

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  
МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА  
С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов инженерно-технических специальностей

Минск 2010

УДК 537.226 (076.5)

ББК 22.3я7

О 39

**Составители:** П.Г. Кужир, А.А.Баранов, Н.П. Юркевич

**Рецензенты:** М.А. Князев, Савчук Г.К.

В работе рассматривается явление интерференции на примере колец Ньютона. Приводится вывод формулы для вычисления длины волны монохроматического света по измеренным радиусам колец Ньютона.

© П.Г. Кужир  
А.А.Баранов  
Н.П.Юркевич

составление 2010

**Цель работы:** изучить явление интерференции света и вычислить длину волны монохроматического света по измеренным радиусам колец Ньютона.

**Оборудование и материалы:** лабораторная установка, включающая микроскоп с микрометром, линза и плоскопараллельная пластинка.

## 1. Двойственная природа света

Свет имеет двойственную природу: корпускулярную и волновую.

Корпускулярная природа света проявляется в различных явлениях, например, в явлении фотоэффекта. При этом свет представляет собой поток частиц или квантов света, которые называются **фотонами**. К корпускулярным свойствам света относятся

- **энергия** фотона  $E = h\nu$ ,
- **масса** фотона  $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$ ;
- **импульс** фотона  $p = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ ,

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж/с – постоянная Планка;

$\nu$  – частота света;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны;

- **масса покоя** фотона, которая равна нулю.

Волновая природа света проявляется в явлениях интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии. При этом свет представляет собой поток электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются **поперечными**. В электромагнитной волне напряженности электрического  $\vec{E}$ , магнитного

$\vec{H}$  поля и вектор  $\vec{v}$  скорости распространения волны взаимно перпендикулярны и образуют правую тройку векторов (рис.1). Вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  колеблются в одной фазе – они одновременно достигают максимальных значений и одновременно обращаются в нуль.

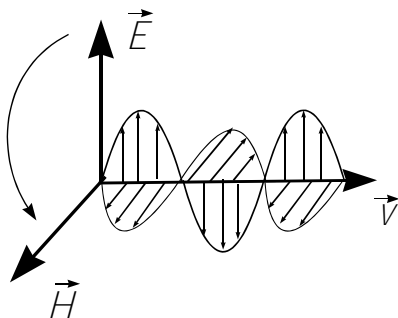


Рис. 1. Расположение векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{v}$  электромагнитной волны

### Монохроматической

называется волна, у которой проекции векторов напряженностей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей на оси прямоугольной декартовой системы координат совершают гармонические колебания с постоянной частотой  $\nu$ . Данная частота  $\nu$  называется частотой волны.

Уравнения колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  монохроматической электромагнитной волны имеют вид

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{s}{v}\right) + \alpha_0\right),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{s}{v}\right) + \alpha_0\right),$$

где  $\vec{E}_0$ ,  $\vec{H}_0$  – амплитуды колебаний векторов напряженностей электрического и магнитного полей;

$\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота;

$\left( \omega \left( t - \frac{s}{v} \right) + \alpha_0 \right)$  – фаза колебаний;

$\alpha_0$  – начальная фаза колебаний;

$t$  – время;

$s$  – расстояние от источника волны до данной точки пространства;

$v$  – скорость распространения электромагнитной волны в среде.

Связь скорости распространения волны в среде  $v$  со скоростью распространения волны в вакууме  $c$  устанавливается соотношением

$$v = \frac{c}{n},$$

где  $n$  – абсолютный показатель преломления среды.

При переходе из одной среды в другую **частота** электромагнитной волны **остается постоянной**, а скорость распространения и длина волны изменяются.

Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии. **Интенсивностью электромагнитной волны** / называется величина, численно равная энергии, которую переносит волна за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Интенсивность волны / пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}_0$  :

$$I \sim E_0^2. \quad (1)$$

Волновой характеристикой электромагнитных волн является длина волны  $\lambda$ . В зависимости от величины длины волны  $\lambda$  электромагнитные волны образуют так называемую **шкалу электромагнитных волн**, включающую радиоволны (длинные,

средние, короткие, ультракороткие), инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение,  $\gamma$  – излучение. Область видимого света очень мала и лежит в диапазоне  $400 \text{ нм} \leq \lambda \leq 760 \text{ нм}$ . Нижняя граница 400 нм соответствует фиолетовому свету, верхняя 760 нм – красному,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ . Максимум чувствительности глаза достигается для зеленого света, длина волны которого 555 нм. Область видимого света заключена в пределах  $4 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \leq \nu \leq 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

На глаз человека основное действие оказывает вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и поэтому его называют **световым вектором**. В дальнейшем будем рассматривать только световой вектор  $\vec{E}$ .

