

УДК 520.353

## РАСЧЕТ АСТРОНОМИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА НА БАЗЕ ПЛОСКОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

© 2019 Д. А. Сазоненко<sup>1\*</sup>, Д. Е. Кукушкин<sup>1</sup>, А. О. Вознесенская<sup>1</sup>, А. В. Бахолдин<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 3 мая 2019 года; после доработки 24 мая 2019 года; принята к публикации 24 мая 2019 года

В статье представлена методика расчета спектрографа для астрофизических исследований на основе базовых входных и выходных параметров оптической системы. В рамках предложенной методики можно определить основные характеристики компонентов спектрографа: фокусное расстояние коллиматора, фокусное расстояние проекционной камеры, угол блеска решетки, частоту решетки. В качестве базовых используются следующие параметры: необходимое спектральное разрешение, исследуемый спектральный диапазон, входная апертура спектрографа, высота приемника по направлению дисперсии, доступная длина дифракционной решетки. Исходя из расчетного значения увеличения оптической системы прибора, полученного на основе базовых параметров, предложены рекомендации по выбору принципиальной схемы спектрографа.

Ключевые слова: *инструменты: спектрографы*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи повышением требований к спектральным приборам, используемым в том числе в астрономии, появляется потребность в создании формализованных методик и алгоритмов для их расчетов. В особенности это важно для начинающих специалистов: в то время как опытные инструменталисты опираются в своих разработках на собственный опыт и интуицию, для начинающих было бы полезно иметь формализованную методику, которая поэтапно подскажет направление в выборе верной базовой концепции спектрографа и позволит избежать грубых ошибок. Настоящая статья представляет методику базового расчета и выбора концепции астрономического спектрографа. Методика разработана с учетом собственного опыта авторов в расчетах и оптимизации призменных, дифракционных и гибридных спектрографов для различных астрономических спектральных приборов (см., например, [1–3]).

Одним из основных параметров спектрального прибора является спектральное разрешение, достигаемое одним или несколькими дисперсионными элементами в составе данного инструмента [4–9]. Достижение высокого спектрального разрешения является главной задачей при расчете спектрографа. На итоговые характеристики

инструмента влияет как выбор принципиальной схемы, так и выбор дисперсионных компонентов. Не менее важной характеристикой спектрального прибора является его световая эффективность в рабочем спектральном диапазоне. Эта характеристика также зависит от принципиальной схемы и выбора дисперсионных компонентов, но, помимо этого, для достижения оптимальной световой эффективности необходимо учитывать согласование узлов прибора между собой и самого инструмента в целом с тем источником света, с которым он работает. Также световую эффективность обеспечивает правильный выбор типов силовых компонентов и материала, из которого они изготовлены. Статья сфокусирована на методе, позволяющем рассчитать основные параметры компонентов спектрографа, выбрать принципиальную схему и оценить ее реализуемость.

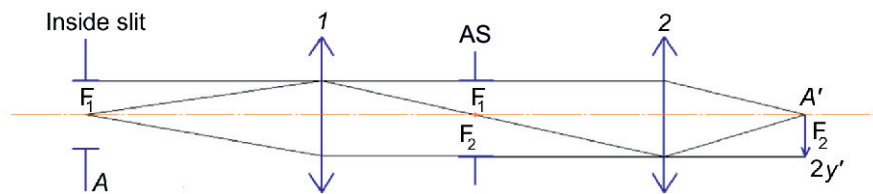
### 2. ВЫБОР ОСНОВНОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Принципиально любой спектральный прибор имеет в своей конструкции три базовых узла: коллиматор, дисперсионный компонент и проекционную камеру (см. рисунок).

Имея базовую схему, можно определить, возможно ли достижение высокого спектрального разрешения на основе выбранного дисперсионного компонента.

