

УДК 535.42

Проектирование многопорядковых интраокулярных линз

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина

Поступила 12.03.2015

Принята к печати 23.10.2015

Интраокулярные линзы (ИОЛ) используются для замены натурального хрусталика глаза. Клинически используется несколько стандартных конструкций ИОЛ. Многопорядковые дифракционные линзы (МПДЛ), которые работают в нескольких дифракционных порядках, были предложены для уменьшения хроматической аберрации. Анализ свойств МПДЛ показал перспективу их использования для разработки новых конструкций ИОЛ. Целью данной статьи являлась разработка нового метода проектирования многопорядковых интраокулярных линз с уменьшенной хроматической аберрацией. Проводилось теоретическое исследование свойств МПДЛ. Исследована зависимость дифракционной эффективности от длины волны. Проведено компьютерное моделирование МПДЛ в схематической модели человеческого глаза. Установлена способность многопорядковой дифракционной линзы фокусировать с высокой эффективностью полихроматический свет в отрезок. В каждой точке на отрезке присутствует составляющая каждого спектрального диапазона, которые в комбинации будут строить цветное изображение. Предложен метод проектирования интраокулярных линз с уменьшенным хроматизмом и бесконечной глубиной аккомодации. Смоделирована оптическая система глаза с интраокулярной линзой, которая обеспечивает резкое видение объектов, расположенных на расстоянии от 700 мм до бесконечности.

Ключевые слова: многопорядковая интраокулярная линза, дифракционная эффективность, бесконечная глубина аккомодации.

Адрес для переписки:

Кучугура И.О.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Address for correspondence:

Kuchugura I.O.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Для цитирования:

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.

Проектирование многопорядковых интраокулярных линз
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 204–210

For citation:

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.

Design of the multiorder intraocular lenses
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 204–210

Введение

Имплантация искусственных хрусталиков глаза – интраокулярных линз (ИОЛ) – является эффективным решением ряда проблем, связанных с нарушениями зрения – от замены помутневшего из-за катаракты естественного хрусталика глаза и до коррекции возрастной дальнозоркости. Ежегодно в мире проводится около 3 млн операций по имплантации ИОЛ [1].

Существует несколько стандартных вариантов конструкций ИОЛ [1–3]. Рефракционные ИОЛ являются монофокальными, при их использовании теряется естественная аккомодация глаза и появляется необходимость дополнительной коррекции очками. Для достижения мультифокальности на одну из поверхностей рефракционной линзы наносят дифракционную линзу (ДЛ), такие линзы называются дифракционно-рефракционными. Чаще всего их проектируют бифокальными или трифокальными. К сожалению, использование только стандартных конструкций линз ограничивает разработчика, поскольку каждая из вариаций дифракционного профиля имеет свои уникальные оптические характеристики. По нашему мнению, перспективным направлением является использование многопорядковых дифракционных линз.

Для создания ДЛ изображения объекта, находящегося на некотором расстоянии, обычно используют один дифракционный порядок [2]. Основным недостатком таких линз является значительный хроматизм. В отличие от обычных ДЛ многопорядковые имеют увеличенную в p раз толщину, что делает возможным работу в высших дифракционных порядках. Эти линзы способны создавать ахроматические изображения в широком спектральном диапазоне [4–5]. В перечисленных работах не проведены исследования, связанные с принципами формирования полихроматического изображения МПДЛ как важного аспекта их разработки.

Известны примеры использования МПДЛ в некоторых областях техники [6–9], но для применения в качестве ИОЛ они почти не рассматривались. В работе [10] рассмотрена ИОЛ в виде чисто многопорядковой линзы с большим значением $p = 20$, но в результате исследования авторы выяснили, что в этом случае хроматические aberrации линз в модели глаза соизмеримы с такими же aberrациями рефракционных ИОЛ. В свою очередь, наименьшими aberrациями об-

ладают дифракционно-рефракционные линзы. Для того, чтобы использовать уникальные свойства МПДЛ, можно модернизировать стандартную конструкцию ИОЛ путем нанесения рельефа МПДЛ вместо обычной дифракционной. Представленная идея также не была реализована предшественниками.

