

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.317; 681.7

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-552-557>

Поступило в редакцию 29.07.2021

Received 29.07.2021

Н. К. Артюхина*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь***МАТЕМАТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ БАЗОВЫХ МОДЕЛЕЙ
НЕЦЕНТРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ
ИЗ УСЛОВИЙ КОРРЕКЦИИ КОМЫ И АСТИГМАТИЗМА***(Представлено членом-корреспондентом С. А. Тихомировым)*

Аннотация. Серьезный недостаток зеркальной оптики – центральное экранирование, которое ухудшает качество изображения. Для его устранения вводят повороты или смещения зеркал, но при этом возникают неэлементарные аберрации четных порядков, которые необходимо корригировать. Создание композиций с нецентрированными катоптрическими элементами требует дальнейшего развития расчетно-методической базы. Получены точные формулы расчета для действительных лучей из условий коррекции астигматизма и комы для заданных углов падения главного луча на поверхности зеркал и «косой» толщины \tilde{d} , определяющей их взаимное расположение. На основании предложенных формул создана новая методика параметрического расчета нецентрированных зеркальных систем, которая позволяет составлять алгоритмы и проектировать как базовые модели, так и сложные зеркальные системы из внеосевых зеркал. Создание новых алгоритмов двух- и трехзеркальных нецентрированных объективов позволит увеличить накопленный потенциал вычислительной оптики. Область применения предложенной методики можно расширить по количеству компонентов.

Ключевые слова: оплотехника, объектив, нецентрированные зеркальные системы, коррекция аберраций, качество изображения

Для цитирования. Артюхина, Н. К. Математические решения задачи создания базовых моделей нецентрированных оптических зеркальных систем из условий коррекции комы и астигматизма / Н. К. Артюхина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 552–557. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-552-557>

Nina K. Artioukhina*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus***MATHEMATICAL SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF CREATING BASIC DECENTER OPTICAL
MIRROR MODELS FROM THE COMA AND ASTIGMATISM CORRECTION CONDITIONS***(Communicated by Corresponding Member Sergey A. Tikhomirov)*

Abstract. A serious drawback of reflective optics is a center without central screening that degrades the image quality. To eliminate it, rotations or displacements of mirrors are introduced, but there appear even-order non-elementary aberrations that must be corrected. The creation of compositions with decentered catoptric elements requires further development of the calculation and methodological base. The exact formulas are obtained for calculation of real rays from the astigmatism and coma correction conditions for the given angles of incidence of the main ray on the mirror surfaces and the “oblique” thickness \tilde{d} , that determines their mutual position. Based on the proposed formulas, a new method for parametric calculation of decentered mirror systems has been created, which allows one to compose algorithms and to design both basic models and complex mirror systems from off-axis mirrors. The development of new algorithms for two- and three-mirror off-center lenses will increase the accumulated potential of computational optics. The scope of the proposed technique can be expanded in terms of the number of components.

Keywords: calculation optics, the objective, mirror systems, aberration correction, image quality

For citation. Artioukhina N. K. Mathematical solutions to the problem of creating basic decenter optical mirror models from the coma and astigmatism correction conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 552–557 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-552-557>

Введение. Общеизвестные достоинства зеркальных систем – отсутствие хроматических аберраций, ограничений на апертуры, селективной непрозрачности при высоком разрешении в широком спектральном диапазоне, а также небольшие осевые габариты, выигрыш по весу и экономичность материалов.

Зеркальные системы постоянно совершенствуются и активно используются в астрономической оптике, оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли из космоса и ряде других приложений; им предъявляются все более высокие требования [1; 2]. Известны различные схемы и концепции создания зеркальных схем.

В [3] дан анализ децентрированных двухзеркальных систем, рассмотрены виды композиций: работающие внеосевым полем; имеющие децентрировку входного зрачка или децентрировку компонентов. Наибольшую известность как базовые получили внеосевые схемы Кассегрена и Камишеля [4].