## 2. Интерференция света. Условия максимума и минимума интерференции

Для электромагнитных волн небольших интенсивностей справедлив принцип суперпозиции волн: **результатирующая напряженность электрического поля при наложении нескольких электромагнитных волн равна векторной сумме напряженностей электрических полей каждой из волн в отдельности.**

Рассмотрим наложение когерентных волн, мощными источниками которых являются лазеры. **Когерентными** называются волны, у которых частоты равны и разность фаз с течением времени остается постоянной. При наложении когерентных волн наблюдается явление интерференции.

**Интерференция света** – это явление перераспределения световой энергии в пространстве при наложении когерентных волн, приводящее к усилению или ослаблению света в различных точках пространства.

Поскольку световые волны являются поперечными, отчетливая **интерференционная картина** наблюдается лишь для

когерентных волн, у которых колебания светового вектора  $\vec{E}$  совершаются **вдоль одного направления**. **Интерференция не наблюдается** в случае **взаимной перпендикулярности векторов  $\vec{E}$**  накладывающихся волн.

Найдем условия максимума и минимума интерференции двух когерентных волн в заданной точке пространства  $M$ . Волны проходят геометрические пути  $S_1$  и  $S_2$  от источников излучения 1 и 2 (рис. 2) в однородных средах с абсолютными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

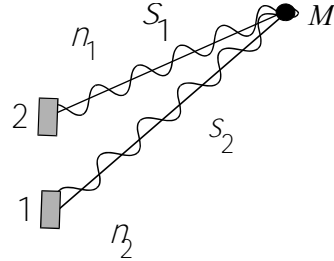


Рис. 2. Интерференция волн в точке  $M$

Уравнения световых волн имеют вид

$$E_1 = E_{01} \cos \left( \omega \left( t - \frac{S_1}{V_1} \right) + \alpha_{01} \right) = E_{01} \cos \varphi_1,$$

$$E_2 = E_{02} \cos \left( \omega \left( t - \frac{S_2}{V_2} \right) + \alpha_{02} \right) = E_{02} \cos \varphi_2.$$

В результате сложения данных волн результирующая волна будет гармонической с такой же циклической частотой  $\omega$  и амплитудой

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2 E_{01} E_{02} \cos \Delta\varphi, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega \left( \frac{S_2}{V_2} - \frac{S_1}{V_1} \right) + (\alpha_{01} - \alpha_{02})$  – разность фаз.

Если  $(\alpha_{01} - \alpha_{02}) = 0$ , то разность фаз  $\Delta\varphi$  будет

$$\Delta\varphi = \omega \left( \frac{S_2}{V_2} - \frac{S_1}{V_1} \right).$$

**Максимум интерференции** наблюдается, если **разность фаз  $\Delta\varphi$  кратна четному числу  $\pi$** :

$$\Delta\varphi = 2\pi m, \quad (3)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$  – порядок интерференционного максимума.

Тогда из (3) с учетом (2) следует **усиление напряженности поля результирующего колебания**:

$$E^2 = (E_{01} + E_{02})^2.$$

Четкую интерференционную картину возможно наблюдать только для небольших значений  $m$ , так как при больших значениях  $m$  происходит наложение максимумов, и интерференционная картина полностью смазывается.

На практике наблюдается интенсивность  $I$  результирующей волны. Поэтому с учетом (1) условие максимума интерференции для интенсивности будет

$$I = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2,$$

где  $I_1, I_2$  – интенсивности исходных световых волн.