Целью данной статьи являлась разработка нового метода проектирования многопорядковых интраокулярных линз с уменьшенной хроматической aberrацией.

Расчетные формулы

Фокусное расстояние МПДЛ зависит от дифракционного порядка. Такая линза имеет бесконечное количество фокусных расстояний f_N , которые рассчитываются по формуле:

$$f_N = \frac{pf_0\lambda_0}{N\lambda}, \quad (1)$$

где f_0 – фокусное расстояние для расчетной длины волны λ_0 ; N – рабочий порядок дифракции; $\lambda \neq \lambda_0$; p – расчетный параметр. Из уравнения (1) следует, что при $p\lambda_0/N\lambda = 1$ несколько длин волн из заданного диапазона фокусируются в общей точке с высокой дифракционной эффективностью. В этом состоит главная особенность МПДЛ.

Дифракционная эффективность (ДЭ) МПДЛ для N -го порядка дифракции в фокальных точках имеет вид [7]:

$$\eta_N = \text{sinc}^2(\alpha\mu p - N), \quad (2)$$

где α – параметр, определяемый долей фазовой задержки 2π для длин волн, отличных от расчетной

$\lambda \neq \lambda_0$, задается выражением $\alpha = \frac{\lambda_0[n(\lambda)-1]}{\lambda[n(\lambda_0)-1]}$, где $n(\lambda)$ – показатель преломления линзы; μ – коэффициент толщины микрорельефа, рассчитываемый по формуле $\mu = t'/t$, где t' и t – реальная и расчетная толщины профиля соответственно.

Исследование формирования полихроматического изображения

Анализ выражений (1) и (2) дает основания для следующих выводов. Коэффициент μ не влияет на положения фокусов f_N , но изменяет распределение энергии в этих точках. Зависимость характеристик ДЛ от коэффициента μ детально

рассматривались в статье [11], поэтому примем $\mu = 1$. При увеличении параметра p увеличивается количество длин волн, удовлетворяющих условию максимума. Основным будем считать максимум на длине волны λ_0 при котором $p = N$. Таким образом, задавая значение параметра p , устанавливается и основной рабочий порядок. Основная задача данной работы заключалась в получении безаберрационного изображения, состоящего из комбинации трех различных длин волн – красной, зеленой и синей. Данное условие наилучшим образом выполняется для значения $p = 6$.

Рассмотрим зависимость ДЭ от длины волны $\eta(\lambda)$ при значениях $p = 6$, $N = \{5, 6, 7\}$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4...0,7$ мкм (рисунок 1). Для некоторых длин волн линза создает высокоэффективное изображение (ДЭ = 100 %). Согласно свойству МПДЛ величины соответствующих длин волн получены из формулы (1) для заданного фокусного расстояния $f_N = 74,8$ мкм при условии, что $f_N = f_0$ для расчетной длины волны $\lambda_0 = 0,525$ мкм. В результате получен набор длин волн для разных дифракционных порядков N : для 5-го порядка $\lambda_5 = 0,63$ мкм; для 6-го – $\lambda_6 = 0,525$ мкм; для 7-го – $\lambda_7 = 0,45$ мкм.