Недостатком осесимметричных зеркальных систем является центральное экранирование, которое уменьшает количество света, контраст в плоскости изображения, изменяет распределение энергии в дифракционном пятне и увеличивает рассеяние света [5]. Для его устранения вводят повороты или смещения зеркал, но при этом возникают неэлементарные аберрации четных порядков.

В «кособоких» системах или схемах с сохранением одной плоскости симметрии (центры кривизны поверхностей находятся в одной плоскости) наклоны зеркал решают задачу разделения отраженных и падающих пучков лучей, но такое построение вызывает появление нецентрированных аберраций, астигматизма I и II порядков, комы II порядка [6; 7], которые необходимо корригировать.

Проектирование в области нецентрированных зеркальных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерной оптимизации. Созданы многозеркальные системы без экранирования, которые обладают высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения [8]. Разработка новых алгоритмов моделирования нецентрированных зеркальных систем позволяет увеличивать накопленный потенциал в области вычислительной оптики.

Цель работы – разработка алгоритма расчета двухзеркального нецентрированного объектива из условий коррекции комы и астигматизма. Рассмотрена базовая простейшая система, состоящая из двух сферических зеркал, на оси которой возникают аберрации астигматизма и комы (рисунок).

Величину астигматизма I порядка удобно определить, воспользовавшись меридиональным и сагиттальным инвариантами Аббе–Юнга [9], которые для отражающей поверхности с учетом того, что $\varepsilon = -\varepsilon'$; $\cos \varepsilon' = \cos \varepsilon$ выражаются формулами

$$\begin{cases} \frac{1}{t'} + \frac{1}{t} = \frac{2}{r \cos \varepsilon}; \\ \frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2 \cos \varepsilon}{r}, \end{cases} \quad (1)$$

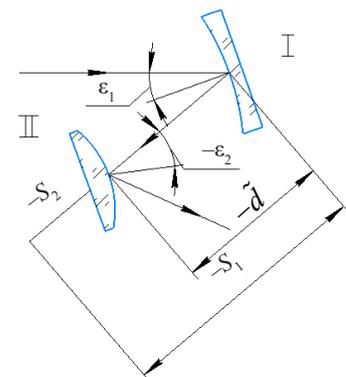
где t и t' ; S и S' – передний и задний отрезки в меридиональной и сагиттальной плоскостях соответственно.

Для системы из двух зеркал введем следующие обозначения: r_1 и r_2 – радиусы кривизны первого и второго зеркал, ε_1 и ε_2 – углы падения главного луча, \tilde{d} – «косая» толщина между зеркалами вдоль главного луча.

Если $S_1 = t_1 = \infty$ (предмет бесконечно удален), то задние отрезки из формулы (1) для первого зеркала равны $\frac{1}{t'_1} = \frac{2}{r_1 \cos \varepsilon_1}$; $\frac{1}{S'_1} = \frac{2 \cos \varepsilon_1}{r_1}$.

Для второго зеркала выражения для задних отрезков: $t'_1 = t_2 + \tilde{d}$; $S'_1 = S_2 + \tilde{d}$, и формула (1) преобразовывается к виду

$$\begin{cases} \frac{1}{t'_2} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{r_2 \cos \varepsilon_2}; \\ \frac{1}{S'_2} + \frac{1}{S_2} = \frac{2 \cos \varepsilon_2}{r_2}. \end{cases}$$



Модуль из двух зеркал
Two mirrors module

Условие исправления астигматизма I порядка. Для проведения анастигматической коррекции, необходимо совместить меридиональный и сагиттальный отрезки $S'_2 = t'_2$.

