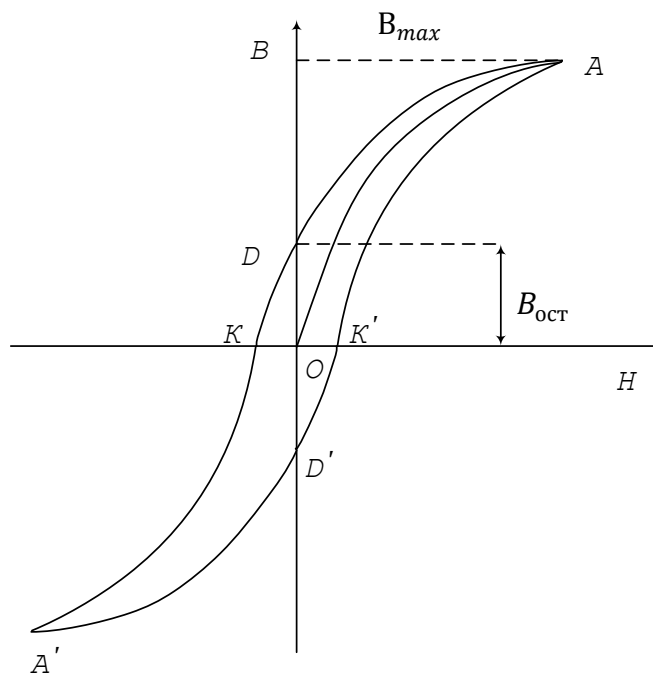


Рисунок 4 – Петля гистерезиса

Дальнейшее уменьшение отрицательного значения H (т.е. увеличение модуля намагничивающего поля, направленного в противоположную по отношению к первоначальному полю сторону) вызывает в веществе индукцию обратного направления (кривая KA'). Увеличивая затем внешнее поле до нуля, получим индукцию B (отрезок $OD'=OD$), называемую отрицательной остаточной индукцией. Отрезок OK' ($OK=OK'$) дает величину коэрцитивной силы, необходимой для уничтожения отрицательной остаточной индукции. При дальнейшем увеличении поля кривая от точки K' пойдет вверх и замкнется в точке A .

Все указанные выше особенности намагничивания ферромагнетиков связаны с тем, что в них имеются области самопроизвольного намагничивания (домены). В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты всех атомов, обусловленные токами отдельного домена, имеют одинаковые направления (молекулярные токи упорядочены), и домен в целом обладает определенным магнитным моментом. Для различных доменов направления их магнитных моментов различно, и поэтому полный (суммарный) магнитный момент всего ферромагнетика может быть равен нулю (т.е. ферромагнетик целиком ненамагничен, несмотря на наличие сильных магнитных полей в отдельных областях внутри его). При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит ориентация не отдельных атомов (молекул), как в парамагнетиках, а доменов. Это и приводит к большой величине намагничивания ферромагнетика (большому μ). Такой механизм намагничивания ферромагнетика позволяет объяснить и другие его свойства: зависимость магнитной проницаемости μ от величины напряженности магнитного поля, остаточную намагниченность и явление гистерезиса. Действительно, в достаточно больших внешних полях практически все домены выстраиваются вдоль поля и наступает насыщение в намагничивании вещества. Если внешнее поле уменьшить до нуля, то не все домены дезориентируются (явление остаточного намагничивания). Это связано с тем, что изменить ориентировку групп молекул (или атомов) гораздо труднее, чем, например, отдельной молекулы (атома). Для того, чтобы тело опять стало ненамагниченным (все домены дезориентированы), надо наложить внешнее поле, обратное по знаку первоначальному полю (коэрцитивная сила).

В заключение отметим, что вещества обладают ферромагнитными свойствами лишь при температуре ниже некоторой (различной для разных веществ), называемой точкой Кюри. При температурах выше точки Кюри они теряют ферромагнитные свойства и становятся обычными парамагнетиками.

Для ферромагнитных веществ магнитная проницаемость μ и коэффициент намагничивания α , связаны соотношением:

$$\mu = 1 + \alpha. \quad (2)$$

Эти величины не являются постоянными, а зависят от напряженности намагничивающего поля H (рис. 2). Эта зависимость учитывается путем введения соответствующей поправки к формуле (1):

$$B = k \mu_0 \alpha H. \quad (3)$$

Опытным путем установлено, что в случае соленоида величина k зависит от объема ферромагнетика, расстояния от центра стержня ферромагнетика до рассматриваемой точки поля и определяется по формуле:

$$k = \frac{2V}{r^3} \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где V - объем стержня, r - расстояние от середины испытуемого ферромагнетика (стержня) до центра магнитной стрелки, с помощью которой исследуется магнитное поле в данной точке.