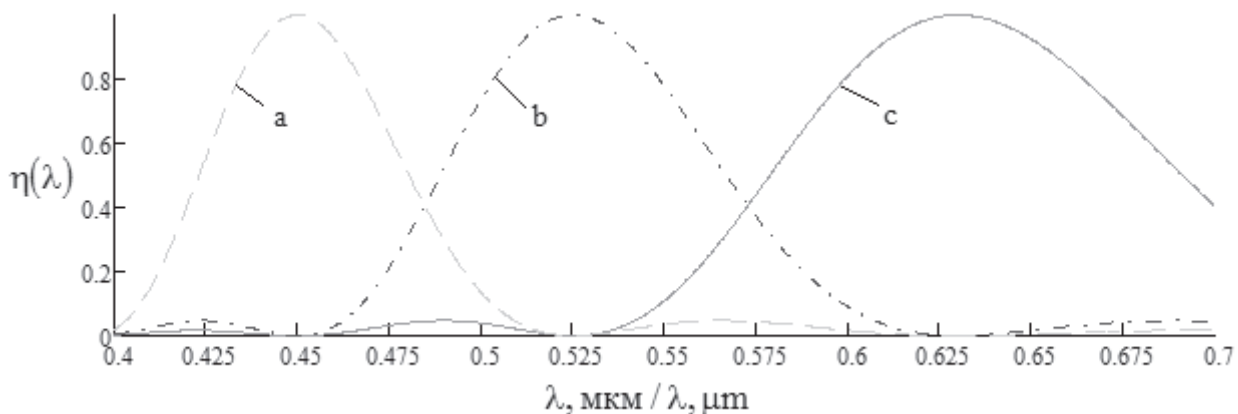


Рисунок 1 – Зависимость дифракционной эффективности от длины волны λ : $a - N = 7$; $b - N = 6$; $c - N = 5$

Figure 1 – The diffractive efficiency dependence with the change of wavelength λ : $a - N = 7$; $b - N = 6$; $c - N = 5$

Данная линза способна работать также как бифокальная (ДЭ в каждом порядке составляет 40,5 %). Исходя из формулы ДЭ (2) в соседних порядках N , $N+1$ длины волн определяются по формуле:

$$\lambda = \frac{2\lambda_0 \mu p}{2N+1}. \quad (3)$$

Используя выражения (1) и (3), можно рассчитать соответствующие значения длин волн и фокусных точек. Например, для длины волны $\lambda = 0,485$ мкм ближняя и дальняя фокусные точки будут находиться на расстояниях $f_{бл} = 69,46$ мм, $f_{д} = 81,03$ мм.

Детально проанализировано поведение света с другими длинами волн при прохождении через линзу такого типа. Спектральный диапазон был разделен на условные отрезки, отвечающие следующим спектрам света: a – синий $\lambda_c = 0,420...0,485$ мкм; b – зеленый $\lambda_3 = 0,485...0,573$ мкм; c – красный $\lambda_k = 0,573...0,700$ мкм.

Независимо от номера порядка дифракции свет с длиной волны из каждого диапазона фокусируется в отрезки на оптической оси, которые перекрываются и имеют общую часть. Рисунок 2, построенный на основании выражений (1) и (2), дает объяснение, с какой ДЭ свет из каждого диапазона фокусируется в отрезке вдоль оптической оси. На данном этапе был проанализирован свет с ДЭ больше 40 %. Как показали исследования, рассчитанная МПДЛ фокусирует белый свет в отрезок длиной ≈ 15 мм. В каждой точке на отрезке присутствует составляющая каждого спектрального диапазона, которые в комбинации будут строить цветное изображение. Это свойство можно использовать при проектировании интраокулярных линз для замещения естественного хрусталика глаза человека, чтобы сделать менее заметным эффект наличия цветного ореола вокруг изображения.

Для определения коэффициента дисперсии МПДЛ использовано выражение $v_\lambda = \phi/\Delta\phi$, где ϕ – оптическая сила линзы для центральной длины волны; $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$, ϕ_1 – оптическая сила линзы

для короткой длины волны, φ_2 – для длинной. При выражении фокусного расстояния через (1) и определении центральной λ_3 , короткой λ_c и длинной λ_k длины волн заданного спектрального диапазона коэффициент дисперсии МПДЛ записывается в виде:

$$\nu_\lambda = \frac{N_3 \lambda_3}{N_c \lambda_c - N_k \lambda_k}. \quad (4)$$

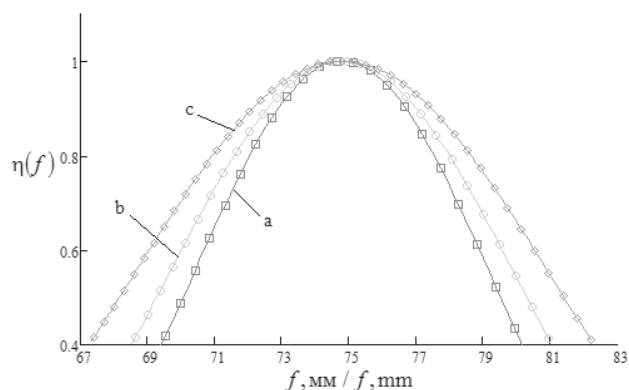


Рисунок 2 – Распределение света из заданных спектральных диапазонов вдоль оптической оси: *a* – синий $N_c = 7$; *b* – зеленый $N_3 = 6$; *c* – красный $N_k = 5$

