

## Влияние разъюстировок оптической системы Пашена-Рунге на спектральное разрешение

**\*И.А. Зарубин<sup>1,2</sup>, А.А. Сырбаков<sup>1,2</sup>, В.А. Лабусов<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт автоматики и электрометрии СО РАН»,  
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1

<sup>2</sup>ФГБУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Российская Федерация,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

<sup>3</sup>ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,  
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1

\*Адрес для переписки: Зарубин Игорь Александрович, E-mail: zarubin@vmk.ru

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г., после доработки – 11 сентября 2024 г.

При разработке и производстве спектральных приборов, выполненных по схеме Пашена-Рунге с неклассическими вогнутыми дифракционными решетками, часто возникает вопрос о допустимых пределах отклонения параметров схемы (передний отрезок, угол падения излучения, смещение фотодетектора из плоскости дисперсии) от расчётных, при которых спектральное разрешение ухудшается незначительно. Исследование проведено на примере двух решёток, используемых в спектральном приборе «Гранд-2» (предприятие ООО «ВМК-Оптоэлектроника»), с помощью компьютерного моделирования в программном обеспечении «Zemax», адекватность которого проверена экспериментально.

Показано, что предел спектрального разрешения увеличивается не более чем на 10 % в следующем диапазоне параметров схемы для решётки с криволинейными штрихами: передний отрезок –  $895 \pm 6$  мм, угол падения лучей на решётку –  $(26.5 \pm 0.4)^\circ$ , смещение линейного фотодетектора из плоскости дисперсии  $\pm 0.6$  мм; для решётки с криволинейными штрихами и переменным шагом: передний отрезок –  $(987.5 \pm 9.0)$  мм, угол падения лучей на решётку  $(20.3 \pm 2.2)^\circ$ , смещение линейного фотодетектора из плоскости дисперсии  $\pm 1.15$  мм. Эти допуски легко выдерживаются в конструкции спектрального прибора, в результате чего практически достигнуты прекрасные характеристики его разрешения, составляющие 8 пм в диапазоне 190-350 нм и 25 пм в диапазоне 350-855 нм.

**Ключевые слова:** Схема Пашена-Рунге, неклассическая вогнутая дифракционная решетка, Zemax, спектральное разрешение, линейный фотодетектор.

For citation: Analitika i kontrol' [Analytics and Control], 2024, vol. 28, no. 3, pp. 270-276

DOI: 10.15826/analitika.2024.28.3.005

## Influence of misalignment on spectral resolution in a Paschen–Runge optical system

**\*I.A. Zarubin<sup>1,2</sup>, A.A. Syrbakov<sup>1,2</sup>, V.A. Labusov<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
1 Akademika Koptyuga Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marksa Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>3</sup>VMK-Optoelektronika, 1 Akademika Koptyuga Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

\*Corresponding author: Igor A. Zarubin, E-mail: zarubin@vmk.ru

Submitted 28 August 2024, received in revised form 11 September 2024

A common question arising during the design and fabrication of spectral instruments arranged according to the Paschen–Runge scheme with non-classical concave diffraction gratings concerns the permissible deviation of the scheme parameters (distance from the slit to the grating, incident angle, displacement of the photodetector from the dispersion plane) from the calculated ones at which the spectral resolution degrades

insignificantly. Computer simulation using ZEMAX software was carried out for two gratings used in the Grand-2 spectral instrument (VMK-Optoelektronika), and the simulation results were validated against the experimental data.

The spectral resolution limit increased by 10% or less for the following ranges of the scheme parameters for the grating with curved grooves: distance from the slit to the grating of  $895 \pm 6$  mm, angle of incidence of rays on the grating of  $(26.5 \pm 0.4)^\circ$ , and displacement of the linear photodetector from the dispersion plane of  $\pm 0.6$  mm; for the varied line-space (VLS) grating with curved grooves: distance from the slit to the grating of  $(987.5 \pm 9.0)$  mm, angle of incidence of rays on the grating of  $(20.3 \pm 2.2)^\circ$ , and displacement of the linear photodetector from the dispersion plane of  $\pm 1.15$  mm. These tolerances are easily sustained in the fabrication of the spectral instrument resulting in achieving excellent resolution characteristics of 8 pm in the range of 190–350 nm and 25 pm in the range of 350–855 nm.