**Минимум интерференции** наблюдается, если **разность фаз  $\Delta\varphi$  кратна нечетному числу  $\pi$** :

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi, \quad (4)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$



Тогда из (2) следует **ослабление напряженности поля результирующего колебания**:

$$E^2 = (E_{01} - E_{02})^2,$$

а для **интенсивностей условие минимума** будет

$$I = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2.$$

При сложении некогерентных волн разность фаз  $\Delta\varphi$  хаотически меняется с течением времени,  $\langle \cos \Delta\varphi \rangle = 0$ . Тогда из (2) следует

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2,$$

$$I = I_1 + I_2,$$

т.е. усиление суммарной интенсивности не происходит.

### **3. Оптическая разность хода. Условия максимума и минимума для оптической разности хода**

**Световым лучом** называется линия, вдоль которой распространяется энергия световой волны.

**Оптический путь** светового луча – произведение геометрического пути  $S$  на абсолютный показатель преломления среды  $n$ :

$$l = S n.$$

Для вакуума и воздуха  $n = 1$ , поэтому оптический и геометрический пути светового луча для данных сред совпадают.

**Оптической разностью хода** двух лучей называется величина равная разности их оптических путей:

$$\Delta = S_2 n_2 - S_1 n_1.$$

Получим связь оптической разности хода  $\Delta$  с разностью фаз  $\Delta\varphi$  :

$$\Delta\varphi = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right),$$

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \lambda = \frac{c}{\nu},$$

где  $\lambda$  – длина волны света в вакууме.

Тогда

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\nu}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (s_2 n_2 - s_1 n_1).$$

В результате **связь оптической разности хода  $\Delta$  с разностью фаз  $\Delta\varphi$**  определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}. \quad (5)$$

**Условие максимума интерференции** для оптической разности хода получаем, приравнявая (3) и (5),

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (6)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Таким образом, **интерференционный максимум** наблюдается, если **оптическая разность хода интерферирующих световых волн равна четному числу длин полуволн или целому числу длин волн.**

**Условие минимума интерференции** для оптической разности хода получаем, приравнявая (4) и (5),

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad (7)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Таким образом, **интерференционный минимум наблюдается, если оптическая разность хода интерферирующих световых волн равна нечетному числу длин полуволн или нецелому числу длин волн.**

#### 4. Кольца Ньютона – интерференционные полосы равной толщины

Интерференционную картину в виде колец Ньютона получают с помощью плосковыпуклой линзы большого радиуса кривизны, соприкасающейся выпуклой поверхностью с хорошо отполированной плоскопараллельной пластинкой так, что между ними образуется воздушный клин переменной толщины.

Пусть пучок параллельных монохроматических лучей падает сверху перпендикулярно плоской поверхности линзы (рис. 3).

В точке  $A$  луч частично отражается, а частично проходит в воздушный клин практически вертикально из-за малой кривизны линзы. Отражаясь в точке  $B$ , луч 2 возвращается обратно и интерферирует с лучом 1, отраженным в точке  $A$ . Оптическая разность хода интерферирующих лучей будет

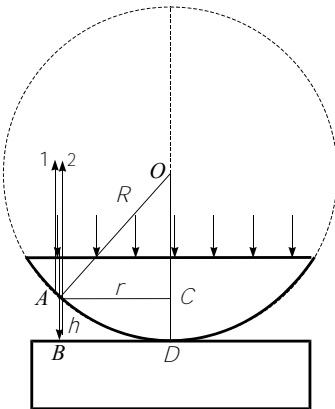


Рис.3. Схема получения колец Ньютона

$$\Delta = 2AB \cdot n + \frac{\lambda}{2}.$$

Прибавление половины длины волны связано с тем, что при отражении волны в точке  $B$  от опти-

чески более плотной среды фаза волны меняется на противоположную (на величину равную  $\pi$ ), в результате чего происходит потеря половины длины волны и возникает добавочная разность хода. Отражение волны в точке  $A$  происходит от оптически менее плотной среды и потому фаза волны не изменяется.

Из двух сред данная среда является оптически более плотной, если ее показатель преломления больше, чем для другой среды.

Так как расстояние  $AB$  соответствует толщине воздушной прослойки  $h$ , то

$$\Delta = 2h \cdot n + \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

Из (7) следует, что **минимум интенсивности** в отраженном свете возникает в тех местах, где оптическая разность хода равна нечетному числу полуволин

$$2h + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{или}$$
$$h = m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

В соответствии с условием (6) для **максимума интенсивности** при наблюдении в отраженном свете толщина воздушной прослойки будет

$$h = (2m-1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (10)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Так как места с одинаковой толщиной  $h$  воздушной прослойки образуют концентрические окружности с центром в точке соприкосновения линзы и пластинки, то интерференци-

онные полосы имеют форму колец (рис.4) и представляют собой **интерференционные полосы равной толщины**.