Если магнитную стрелку разместить в плоскости магнитного меридиана, а затем поднести к ней магнитный сердечник, то она отклонится на некоторый угол α . Тогда

$$B_{BH} / B_3 = \operatorname{tg} \alpha, \quad B_{BH} = B_3 \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где B_3 - индукция магнитного поля Земли. Зная B_3 и угол отклонения стрелки, можно по формуле (5) определить индукцию сердечника B_{BH} .

Подставив формулы (4) и (5) в выражение (3) и решив его относительно α , получим

$$\alpha = \frac{B_3 (\operatorname{tg} \alpha) r^3 10^3}{\mu_0 H 2V}. \quad (6)$$

Намагничивающее поле H , создаваемое катушкой (соленоидом), вычисляется по величине тока, протекающего через соленоид:

$$H = In = I \frac{N}{l}, \quad (7)$$

где n - число витков на единицу длины, N - число всех витков, l - длина соленоида.

Тогда

$$\alpha = \frac{B_3 (\operatorname{tg} \alpha) r^3 l 10^3}{\mu_0 IN 2V}, \quad (8)$$

но $B_3 = \mu_0 H_3$.

Окончательно получим

$$\alpha = \frac{H_3 (\operatorname{tg} \alpha) r^3 l 10^3}{2INV}, \quad (9)$$

где H_3 - горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли, равная 16 А/м; α - угол отклонения магнитной стрелки; r - расстояние от середины испытуемого ферромагнитного стержня до центра магнитной стрелки; l - длина соленоида; N - число витков соленоида; V - объем ферромагнитного стержня.

Согласно (5) и (7) кривая зависимости $\alpha = f(I)$ будет аналогична петле гистерезиса.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для снятия основной кривой намагничивания ОА и петли гистерезиса испытуемого ферромагнитного образца используют установку, состоящую из двух размещенных на мерной линейке соленоидов, между которыми укреплена магнитная стрелка. Испытуемый стальной стержень помещается внутри одного из соленоидов таким образом, чтобы его ось совпала с осью соленоида и была направлена перпендикулярно к магнитному меридиану (магнитной стрелке) (рис. 5).

Витки соленоида намотаны так, что при пропускании тока в отсутствие испытуемого образца магнитная стрелка остается в плоскости магнитного меридиана. Если в один из соленоидов поместить испытуемый ферромагнитный стержень, то магнитная стрелка будет отклоняться от плоскости магнитного меридиана, причем с

увеличением силы тока сначала отклонение идет быстро, а затем замедляется.

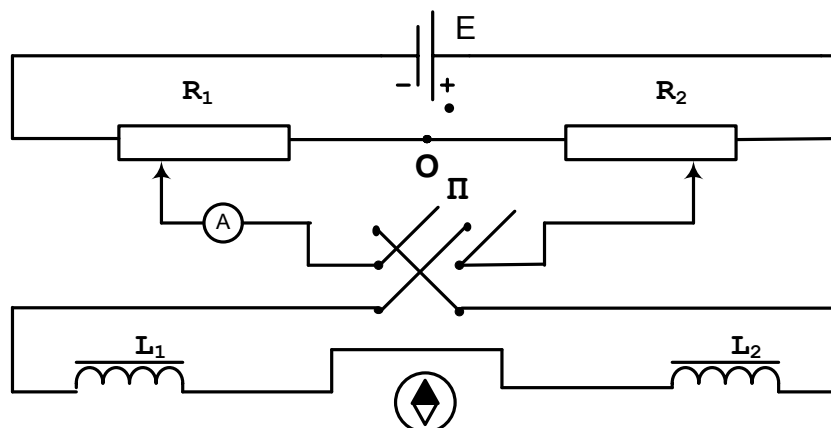


Рисунок 5 -- Схема лабораторной установки

Ток в соленоиды подводится от селенового выпрямителя, который преобразует переменный ток в постоянный. Величина последнего изменяется с помощью двух реостатов R_1 и R_2 .