**Keywords:** Paschen–Runge scheme, non-classical concave diffraction grating, ZEMAX software, spectral resolution, linear photodetector.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в атомно-эмиссионной спектроскопии широко применяют спектральные приборы с разрешением около 7 нм в УФ области спектра [1-4]. Одной из распространенных оптических схем, обеспечивающих указанное разрешение, является схема Пашена-Рунге, ключевую роль в которой играет вогнутая дифракционная решетка (ВДР), а спектр регистрируется сборкой линейных фотодетекторов [5]. Качество ВДР во многом определяет характеристики спектрального прибора – светосилу и спектральное разрешение [6].

Наибольшую светосилу имеют спектральные приборы с неклассическими ВДР благодаря исправленному астигматизму [7]. Такие ВДР позволяют фокусировать большую долю излучения в плоскости дисперсии за счет совмещения меридиональной фокальной кривой (круг Роланда) и сагиттальной (прямая Сиркса), что повышает светосилу, но пагубно влияет на спектральное разрешение, особенно при регистрации излучения вне плоскости дисперсии. Это происходит в сборках с расположением линейных фотодетекторов в шахматном порядке для исключения «слепых» зон в регистрируемом спектре [8].

Неклассические ВДР с исправленным астигматизмом для двух длин волн рассчитывают для регистрации конкретного спектрального диапазона, изменение которого путём смещения фотодетектора по кругу Роланда или изменения угла падения излучения на ВДР приводит к ухудшению спектрального разрешения. Это объясняется тем, что меридиональная фокальная кривая в таких решетках совпадает с кругом Роланда лишь в определенной спектральной области, заданной при проектировании ВДР. При разработке и производстве спектральных приборов часто возникает вопрос о допустимых пределах отклонения параметров схемы Пашена-Рунге с неклассическими ВДР (передний отрезок, угол падения излучения, смещение фотодетектора из плоскости дисперсии) от расчётных, при которых спектральное разрешение ухудшается незначительно. Ответ на этот вопрос можно получить либо экспериментально, либо путём компьютерного моделирования.

Целью статьи является определение пределов допустимых отклонений параметров оптической схемы Пашена-Рунге спектрального прибора «Гранд-2», выполненного на основе двух полихроматоров с неклассическими ВДР, при которых ухудшение спектрального разрешения незначительно (предел спектрального разрешения увеличивается не более чем на 10 %). Исследование проведено с помощью компьютерного моделирования, адекватность которого проверена экспериментально.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Уравнение ВДР, связывающее угол падения и угол дифракции, имеет вид [9]:

$$\sin \varphi + \sin \varphi' = k\lambda N, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол падения луча АО на решетку (рис.1);  $\varphi'$  – угол дифракции луча с длиной волны  $\lambda$ ;  $k$  – порядок дифракции;  $N$  – частота штрихов.

Согласно указанной формуле, лучи, исходящие из точек А и В, попадают на ВДР и далее дифрагированные лучи при отсутствии aberrаций формируют изображение, соответственно, в точках А' и В' (рис.1). Из-за aberrаций изображение точки В находится в точке В'.

Для вычисления aberrаций ВДР используется функция оптического пути (ФОП) [7]

$$V(y, z) = \langle AO \rangle + \langle OA' \rangle - k\lambda m(y, z), \quad (2)$$

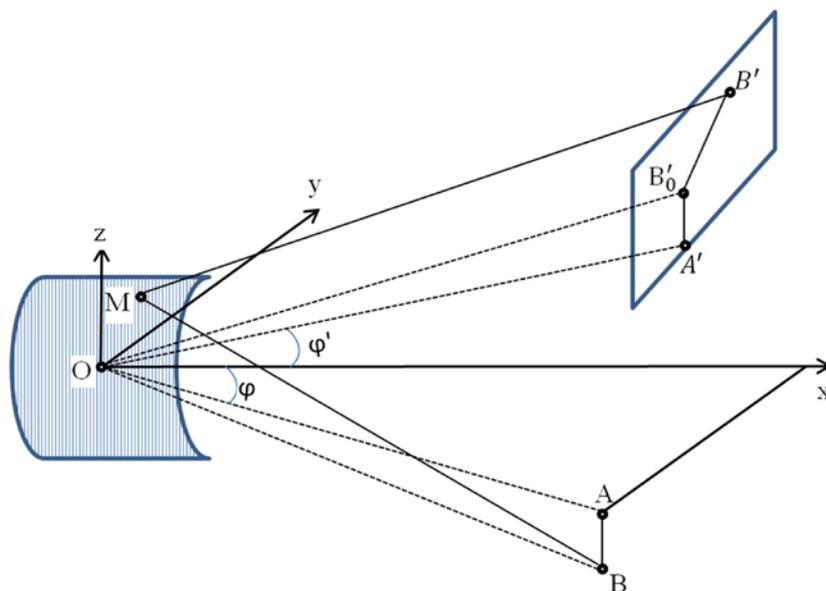
где  $m(y, z)$  – количество штрихов на поверхности решетки между точками О и М, а