Figure 2 – The light distribution of the specified spectral ranges along the optical axis: *a* – blue $N_b = 7$; *b* – green $N_g = 6$; *c* – red $N_r = 5$

Проведена оценка хроматизма рассмотренной МПДЛ в видимом диапазоне, для которой $N_c = 7$, $N_3 = 6$, $N_k = 5$. Согласно рисунку 2 наибольший хроматизм имеют изображения в плоскостях ближней и дальней фокусных точек, где рассматривается свет с длинами волн $\lambda_c = 0,485$ мкм, $\lambda_3 = 0,573$ мкм, $\lambda_k = 0,700$ мкм и $\lambda_c = 0,420$ мкм, $\lambda_3 = 0,485$ мкм, $\lambda_k = 0,573$ мкм соответственно. В случае ближней точки коэффициент дисперсии (4) составляет $\nu_{\text{бл}} = -32,74$, а для дальней – $\nu_{\text{д}} = 38,8$.

Как известно, для видимого диапазона коэффициент дисперсии обычной ДЛ составляет примерно $-3,5$ [2]. Таким образом, хроматизм МПДЛ на порядок меньше, чем у обычной ДЛ.

В результате исследования свойств МПДЛ выявлено, что кроме формирования качественного цветного изображения, такие линзы имеют также бесконечную аккомодацию. МПДЛ фокусируют свет в отрезок, ограниченный двумя фокусными точками – ближней $F_{\text{бл}}$ и дальней $F_{\text{д}}$. Принцип проектирования таких линз состоит в том, чтобы изображение предмета в бесконечности размещалось в дальней фокусной точке $F_{\text{д}}$, а в случае, когда предмет находится на некотором расстоянии a от

линзы, его изображение наблюдалось в ближней фокусной точке $F_{\text{бл}}$. Изображения промежуточных предметов размещаются в пределах отрезка $F_{\text{д}} F_{\text{бл}}$. Таким образом, формируются изображения предметов, находящихся на расстоянии от a и до бесконечности.

Метод проектирования многопорядковых дифракционных линз

На основании приведенных выше выкладок предложен метод проектирования интраокулярных МПДЛ. Была спроектирована линза со следующими параметрами: фокусное расстояние в воздухе $f = 100$ мм, $p = 6$, материал ПММА, расчетная длина волны $\lambda_0 = 0,525$ мкм. В пределах светового диаметра линзы $D = 7$ мм размещается 19 дифракционных зон, а максимальная глубина канавки составляет 6 мкм. В качестве основы для проектирования взята рефракционно-дифракционная ИОЛ, первая поверхность которой сферическая, а на вторую, плоскую, нанесен рельеф рассчитанной МПДЛ. Спроектированная гибридная ИОЛ была помещена в схематическую модель глаза человека по Гульстранду [12] на место естественного хрусталика (рисунок 3).

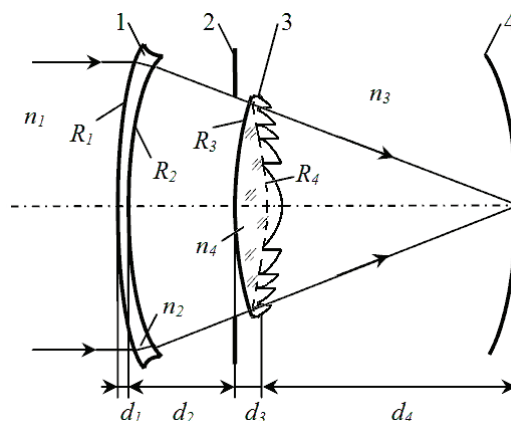


Рисунок 3 – Схематическая модель глаза: 1 – роговица; 2 – зрачок; 3 – интраокулярная линза; 4 – сетчатка

Figure 2 – The schematic eye model: 1 – cornea; 2 – pupil; 3 – intraocular lens; 4 – retina

Конструктивные параметры оптической системы представлены в таблице.