Полосы равной толщины возникают также от пластинки переменной толщины (клина).

В центре колец в отраженном свете наблюдается темное пятно, потому что геометрическая разность хода в точке соприкосновения линзы и пластинки много меньше длины волны света и лишь теряется  $\frac{\lambda}{2}$  при отражении от пластинки, что согласно (7) и приводит к условию минимума. Темное кольцо окружено системой чередующихся светлых и темных колец, ширина и интенсивность которых постепенно убывает по мере удаления от центрального пятна.

При наблюдении колец Ньютона в проходящем свете потери полуволны на пластинке не происходит, условия максимума и минимума соответствуют условиям минимума и максимума в отраженном свете. Наблюдается следующая картина: центральное пятно светлое, следующее кольцо темное и т.д.

Если наблюдения проводятся в белом свете, то появляется система окрашенных (радужных) колец, так как каждому значению длины волны  $\lambda$  соответствует своя толщина воздушной прослойки и свой радиус кольца, причем каждое

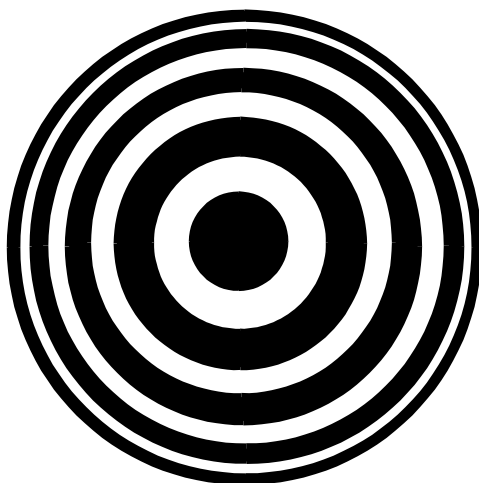


Рис. 4. Кольца Ньютона

кольцо начинается от центра фиолетовым и заканчивается красным цветом.

В приведенных рассуждениях пренебрегали влиянием света, отражающегося от верхней плоской поверхности линзы и нижней поверхности пластинки, потому что толщина центральной части линзы и пластинки намного порядков больше толщины воздушного зазора вблизи точки  $D$ . Поэтому разность хода между световыми волнами, отражающимися от верхней и нижней поверхностей линзы и пластинки столь велики, что интерференция этих волн практически невозможна.

Рассматриваемые кольцевые интерференционные полосы впервые наблюдались в середине 18 века Р.Гуком (1635-1703). И.Ньютон (1643-1727) установил связь между радиусом колец и радиусом кривизны линзы. В 19 веке Т.Юнг (1773-1829) объяснил природу этих колец, называемых теперь кольцами Ньютона, и использовал их для определения длины волны интерферирующего света.

Описанная выше установка представляет собой простейший интерферометр. Правильная форма колец Ньютона легко искажается даже при незначительных дефектах (размером  $\sim \lambda/2$ ) обработки выпуклой поверхности линзы и верхней поверхности пластинки. Поэтому наблюдение формы колец Ньютона позволяет быстро и точно контролировать качество шлифовки плоских пластин и линз.

## **5. Определение длины волны монохроматического света по измерениям радиусов колец Ньютона в отраженном свете**

Найдем связь длины волны  $\lambda$ , радиуса  $r$  кольца Ньютона и радиуса кривизны  $R$  линзы.

Рассмотрим прямоугольный треугольник  $AOC$  (рис. 3), где  $AO = R$  – радиус кривизны линзы,  $AC = BD = r$  – радиус кольца,  $AB = h$  – толщина воздушной прослойки.