$$[\langle AO \rangle]^2 = (x_a - x_M)^2 + (y_a - y_M)^2 + (z_a - z_M)^2;$$

$$[\langle OA' \rangle]^2 = (x_{a'} - x_M)^2 + (y_{a'} - y_M)^2 + (z_{a'} - z_M)^2.$$

Формула (2) при разложении в степенной ряд имеет вид:

$$V = V_{000} + y_M V_{100} + z_M V_{010} + y_M^2 V_{200} + z_M^2 V_{020} + \frac{1}{2} y_M^3 V_{300} + \frac{1}{2} y_M z_M^2 V_{120} + \dots, \quad (3)$$



**Рис. 1.** Построение изображения вогнутой дифракционной решеткой  
**Fig. 1.** Image formation by a concave diffraction grating

Выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$V_{ijk} = M_{ijk} + k\lambda G_{ijk}, \quad (4)$$

где  $M_{ijk}$  – коэффициенты разложения части ФОП, зависящей от схемы расположения решётки,  $G_{ijk}$  – коэффициенты, зависящие от формы и расположения штрихов дифракционной решётки.

Моделирование неклассических ВДР возможно осуществить в программном обеспечении «Zemax» [10], предназначенном для моделирования различных оптических схем. Вогнутая решетка моделируется как бинарный элемент, заданный набором фазовых коэффициентов, связанных с коэффициентами разложения в степенной ряд функции оптического пути и aberrациями. Программа не моделирует штрихи напрямую, вместо этого она использует фазовое опережение для изменения направления распространения луча. Бинарная поверхность первого типа добавляет изменение в фазу луча в соответствии со следующим выражением:

$$\Phi = k \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (4)$$

где  $N$  – число коэффициентов полинома в ряду;  $A_i$  – коэффициент  $i$ -го члена полинома;  $k$  – порядок дифракции;  $E_i(x, y)$  – полиномы, которые представляют собой степенной ряд  $x$  и  $y$ , где первый член  $x$ , второй –  $y$ , следующий  $x^2$ , и т.д.

Связь коэффициентов бинарной поверхности первого типа с коэффициентами степенного ряда ФОП определяется следующими соотношениями:

$$C_{ZEMAX} = 2\pi C_n; C_1 = G_{010} = 0; C_2 = G_{100}; C_3 = G_{020}/2; C_4 = G_{110}; C_5 = G_{200}/2; C_6 = G_{030} = 0; C_7 = G_{120}/2; C_8 = G_{210} = 0; C_9 = G_{300}/2$$

В «Zemax» моделировали ВДР (табл.1), используемые в спектральных приборах «Гранд-2» [5].

**Таблица 1**

Параметры полихроматоров спектрального прибора «Гранд-2»

**Table 1**

Parameters of polychromators in the Grand-2 spectral instrument

Параметр	Полихроматор 1 (ВДР 1 с криволинейными штрихами)	Полихроматор 2 (ВДР 2 с переменным шагом и криволинейными штрихами)
Рабочий диапазон, нм	190-350	350-775
Размер заштрихованной зоны, мм	50*60	45*66
Радиус кривизны подложки, мм	1000	1000
Частота штрихов, штр/мм	2400	900
Рабочий порядок	1	1
Коэффициент неравномерности, мм <sup>-1</sup>	-	1.52*10 <sup>-4</sup>
Угол наклона оси качения резца, градусы	25	8.6
Стигматическая длина волны, нм	200	685
Угол падения $\phi$ , градусы	26.5	20.3
Передний отрезок $L$ , мм	895	987.5

Таблица 2

Коэффициенты бинарной поверхности для вогнутых решеток

Table 2

Binary surface coefficients for concave gratings

Коэффициенты бинарной поверхности	Решетка с криволинейными штрихами	Решетка с переменным шагом и криволинейными штрихами
$C_2$	15080	5655
$C_3$	3.516	0.478
$C_5$	0	-0.430
$C_7$	$-1.639 \cdot 10^{-3}$	$-1.536 \cdot 10^{-4}$
$C_9$	0	$1.224 \cdot 10^{-5}$