Моделирование производилось в программной среде ZEMAX. В соответствии с пояснениями из предыдущего раздела с использованием положения дальней точки $F_{\text{д}}$ бифокальной линзы, рассчитанной ранее при условии размещения предмета в бесконеч-

Таблица / Table

Параметры модели глаза с дифракционной линзой
Parameters of eye model with diffractive lens

Показатель преломления Refractive index	Радиус кривизны поверхности, мм Surface curvature radius, mm	Расстояние между поверхностями, мм Distance between components, mm
$n_1 = 1$	$R_1 = 7,7$	$d_1 = 0,5$
$n_2 = 1,38$	$R_2 = 6,8$	$d_2 = 3,1$
$n_3 = 1,34$	$R_3 = 10,91$	$d_3 = 3,6$
$n_4 = 1,49$	$R_4 = \infty$	$d_4 = 15$

ности, определялась кривизна рефракционной части ДЛ ($R_3 = 10,91$ мм). С учетом положения ближней фокусной точки $F_{\text{бл}}$ было определено, что расстояние к ближнему объекту составляет ≈ 700 мм. Таким образом, оптическая система «глаз + ИОЛ» обеспечивает четкое изображение объектов, расположенных на расстоянии от 700 мм до бесконечности.

Заключение

Установлено свойство многопорядковых линз фокусировать белый свет в отрезок на оптической оси. На основании этой способности предложен метод проектирования многопорядковых линз в качестве интраокулярных с уменьшенными хроматическими aberrациями. Подбором расчетного параметра p достигается присутствие в каждой точке отрезка трех цветных составляющих видимого света, обеспечивая полноценное изображение. С помощью предложенного выражения для коэффициента дисперсии многопорядковой дифракционной линзы показано, что ее хроматизм на порядок меньше, чем у обычных дифракционных линз. Рассмотренный подход к проектированию таких линз позволяет создавать интраокулярные линзы с бесконечной глубиной аккомодации, что обеспечивает четкое видение предметов, расположенных на некотором расстоянии a от наблюдателя и до бесконечности.

Список использованных источников

1. Коронкевич, В.П. Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных линз / В.П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А.Г. Полещук и др. // Компьютерная оптика. – 2008. – № 1. – Т. 32. – С. 50–58.

2. Колобродов, В.Г. Прикладная дифракционная оптика / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик. – К. : НТУУ «КПИ», 2014. – 312 с.
3. Vega, F. Energy Efficiency Of A New Trifocal Intraocular Lens / F. Vega, F. Alba-Bueno, M.S. Millan // Journal Of The European Optical Society – Rapid Publications. – 2014. – Vol. 9. – P. 140021–140028.
4. Faklis, D. Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, G. M. Morris // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34, No. 14. – P. 2462–2468.
5. Sweeney, D.W. Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34, No. 14. – P. 2469–2475.
6. Chang-Jiang, F. Design of infrared telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element / F. Chang-Jiang [et al.] // Chin. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 24, No.7. – P. 1973–1976.
7. Lou, D. Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum / D. Lou, J. Bai, X. Hou, G. Yang // Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II. – 2005. – Vol. 5636. – P. 78–85.
8. Reichelt, S. Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays / S. Reichelt, H. Sahm, N. Leister, A. Schwerdtner // Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications. – 2008. – Vol. 6912. – P. 69120–69130.
9. Qiang, S. Study of an athermal infrared dual optical system design containing harmonic diffractive element / S. Qiang [et al.] // Chinese Science Bulletin. – 2003. – Vol. 48, No. 12, P. 1193–1198.
10. Lenkova, G.A. Chromatic Aberrations of Diffractive-Refractive Intraocular Lenses in an Eye Model / G.A. Lenkova // Optoelectr., Instrum. Data Process. – 2009. – Vol. 45, No. 2. – P. 171–183.
11. Колобродов, В.Г. Проектирование многопорядковых дифракционных линз / В.Г. Колобродов, Е.О. Кучугура, И.О. Кучугура // Научные вести НТУУ «КПИ». – 2015. – №2. м С. 82–88.
12. Сокурено, В. М. Глаз человека и офтальмологические приборы: / В.М. Сокурено, Г.С. Тымчик, И.Г. Чиж. – К.: НТУУ «КПИ», 2009. – 264 с.