Из инвариантов Аббе–Юнга для второго зеркала получим выражение

$$\frac{2}{r_2 \cos \varepsilon_2} - \frac{1}{t_2} = \frac{2 \cos \varepsilon_2}{r_2} - \frac{1}{S_2}.$$

Имеем формулы связи параметров в меридиональной и сагиттальной плоскостях:

$$\begin{cases} t_2 = t'_1 - \tilde{d} = \frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d}; \\ S_2 = S'_1 - \tilde{d} = \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1} - \tilde{d}, \end{cases} \quad (2)$$

которые в развернутом виде имеют вид:

$$\frac{2}{r_2 \cos \varepsilon_2} - \frac{1}{\frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d}} = \frac{2 \cos \varepsilon_2}{r_2} - \frac{1}{\frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1} - \tilde{d}},$$

$$\frac{1}{r_2 \cos \varepsilon_2} - \frac{\cos \varepsilon_2}{r_2} = \frac{1}{r_1 \cos \varepsilon_1 - 2\tilde{d}} - \frac{\cos \varepsilon_1}{r_1 - 2\tilde{d} \cos \varepsilon_1}.$$

Преобразуем полученные выражения

$$\sin^2 \varepsilon_2 (r_1 \cos \varepsilon_1 - 2\tilde{d})(r_1 - 2\tilde{d} \cos \varepsilon_1) = r_1 r_2 \cos \varepsilon_2 \sin^2 \varepsilon_1;$$

далее, умножив на $\frac{1}{4 \cos \varepsilon_1 \sin^2 \varepsilon_2}$, получим $\frac{r_1^2}{4} - \frac{2\tilde{d}r_1}{4 \cos \varepsilon_1} - \frac{2\tilde{d}r_1}{4} \cos \varepsilon_1 + \tilde{d}^2 = \frac{r_1 r_2 \cos \varepsilon_2 \sin^2 \varepsilon_1}{4 \cos \varepsilon_1 \sin^2 \varepsilon_2}$.

Откуда имеем окончательное условие исправления астигматизма в двухзеркальной нецентрированной системе:

$$\tilde{d}^2 + \frac{r_1^2}{4} - \frac{\tilde{d}r_1}{2} \left(\frac{1}{\cos \varepsilon_1} + \cos \varepsilon_1 \right) - \frac{r_1 r_2 \sin^2 \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2}{4 \cos \varepsilon_1 \sin^2 \varepsilon_2} = 0. \quad (3)$$

Зная радиусы кривизны и углы наклона зеркал, из условия (3) определяем «косую» толщину между зеркалами \tilde{d} .

Условие коррекции комы. Качество изображения рассматриваемой системы в значительной мере определено комой. Для оценки величины комы используем инвариант меридиональной комы, полученный для случая преломления [6]:

$$\frac{R' \cos^3 \varepsilon'}{t'^3 \sin \varepsilon'} + 3 \left(\frac{\cos^2 \varepsilon'}{t'^2} - \frac{\cos \varepsilon'}{t'r} \right) = \frac{R \cos^3 \varepsilon}{t^3 \sin \varepsilon} + 3 \left(\frac{\cos^2 \varepsilon}{t^2} - \frac{\cos \varepsilon}{tr} \right),$$

где R и R' – радиусы кривизны каустики до и после поверхности. Инвариант позволяет быстро и точно определить кому системы, используя ход главного луча.

Учитывая соотношения для зеркальной поверхности $\cos \varepsilon' = \cos \varepsilon$ и, умножив на $\frac{\sin \varepsilon}{\cos^3 \varepsilon}$, получим $\frac{R'}{t'^3} = 3 \operatorname{tg} \varepsilon \left(\frac{1}{t'^2} - \frac{1}{t^2} \right) - \frac{3 \operatorname{tg} \varepsilon}{r \cos \varepsilon} \left(\frac{1}{t'} - \frac{1}{t} \right) - \frac{R}{t^3}$.

Рассмотрим, чему равняется R'_1 при условии бесконечно удаленного предмета ($t = \infty$) для первого зеркала. Имеем $R'_1 = 3 \operatorname{tg} \varepsilon_1 t'_1 \left(1 - \frac{t'_1}{r_1 \cos \varepsilon_1} \right)$.

Преобразуя, получим, что для первого зеркала радиус каустики выражается формулой $R'_1 = \frac{3}{4} \sin \varepsilon_1 r_1$.