Коэффициенты бинарной поверхности для указанных решеток представлены в табл. 2.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проверки адекватности моделирования было проведено экспериментальное исследование влияния отклонения параметров схемы Пашена-Рунге с неклассическими ВДР (передний отрезок, угол падения луча, смещение фотодетектора из плоскости дисперсии) на спектральное разрешение. Для этого была создана установка (рис. 2), являющаяся физической моделью спектрального прибора по схеме Пашена – Рунге на основе ВДР и сборки линейных фотодетекторов БЛПП-4000, расположенных по дуге с радиусом окружности Роуланда. Установка включала две микрометрических подвижки: первая предназначалась для перемещения сборки

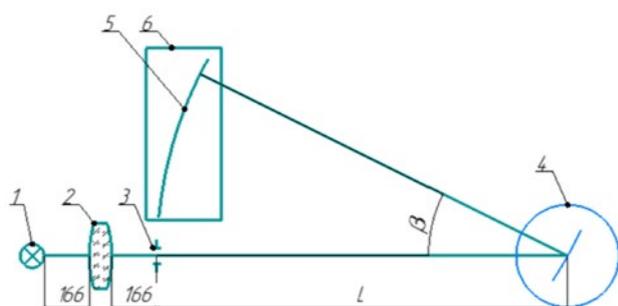


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – источник излучения: спектральная медно-цинковая лампа с полым катодом; 2 – конденсор: линза с фокусным расстоянием  $f = 83$  мм; 3 – входная щель с микрометрической подвижкой: ширина 15 мкм, высота 3 мм; 4 – ВДР; 5 – сборка из 14 линейных фотодетекторов БЛПП-4000; 6 – микрометрическая подвижка

Fig. 2. Experimental setup: 1 – light source: Cu–Zn hollow cathode lamp; 2 – condenser: lens with a focal distance  $f = 83$  mm; 3 – entrance slit with a micrometric slider (15  $\mu\text{m}$  width and 3 mm height); 4 – grating; 5 – detector with 14 BLPP-4000 linear photodetectors; 6 – micrometric slider

в направлении перпендикулярном плоскости дисперсии; вторая – для изменения переднего отрезка путём перемещения входной щели. Входная щель имела ширину 15 мкм и высоту 3 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

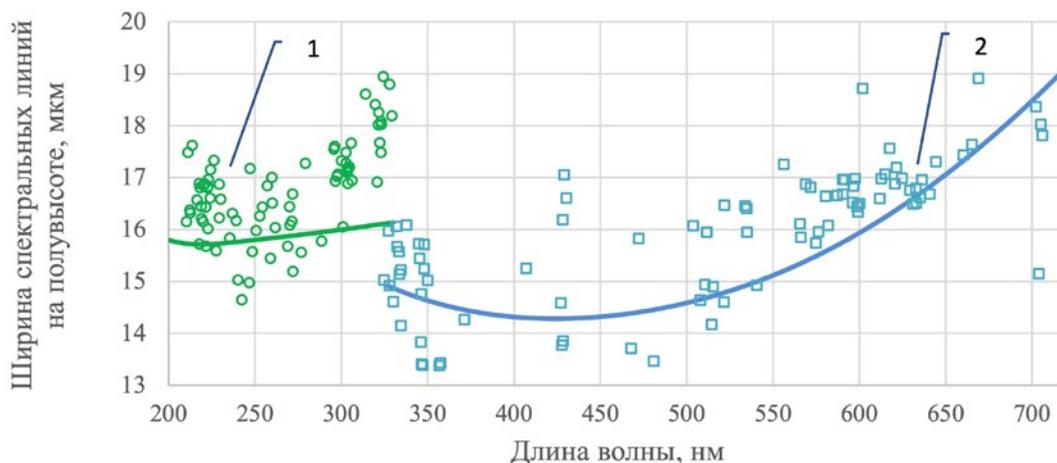
Путём компьютерного моделирования схемы Пашена-Рунге были построены изображения входной щели шириной 15 мкм и высотой 3 мм, что соответствует входной щели на экспериментальном стенде. Затем была найдена зависимость ширины изображения входной щели на полувысоте, характеризующей спектральное разрешение, от длины волны. Также были получены значения разрешения при отклонении длины переднего отрезка и угла падения от номинальных значений, а также при выводе линейного фотодетектора из плоскости дисперсии. При этом определение спектрального разрешения при разъюстировке каждого из параметров схемы проводили для оптимального положения поверхности изображения, а на экспериментальном стенде после подфокусировки фотодетектора.