Design of the multiorder intraocular lenses

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»,
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine

Received 12.03.2015

Accepted for publication 23.10.2015

Abstract. Intraocular lenses (IOLs) are used to replace the natural crystalline lens of the eye. Just few basic designs of IOLs are used clinically. Multiorder diffractive lenses (MODL) which operate simultaneously in several diffractive orders were proposed to decrease the chromatic aberration. Properties analysis of MODL showed a possibility to use them to develop new designs of IOLs. The purpose of this paper was to develop a new method of designing of multiorder intraocular lenses with decreased chromatic aberration. The theoretical research of the lens properties was carried out. The diffraction efficiency dependence with the change of wavelength was studied. A computer simulation of MODL in a schematic model of the human eye was carried out. It is found the capability of the multiorder diffractive lenses to focus polychromatic light into a segment on the optical axis with high diffraction efficiency. At each point of the segment is present each component of the spectral range, which will build a color image in combination. The paper describes the new design method of intraocular lenses with reduced chromaticism and with endless adaptation. An optical system of an eye with an intraocular lens that provides sharp vision of objects located at a distance of 700 mm to infinity is modeled.

Keywords: multiorder intraocular lens, diffraction efficiency, endless adaptation.

Адрес для переписки:

Кучугура И.О.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Address for correspondence:

Kuchugura I.O.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Для цитирования:

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.
Проектирование многопорядковых интраокулярных линз
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 204–210

For citation:

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.
Design of the multiorder intraocular lenses
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 204–210

References

1. Koronkevich V.P., Lenkova G.A., Korol'kov A.G., Poleschuk A.G. and other. New generation of bifocal diffractive-refractive lenses. *Kompyuternaya optika*, 2008, vol. 32, no. 1, pp. 50–58.
2. Kolobrodov V.G., Tymchik G.S. *Prikladnaya difraktsionnaya optika* [Applied diffractive optics]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2014, 312 p. (in Ukrainian).
3. Vega F., Alba-Bueno F., Millan M.S. Energy Efficiency Of A New Trifocal Intraocular Lens. *Journal Of The European Optical Society – Rapid Publications*, 2014, Vol. 9, pp. 140021–140028.
4. Faklis D., Morris G. M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1995, Vol. 34, No. 14, pp. 2462–2468.
5. Sweeney D.W., Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1995, Vol. 34, No. 14, pp. 2469–2475.
6. Chang-Jiang F., Zhao-Qi W., Lie L. Mei Z., Hai-Ying F. Design of infrared telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, Vol. 24, No.7, pp. 1973–1976.
7. Lou D., Bai J., Hou X., Yang G. Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum. *Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II*, 2005, Vol. 5636, pp. 78–85.
8. Reichelt S., Sahm H., Leister N., Schwerdtner A. Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays. *Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications*, 2008, Vol. 6912, pp. 69120–69130.
9. Qiang S., Zhaoqi W., Fengyou L., Hongli L. and other. Study of an athermal infrared dual optical system design containing harmonic diffractive element. *Chinese Science Bulletin*, 2003, Vol. 48, No. 12, pp. 1193–1198.
10. Lenkova G.A. Chromatic Aberrations of Diffractive-Refractive Intraocular Lenses in an Eye Model. *Optoelectr., Instrum. Data Process.*, 2009, Vol. 45, No. 2, pp. 171–183.
11. Kolobrodov V.G., Kuchugura Ie.O., Kuchugura I.O. *Projektirovaniye mnogoporjadkovykh difrakcionnykh linz* [Design of multiorder diffractive lenses]. *Research Bulletin of NTUU «KPI»*, 2015, No. 2, pp. 82–88 (in Ukrainian).
12. Sokurenko V.M., Tymchik G.S., Chyzh I.H. *Glaz cheloveka i oftal'mologicheskije pribory* [The human eye and ophthalmic devices]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2009, 264 p. (in Ukrainian).