Для размагничивания стержня служат соленоид на подставке (на 220 В, 3 А) и регулятор напряжения. Линейные размеры стержня измеряются с помощью штангенциркуля.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Детально ознакомиться с работой и заготовить таблицы для записи зависимостей углов отклонения α магнитной стрелки от силы тока I .
2. Собрать рабочую цепь согласно схеме (рис. 5), соблюдая полярность.
3. Размагнитить образец. Для этого стержень поместите в катушку на подставке, которую соединяют через ЛАТР с сетью. Перемещением движка ЛАТРа сначала увеличивают напряжение в катушке до 250 В, а затем снижают до 0 Вольт. После этого образец оказывается размагниченным (проверить, поднося образец к магнитной стрелке: к его обоим концам должна притягиваться магнитная стрелка).
4. Установить стрелку компаса вдоль магнитного меридиана Земли (против нуля шкалы).
5. Включить выпрямитель и установить напряжение $U=8В$. Замкнуть двухполюсный рубильник Π в любую сторону. Движением реостатов сбросить ток в цепи до нуля.
6. Внести в соленоид L ферромагнитный сердечник и, увеличивая ток от 0 до 0,8 А через каждые 0,1 А, произвести отсчет угла α отклонения стрелки для соответствующих значений тока I . Если стрелка компаса отклоняется в направлении против хода часовой стрелки, то модуль угла α определяют по формуле $\alpha = 360^\circ - \beta$, где β – показания стрелки компаса. Результаты измерений записать в таблицу 1.
7. Уменьшая ток от 0,8 до 0 А, через каждые 0,1 А произвести отсчет угла α . Результаты измерений записать в таблицу 2.
8. Переключателем Π изменить направление тока в цепи (направление намагничивающего поля в соленоиде) и, уменьшая ток от 0 до -0,8 А, через каждые

0,1А произвести отсчеты угла α , приписав ему знак « \leftrightarrow ». Результаты измерений записать в таблицу 3.

9. Увеличивая ток от -0,8 до 0 А, произвести отсчеты отрицательного угла α через каждые 0,1 А. Результаты измерений записать в таблицу 4.

10. Переключателем П вновь изменить направление тока в цепи и, увеличивая ток от 0 до 0,8 А, через каждые 0,1 А произвести отсчеты положительного угла отклонения α магнитной стрелки. Данные опыта записать в таблицу 5.

11. Для значений тока 0,2 А, 0,5 А, 0,8 А и соответствующих значений α по формулам (9) и (2) вычислить значения χ и μ .

12. По данным таблиц 1 – 5 построить график зависимости α от I .

13. Используя компьютерную программу по результатам измерений построить график основной кривой намагничивания и петли гистерезиса.

ДАННЫЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

1 Расстояние от середины испытуемого ферромагнитного стержня до центра магнитной стрелки	153 мм
2 Длина соленоида	43 мм
3 Количество витков соленоида	570
4 Диаметр провода соленоида	0,8 мм
5 Длину и диаметр стержня измерить штангенциркулем	
6 Объем стержня вычислить как объем цилиндра.	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается причина намагничивания веществ?
2. Как связаны между собой \vec{B} и \vec{H} ?
3. Объясните смысл μ .
4. Дайте определение магнитного момента.
5. Объясните свойства парамагнетиков.
6. Объясните свойства диамагнетиков.
7. Объясните свойства ферромагнетиков.
8. Расскажите о явлении магнитного гистерезиса.
9. Объясните особенности намагничивания ферромагнетиков на основании их внутреннего строения.
10. Почему график зависимости α от I имеет такой же вид, как и график зависимости B от H ?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3т., Т. 2. – СПб.: Лань, 2007. -336 с.
2. Трофимова Г.И. Курс физики. – М.: Академия, 2007. – 558 с.
3. Детлаф А.А Курс физики: учеб. Пособие / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский / - М. Академия, 2005. – 720 с.

Учебное издание

СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Методические указания

Составитель: Каранчук Дмитрий Ярославович

Редактор Т. Л. Бажанова

Технический редактор А. А. Щербакова

Подписано в печать	Формат 60x84- IV16
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная.	
Усл. печ. л.	Уч.-изд. л.
Тираж	Заказ

Учреждение образования
«Могилевский государственный университет продовольствия».
212027, Могилев, пр-т Шмидта, 3.
ЛИ № 02330/0131913 от 08.02.2007.

Отпечатано на ризографе редакционно-издательского отдела
учреждения образования
«Могилевский государственный университет продовольствия».
212027, Могилев, пр-т Шмидта, 3.
ЛП № 226 от 12.02.2003.