Проверку адекватности компьютерного моделирования осуществляли при всех изменениях оптической схемы спектрального прибора. Для примера на рис. 3 показаны зависимости ширины изображения входной щели от длины волны для исследуемых решеток при номинальном (расчетном) значении переднего отрезка. Видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Среднее относительное отклонение экспериментальных результатов от модели не превосходит 4 % для ВДР 1 и 7 % для ВДР 2. Во всех остальных случаях значение этой величины не превышало 13 %. Для простоты анализа далее будут приведены результаты моделирования.

На рис. 4 приведена зависимость предела спектрального разрешения от отклонения длины переднего отрезка от номинального значения. Как видно из рис. 4 для ВДР 1 спектральное разрешение ухудшается на 10 % при отклонении переднего отрезка в диапазоне от -6 мм до 6 мм, а для ВДР 2 – от -9 до 9 мм.

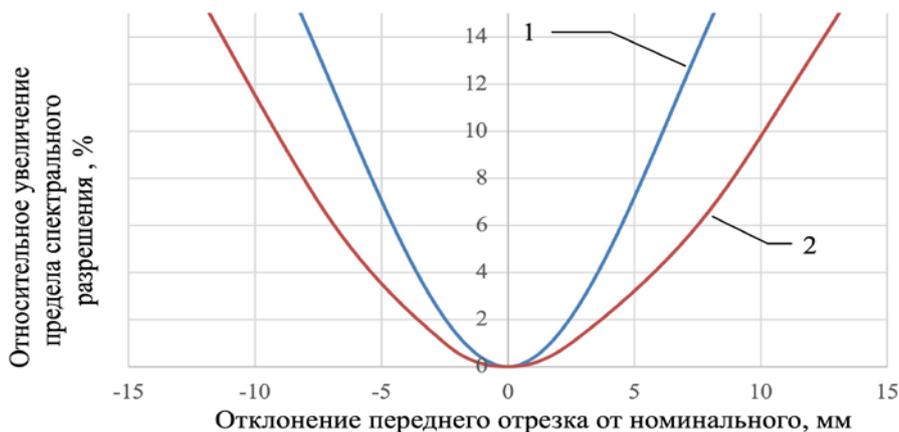
Следует отметить, что при отклонении переднего отрезка от номинального значения радиус фокальной кривой изменяется, и она перестает совпадать с окружностью Роуланда, на которой расположены линейные фотодетекторы. Таким образом, возникающая расфокусировка приводит к виду зависимости спектрального разрешения от длины волны для ВДР 1, показанному на рис. 5. Максимальные значения этой зависимости использованы при построении графика на рис. 4.

Кроме того, были получены зависимости изменения предела спектрального разрешения от отклонения угла падения от номинального значения. Графики указанных зависимостей, показанные на рис. 6, построены для длин волн, у которых наблюдается наибольшее увеличение предела



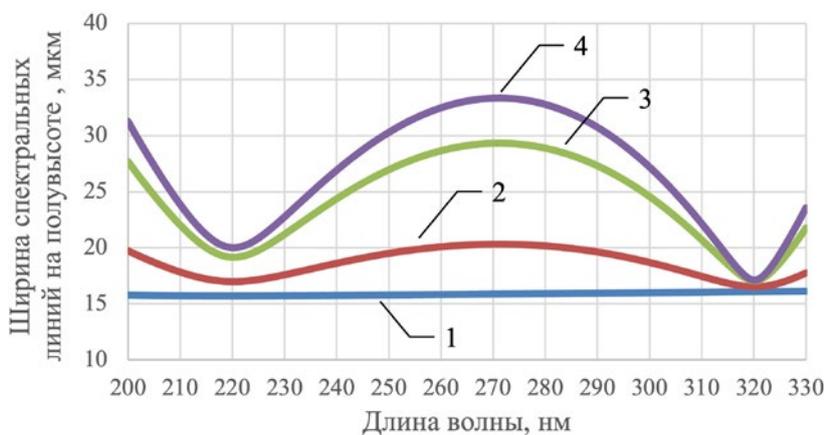
**Рис. 3.** Зависимость ширины изображения входной щели от длины волны, полученные экспериментально (маркеры) и моделированием (сплошные линии): 1 – ВДР 1; 2 – ВДР 2