Радиус каустики для второго зеркала:

$$\frac{R'_2}{t'^3_2} = 3 \operatorname{tg} \varepsilon_2 \left(\frac{1}{t'^2_2} - \frac{1}{t^2_2} \right) - \frac{3 \operatorname{tg} \varepsilon_2}{r_2 \cos \varepsilon_2} \left(\frac{1}{t'_2} - \frac{1}{t_2} \right) - \frac{R_2}{t^3_2},$$

где $R_2 = R'_1$, а t'_2 с учетом формулы (1) $\frac{1}{t'_2} = \frac{2}{r_2 \cos \varepsilon_2} - \frac{1}{t_2}$.

Преобразуем выражение инварианта меридиональной комы и, приняв условие устранения комы II порядка $R'_2 = 0$, получим соотношение

$$\frac{3 \operatorname{tg} \varepsilon_2}{r_2 \cos \varepsilon_2} \left(\frac{2}{r_2 \cos \varepsilon_2} - \frac{2}{t_2} \right) - \frac{3}{4} r_1 \sin \varepsilon_1 \frac{1}{t_2^3} = 0.$$

Далее, умножив на $\frac{r_2 \cos \varepsilon_2 t_2^3}{\operatorname{tg} \varepsilon_2}$, имеем $t_2^3 - t_2^2 r_2 \cos \varepsilon_2 - \frac{r_1 r_2^2 \sin \varepsilon_1 \cos^2 \varepsilon_2}{8 \operatorname{tg} \varepsilon_2} = 0$.

С учетом формулы (2) представим окончательный вид условия исправления комы двухзеркальной нецентрированной системы

$$\left(\frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d} \right)^3 - r_2 \cos \varepsilon_2 \left(\frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d} \right)^2 - \frac{r_1 r_2^2 \sin \varepsilon_1 \cos^2 \varepsilon_2}{8 \operatorname{tg} \varepsilon_2} = 0. \quad (4)$$

Для определения параметров двухзеркальной системы с коррекцией астигматизма I порядка и комы II порядка необходимо совместно решить уравнения (3) и (4).

Рассмотрим частный случай, когда $S'_2 = t'_2 = -\tilde{d}$. Имеем связь радиусов для зеркальных поверхностей, используя выражение (2):

$$r_2 = \frac{2\tilde{d} \left(\frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d} \right)}{\cos \varepsilon_2 \left(2\tilde{d} - \frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} \right)}.$$

При этом из условия анастигматической коррекции (3) выражение для угла ε_2 :

$$\cos^2 \varepsilon_2 = \frac{\left(\frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} - \tilde{d} \right) \left(2\tilde{d} - \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1} \right)}{\left(\frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1} - \tilde{d} \right) \left(2\tilde{d} - \frac{r_1 \cos \varepsilon_1}{2} \right)}.$$

Таким образом, задавая r_1 и ε_1 , выбираемые с учетом экранирования и уменьшения aberrаций высших порядков, меняя \tilde{d} , определяем r_2 и ε_2 , после чего вычисляем величину комы согласно формуле (4).

Графическая интерпретация полученных условий (зависимость от «косой» толщины \tilde{d} между зеркалами), составляемая в программной среде Mathcad, используется в параметрическом расчете.

С изменением расстояния между зеркалами меняется также угол ε_2 , но диаметр главного зеркала остается постоянным. При увеличении угла наклона ε_1 величина комы увеличивается незначительно, поэтому практически невозможно одновременно исправить астигматизм I порядка и кому II порядка.