По теореме Пифагора имеем:

$$r^2 = R^2 - (R - h)^2 = 2Rh - h^2.$$

Так как по условию  $h \ll R$ , то  $h^2 \ll 2Rh$  и формула приобретает вид

$$r^2 = 2Rh.$$

Тогда выражение для квадрата радиуса  $m$ -го **темного** кольца (минимум) с учетом (9) для  $h$  примет вид

$$r_m^2 = 2R \cdot \frac{m\lambda}{2} = mR\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

**Радиус  $n$ -го темного кольца будет**

$$r_n^2 = nR\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

С учетом (10) аналогично получаем выражение для вычисления **радиуса светлых колец**

$$r_m^2 = R(2m-1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

Формулы (11) и (12) позволяют найти длины волн монохроматического света по измеренным радиусам темных колец Ньютона и известному радиусу кривизны линзы  $R$ .

Алгоритм вычисления удобно представить в виде

$$\lambda = \frac{r_n^2 - r_m^2}{(n - m)R}$$

или

$$\lambda = \frac{(r_n - r_m)(r_n + r_m)}{(n - m)R}. \quad (14)$$

Легко получить из формулы (13) аналогичное выражение для светлых колец.

Поскольку в лабораторной работе диаметры колец  $d$  измеряются в делениях шкалы окулярного микрометра с ценой деления  $k$ , то правую часть соотношения (14) надо умножить на  $k^2$ .

Окончательно **рабочая формула для расчета длины волны монохроматического света по измеренным диаметрам темных колец Ньютона в отраженном свете примет вид**

$$\lambda = \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)k^2}{4(n - m)R}. \quad (15)$$

При измерениях диаметров темных колец **для уменьшения ошибки**, обусловленной мертвым ходом червячного механизма, необходимо производить наведение двойной нити микрометра на темное кольцо путем **ввинчивания барабанчика винта микрометра**.

С целью уменьшения погрешности при вычислениях в формуле (15) **следует брать диаметры колец удаленных друг от друга**, т.е.  $n - m \geq 4$ .

Радиус кривизны линзы  $R$  либо приводится в паспорте прибора завода-изготовителя, либо очень точно измеряется с по-



мощью сферометра [7], причем относительная погрешность  $\varepsilon_R < 0,01\%$ .

## 6. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить инструкцию на рабочем месте.
2. Измерить диаметры темных колец Ньютона в отраженном свете.
3. Вычислить длину волны света, ее абсолютную и относительную погрешности.

## 7. Контрольные вопросы

1. Что такое свет и в чём состоит его двойственная природа? Назовите корпускулярные и волновые свойства света.
2. Записать уравнения электромагнитной волны и указать смысл входящих в них величин.
3. Почему вектор напряжённости электрического поля называют световым вектором?
4. Что такое интерференция света?
5. Какие волны называются когерентными; монохроматическими? Почему монохромность света есть необходимое, но недостаточное условие когерентности волн?
6. Почему интерференция волн отчётливо наблюдается, только если колебания векторов  $\vec{E}$  двух волн происходят вдоль одного направления?
7. Что называется геометрической и оптической разностью хода световых лучей?
8. Как меняется фаза и оптическая длина пути при отражении света от оптически более плотной среды?

9. Записать условия максимума и минимума интенсивности света (освещённости) при интерференции для разности фаз и оптической разности хода.

10. Вывести рабочую формулу для определения длины монохроматической световой волны с помощью колец Ньютона.

11. Почему в центре интерференционной картины появляется тёмное пятно при наблюдении колец Ньютона в отраженном свете?

12. Как изменится интерференционная картина при наблюдении колец Ньютона в проходящем свете?

13. Какой вид приобретают кольца Ньютона при наблюдении в белом свете:

14. Что произойдёт с кольцами Ньютона, если вместо воздушной прослойки между линзой и плоскопараллельной пластинкой буде среда с другим показателем преломления?

15. Почему не рассматривается интерференция волн, отражённых от нижней поверхности пластинки и верхней поверхности линзы?

16. Почему кольца Ньютона сгущаются с ростом номера кольца?

## Литература

1. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона: учебно-методические указания / авт.-сост.: В.А. Самойлюкович, Ж.С. Тижовка. – Минск, 1985.
2. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 1979.
3. Калитеевский, Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитеевский. – М., 1978.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М., 1985.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Методические указания к лабораторной работе

Составители:

КУЖИР Павел Григорьевич  
БАРАНОВ Артур Александрович  
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна

Редактор

---

Подписано в печать.

Формат 60×84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100. Заказ .

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия 02330.0056975 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Ф. Скорины, 65.