**Fig. 3.** Dependence of entrance slit image width on wavelength obtained experimentally (symbols) and by simulation (solid lines): 1 – grating 1; 2 – grating 2



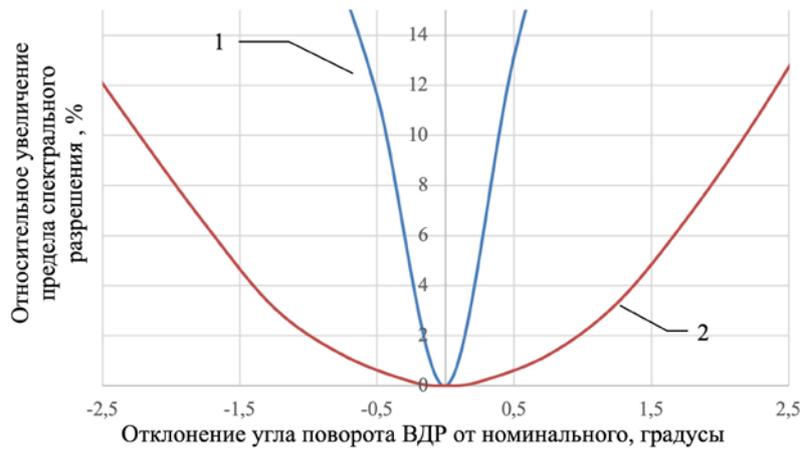
**Рис. 4.** Зависимость относительного увеличения предела спектрального разрешения от длины переднего отрезка при его отклонении от расчетного значения: 1 – ВДР 1; 2 – ВДР 2

**Fig. 4.** Dependence of relative increase in the spectral resolution limit on the deviation of the slit–grating distance from the calculated value: 1 – grating 1; 2 – grating 2



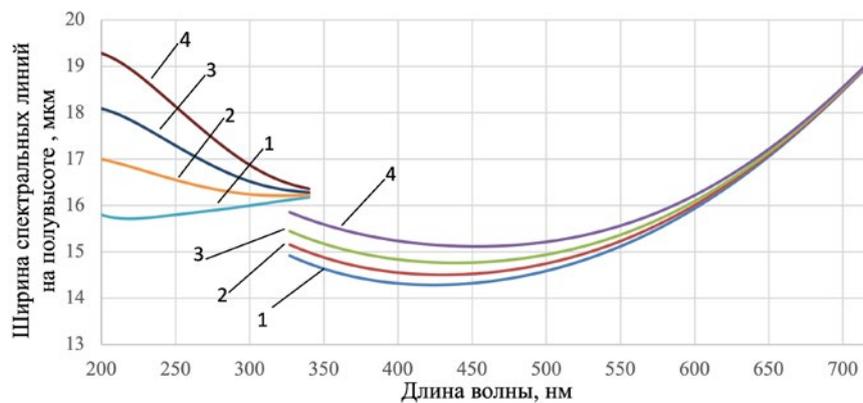
**Рис. 5.** Зависимость ширины изображения входной щели от длины волны при разном отклонении  $\Delta L$  от расчетного значения длины переднего отрезка (1 –  $\Delta L = 0$  мм; 2 –  $\Delta L = 20$  мм; 3 –  $\Delta L = 60$  мм; 4 –  $\Delta L = 80$  мм)

**Fig. 5.** Dependence of entrance slit image width on wavelength for different deviation of  $\Delta L$  from the calculated value of the slit–grating distance (1 –  $\Delta L = 0$  mm; 2 –  $\Delta L = 20$  mm; 3 –  $\Delta L = 60$  mm; 4 –  $\Delta L = 80$  mm)



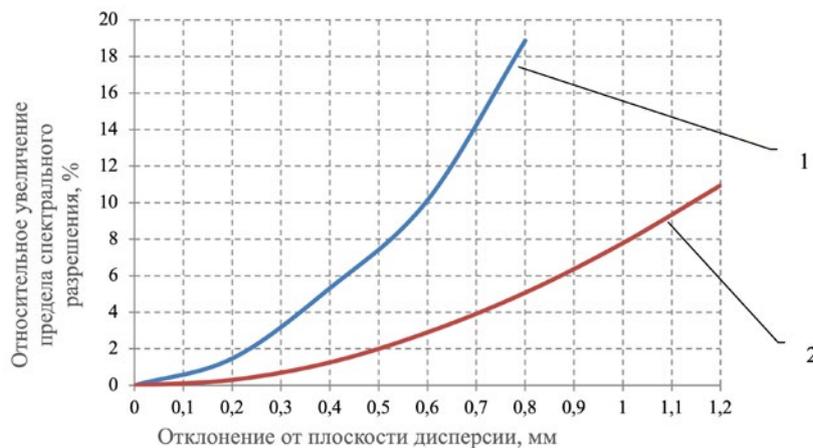
**Рис.6.** Зависимость относительного увеличения предела спектрального разрешения от отклонения угла падения лучей на ВДР от номинального значения: 1 – ВДР 1; 2 – ВДР 2