Устранение астигматизма II порядка. Для решения задачи оценки астигматизма II порядка, влияющего на качество изображения по полю изображения, в рассматриваемой системе целесообразно использовать выражения для так называемых инвариантов наклонов, которые описывают связь поворотов поверхностей с наклонами меридионального ψ'_t и сагиттального ψ'_s изображений относительно главного луча при совмещении входного зрачка с вершиной поверхности. Для случая преломления [6]:

– меридиональный инвариант наклона

$$-(2 \operatorname{tg} \varepsilon' + \operatorname{tg} \psi'_t) \frac{\cos \varepsilon'}{t'} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{r} = -(2 \operatorname{tg} \varepsilon + \operatorname{tg} \psi_t) \frac{\cos \varepsilon}{t} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{r}; \quad (5)$$

– сагиттальный инвариант наклона

$$-\frac{\operatorname{tg} \psi'_s}{S' \cos \varepsilon'} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{r} = -\frac{\operatorname{tg} \psi_s}{S \cos \varepsilon} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{r}. \quad (6)$$

Применяя формулы (5) и (6) для нашей задачи использования двухзеркальной системы, при расположении предмета в бесконечности, $t = S = \infty$, имеем для первой отражающей поверхности в меридиональной плоскости $\text{tg } \psi'_{t_1} = \text{tg } \varepsilon_1$. В сагиттальной плоскости $\text{tg } \psi'_{s_1} = -\text{tg } \varepsilon_1$; т. е. поворот первой отражающей поверхности связан с наклонами меридионального и сагиттального изображений $\text{tg } \psi'_{t_1} = \text{tg } \varepsilon_1 = -\text{tg } \psi'_{s_1}$.

Для второй отражающей поверхности при $\varepsilon_2 = -\varepsilon'_2$: в меридиональной плоскости $\text{tg } \psi_{t_2} = \text{tg } \psi'_{t_1}$; в сагиттальной плоскости $\text{tg } \psi_{s_2} = \text{tg } \psi'_{s_1}$.

Из инвариантов наклонов получим

$$\text{tg } \psi'_{t_2} = \left(\frac{2 \text{tg } \varepsilon_2}{r_2 \cos \varepsilon_2} + \frac{\text{tg } \varepsilon_1}{t_2} \right) t'_2; \quad \text{tg } \psi'_{s_2} = - \left(\frac{2 \text{tg } \varepsilon_2 \cos \varepsilon_2}{r_2} + \frac{\text{tg } \varepsilon_1}{S_2} \right) S'_2. \quad (7)$$

Для устранения астигматизма II порядка, связанного с наклонами изображения, необходимо приравнять углы $\psi'_{s_2} = \psi'_{t_2}$ (7), т. е. совместить прямые, образуемые фокусами меридионального и сагиттального бесконечно тонких пучков, и совместить с ними фокальную плоскость. Далее имеем

$$\frac{2 \text{tg } \varepsilon_2}{r_2} \left(\frac{t'_2}{\cos \varepsilon_2} + \cos \varepsilon_2 S'_2 \right) + \text{tg } \varepsilon_1 \left(\frac{t'_2}{t_2} + \frac{S'_2}{S_2} \right) = 0.$$

Так как $\varepsilon_2 \neq 0$ и $\varepsilon_1 \neq 0$, необходимо выполнить два условия:

$$\begin{cases} t_2 = S_2 \cos^2 \varepsilon_2 \\ t'_2 = -S'_2 \cos^2 \varepsilon_2 \end{cases}.$$

В отличие от астигматизма I порядка, где $t'_2 = S'_2$ для астигматизма II порядка добавляется $-\cos^2 \varepsilon_2$, т. е. $t'_2 = -S'_2 \cos^2 \varepsilon_2$.

Условие исправления астигматизма II порядка трансформируется в два уравнения, определяющих параметры второго зеркала: r_2 и угол наклона ε_2

$$\begin{cases} r_2 = \frac{r_1 \cos \varepsilon_1 - 2\tilde{d}}{\cos \varepsilon_2} \\ \cos^2 \varepsilon_2 = \sqrt{\frac{r_1 \cos \varepsilon_1 - 2\tilde{d}}{r_1 - 2\tilde{d}}} \cos \varepsilon_1 \end{cases}.$$

В частном случае, когда $\tilde{d} = 0$, имеем условие равнонаклонности зеркал одного и того же радиуса: $r_2 = \pm r_1$; $\cos \varepsilon_2 = \pm \cos \varepsilon_1$.