**Fig. 6.** Dependence of relative increase of the spectral resolution limit on deviation of the angle of incidence of rays on the grating from the nominal value: 1 – grating 1; 2 – grating 2



**Рис. 7.** Зависимость ширины изображения входной щели от длины волны при различном смещении линейных фотодетекторов из плоскости дисперсии по вертикали  $\Delta L$ : 1 – 0 мм; 2 – 0.4 мм; 3 – 0.6 мм; 4 – 0.8 мм. В области 200–330 нм данные с ВДР 1, в области 330–720 нм – с ВДР 2

**Fig. 7.** Dependence of entrance slit image width on wavelength for different vertical displacements of linear photodetectors from the dispersion plane  $\Delta L$ : 1 – 0 mm; 2 – 0.4 mm; 3 – 0.6 mm; 4 – 0.8 mm. In 200–330 nm region data are from grating 1, and in 330–720 nm region data are from grating 2



**Рис. 8.** Зависимость относительного увеличения предела спектрального разрешения от смещения линейных фотодетекторов из плоскости дисперсии: 1 – ВДР 1; 2 – ВДР 2

**Fig. 8.** Dependence of relative increase in the spectral resolution limit on displacement of linear photodetectors from the dispersion plane: 1 – grating 1; 2 – grating 2

спектрального разрешения (наибольшая длина волны рабочего диапазона).

Из рис. 6 следует, что для ВДР 1 допустимый угол падения лежит в диапазоне от  $26.1^\circ$  до  $26.9^\circ$ , для ВДР 2 – от  $18.1^\circ$  до  $22.5^\circ$

Как отмечалось выше, чтобы исключить «слепые» зоны в месте стыка линейных фотодетекторов они размещаются в шахматном порядке, т.е. смещаются выше или ниже относительно плоскости дисперсии. Полученные путем моделирования данные о спектральном разрешении при таком смещении приведены на рис.7.

Используя графики рис.7, была построена зависимость относительного увеличения предела спектрального разрешения от смещения линейных фотодетекторов из плоскости дисперсии (рис.8) для длины волны, наиболее чувствительной к такому смещению (наименьшая длина волны рабочего спектрального диапазона).

Как видно из рис. 8 допустимое (на 10 %) ухудшение разрешения соответствует смещению фотодетектора на 0.6 мм для ВДР 1 и 1.15 мм для ВДР 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, создана компьютерная модель оптической схемы Пашена-Рунге в программном обеспечении «Zemax» с использованием бинарной поверхности первого типа. Рассчитаны коэффициенты бинарных поверхностей для двух неклассических вогнутых дифракционных решёток, используемых в спектральных приборах «Гранд-2». Адекватность модели доказана на примере сравнения зависимости ширины изображения входной щели от длины волны, полученной путем моделирования и экспериментально.

С помощью созданной модели найдены пределы допустимых отклонений параметров оптической схемы Пашена-Рунге для обеих дифракционных решеток, при которых предел спектрального разрешения увеличивается не более чем на 10 %. Для ВДР 1 с криволинейными штрихами пределы допустимых отклонений составляют: передний отрезок –  $895 \pm 6$  мм, угол падения излучения на решётку –  $(26.5 \pm 0.4)^\circ$ , смещение линейного фотодетектора из плоскости дисперсии  $\pm 0.6$  мм. Для ВДР 2 с криволинейными штрихами и переменным шагом эти пределы таковы: изменение переднего отрезка –  $(987.5 \pm 9.0)$  мм, угол падения –  $(20.3 \pm 2.2)^\circ$ , смещение линейного фотодетектора из плоскости дисперсии  $\pm 1.15$  мм. Эти допуски легко выдерживаются в конструкции спектрального прибора, в результате чего практически достигнуты прекрасные характеристики его разрешения, составляющие 8 пм в диапазоне 190-350 нм и 25 пм в диапазоне 350-855 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спектрометр оптический Гранд в модификации «Гранд-Поток». [Электронный ресурс]: [https://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/book\\_2019\\_4\\_Grand\\_Potok.pdf](https://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/book_2019_4_Grand_Potok.pdf) (дата обращения 09.07.2024).

2. Avio 550/560 Max ICP Optical Emission Spectrometers. [Электронный ресурс]: [https://perkinelmer.com.ar/wp-content/uploads/sites/3/2018/08/Avio-550\\_560-Max-ICP-OES-Specifications.pdf](https://perkinelmer.com.ar/wp-content/uploads/sites/3/2018/08/Avio-550_560-Max-ICP-OES-Specifications.pdf) (дата обращения 09.07.2024).
3. Agilent 720/725 ICP-OES. [Электронный ресурс]: [https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-6497EN%20720-725\\_ICP-OES\\_LR.pdf](https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-6497EN%20720-725_ICP-OES_LR.pdf) (дата обращения 09.07.2024).
4. Spectrolab LAVM11. [Электронный ресурс]: <https://www.spectro.cz/store/spectrolab11-eng.pdf> (дата обращения 09.07.2024).
5. Лабусов В.А., Бехтерев А.В., Гаранин В.Г. Спектрометры с анализаторами МАЭС на основе новых линеек фотодетекторов // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25, № 4. С. 262-272.
6. Дзюба А.А., Лабусов В.А., Зарубин И.А. Новый атомно-эмиссионный спектрометр «Гранд-2000». Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т.88, №1(II). С. 27-33.
7. Павлычева Н. К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Издательство КГТУ, 2003. 198 с.
8. Лабусов В. А., Гаранин В.Г., Шелпакова И. Р. Многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров. Современное состояние и аналитические возможности. Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67, № 7. С. 697.
9. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
10. Особенности проектирования дифракционных решеток / В. Н. Васильев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6(82). С. 1-6.

## REFERENCES

1. Optical spectrometer "GRAND" in modification "Grand-Potok" Available at: [https://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/book\\_2019\\_4\\_Grand\\_Potok.pdf](https://www.vmk.ru/website/vmk/upload/custom/files/book_2019_4_Grand_Potok.pdf) (accessed 9 July 2024). (in Russian).
2. Avio 550-560 Max ICP OES Specifications. Available at: [https://perkinelmer.com.ar/wp-content/uploads/sites/3/2018/08/Avio-550\\_560-Max-ICP-OES-Specifications.pdf](https://perkinelmer.com.ar/wp-content/uploads/sites/3/2018/08/Avio-550_560-Max-ICP-OES-Specifications.pdf) (accessed 9 July 2024).
3. Agilent 720/725 ICP-OES. Available at: [https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-6497EN%20720-725\\_ICP-OES\\_LR.pdf](https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-6497EN%20720-725_ICP-OES_LR.pdf) (accessed 9 July 2024).
4. Spectrolab LAVM11. Available at: <https://www.spectro.cz/store/spectrolab11-eng.pdf> (accessed 9 July 2024).
5. Labusov V.A., Behterev A.V., Garanin V.G. [Spectrometers with MAES analyzers based on new photodetector arrays]. *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 262-272 (in Russian).
6. Dzyuba A.A., Labusov V.A., Zarubin I.A. [A new atomic-emission spectrometer "GRAND-2000"]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2022, vol. 88, no. 1, part 2, pp. 27-33 (in Russian).
7. Pavlycheva N.K. *Spektral'nye pribory s neklassicheskimi difraktsionnymi reshetkami [Spectral instruments with non-classical diffraction gratings]*. Kazan, KSTU Publ. House, 2003. 198 p. (in Russian).
8. Labusov V.A., Garanin V.G., Shelpakova I.R. [Multichannel analyzers of atomic emission spectra: current state and analytical potentials]. *Zhurnal analiticheskoi khimii [J. Anal. Chem.]*, 2012, vol. 67, no. 7, pp. 697-707 (in Russian).
9. Peisakhson I. V. *Optika spektral'nykh priborov [Optics of spectral instruments]*. Leningrad, 1975. 312 p. (in Russian).
10. Vasiliev V.N., Vorontsov D.N., Dragunov A.I., Livshits I.L., Sokolova E.A. [Cad features for diffraction grating modeling]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics]* 2012, vol. 6 (82), pp. 1-6 (in Russian).