Заключение. В сообщении предложена методика параметрического расчета нецентрированных зеркальных систем, использующая точные формулы расчета для действительных лучей из условий исправления неэлементарных aberrаций астигматизма и комы в «кособоких» зеркальных системах. Методика позволяет составлять алгоритмы и проектировать как базовые модели, так и сложные зеркальные системы из внеосевых зеркал. Область применения предложенной методики можно расширить по количеству компонентов. Создание новых алгоритмов моделирования децентрированных зеркальных систем позволит увеличить накопленный потенциал вычислительной оптики.

Список использованных источников

1. Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики / М. М. Мирошников [и др.] // Оптика XXI век: материалы 6-го Междунар. оптического конгресса. – СПб., 2010. – Ч. 1. – С. 2–6.
2. Зверев, В. А. Оптика вооружения и военной техники / В. А. Зверев // Труды Объединенного научного совета по гуманитарным проблемам и историко-культурному наследию. – 2011. – Т. 2010. – С. 105–113.
3. Артюхина, Н. К. Анализ схемных решений децентрированных двухзеркальных систем / Н. К. Артюхина // Вестн. БНТУ. – 2010. – № 4. – С. 39–42.
4. Кингслэйк, Р. Проектирование оптических систем / Р. Кингслэйк. – Нью Йорк, 1983. – 366 с.

5. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – 7-е изд. – Лондон, 1999. – 561 с.
6. Русинов, М. М. Композиция нецентрированных оптических систем / М. М. Русинов. – СПб., 2004. – 252 с.
7. Губель, Н. Н. Аберрации децентрированных систем / Н. Н. Губель. – Л., 1975. – 272 с.
8. Артюхина, Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем / Н. К. Артюхина. – Минск, 2009. – 309 с.
9. Запрягаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М., 2000. – 584 с.

References

1. Miroshnikov M. M., Iozep E. A., Mirzoeva L. A., Mack A. A., Makovtsov G. A., Arkhipova L. N., Zakharenkov V. F., Pavlov V. S. Modern optical-electronic complexes as result of introduction of achievements in the sphere of optics. *Optika XXI vek: materialy 6-go Mezhdunarodnogo opticheskogo kongressa. Chast' 1* [Optics 21st century: materials of the 6th International optical congress, Part 1]. Saint Petersburg, 2010, pp. 2–6 (in Russian).
2. Zverev V. A. Optics of weapons and military equipment. *Trudy Ob'edinennogo nauchnogo soveta po gumanitarnym problemam i istoriko-kul'turnomu naslediyu* [Proceedings of the Joint Scientific Council on Humanitarian Problems and Historical and Cultural Heritage], 2011, vol. 2010, pp. 105–113 (in Russian).
3. Artiukhina N. K. Scheme solution analysis of decenter two-mirrors systems. *Vestnik Belorusskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 2010, no. 4, pp. 36–39 (in Russian).
4. Kingslake R. *Optical systems Design*. New York, 1983. 366 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408660-9.X5001-6>
5. Born M., Wolf E. *Principles of optics*. 7th ed. Cambridge, 1999. 952 p.
6. Rusinov M. M. *Composition of decentered optical systems*. Saint Petersburg, 2004. 252 p. (in Russian).
7. Gubel N. N. *Decentered systems aberrations*. Leningrad, 1975. 272 p. (in Russian).
8. Artiukhina N. K. *Theory, methods of design and calculation of mirror systems*. Minsk, 2009. 309 p. (in Russian).
9. Zaprugaeva L. A., Sveshnikava I. S. *Calculation and design of optical systems*. Moscow, 2000. 584 p. (in Russian).

Информация об авторе

Артюхина Нина Константиновна – д-р техн. наук, профессор кафедры. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: art49@mail.ru.

Information about author

Artiukhina Nina K. – D. Sc. (Engineering), Professor of Department. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: art49@mail.ru.