\*E-mail: [dasazonenko@itmo.ru](mailto:dasazonenko@itmo.ru)

\*\*E-mail: [bakholdin@aco.ifmo.ru](mailto:bakholdin@aco.ifmo.ru)



Принципиальная схема спектрального прибора: 1 — коллиматор, 2 — проекционная камера, AS — дисперсионный элемент, расположенный на апертурной диафрагме.

Рассмотрим вариант спектрографа с призмой. Разрешающая сила спектральных приборов с призмой определяется по следующей формуле:

$$R = T \frac{dn}{d\lambda},$$

где  $T$  — суммарная длина оснований всех призм вдоль направления хода луча;  $\frac{dn}{d\lambda}$  — дисперсия вещества призмы. Технологический предел размера призмы по основанию составляет 250 мм. При использовании одиночной призмы из стекла РВМ2У как наиболее светлого в рабочем спектральном диапазоне (минимум 0.997 для 10 мм) и с одним из наибольших показателей дисперсии ( $n_F - n_C = 0.017$ ), предельное теоретическое спектральное разрешение прибора составит  $R = 25\,000$ , что не удовлетворяет условию высокого спектрального разрешения. Если взять четыре такие призмы для достижения предельного теоретического спектрального разрешения  $R = 100\,000$ , дисперсия, даваемая первой призмой, вынудит использовать вторую призму большего размера, что превышает технологический предел изготовления такого спектрального элемента. Следовательно, достижение высокого спектрального разрешения спектрографом на базе призмного дисперсионного элемента как основного невозможно.

Рассмотрим вариант спектрографа с дифракционной решеткой. В этом случае предельная разрешающая способность дифракционной решетки определяется следующей формулой:

$$R = \frac{x_0 \sin \varphi'}{\lambda},$$

где  $x_0$  — длина решетки;  $\varphi'$  — угол дифракции решетки;  $\lambda$  — длина волны, на которой определяется спектральное разрешение. Возьмем дифракционную решетку размером 200 мм с углом дифракции  $30^\circ$  и оценим разрешение такой схемы на длине волны 500 нм. Разрешение данной схемы составит  $R = 200\,000$ . Отсюда можно сделать вывод, что использование дифракционной решетки даст нам возможность достичь высокого спектрального

разрешения. Однако это значение справедливо для точечного источника света, в реальном же спектрографе входная щель имеет физический размер.

Нами было рассмотрено понятие спектрального разрешения с точки зрения физических параметров дисперсионных компонентов. В общем виде формула спектрального разрешения прибора выглядит следующим образом:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны, на которой производится оценка спектрального разрешения;  $\Delta\lambda$  — предельное приращение длины волны, при котором мы можем различить две близкие спектральные линии. С одной стороны, предел приращения длины волны ограничен характеристиками используемого спектрального компонента в приборе, с другой стороны, он может быть ограничен размером пиксела приемника либо размером изображения входной щели на приемнике, кратным размеру пиксела.

Рассмотрим спектральное разрешение с точки зрения формирования изображения входной щели на приемнике. Предположим, что размер пиксела приемника составляет 15 мкм, а высота приемника 60 000 мкм. С учетом дискретизации в 1 пиксел оценим максимальное спектральное разрешение, которое можно получить на таком приемнике, если использовать один дисперсионный элемент и заполнить спектром весь приемник по высоте. Рассчитаем значение  $\Delta\lambda$  при такой дискретизации. Примем за рабочий спектральный диапазон видимую область спектра 400–750 нм, т.е. исследуем участок спектра шириной 350 нм. Так как приемник заполнен по всей высоте, то, зная дискретизацию, можно рассчитать, что исследуемый спектр разбивается на 4000 частей. Таким образом, предельное приращение  $\Delta\lambda$  ограничивается размером пиксела и составляет 0.0875 нм, а наибольшее спектральное разрешение составит  $R = 8571$  на длине волны 750 нм. В этом случае формула для оценки спектрального разрешения выглядит следующим образом:

$$R = \frac{\lambda L}{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) l'}, \quad (2)$$

где  $L$  — длина спектральной линии (высота приемника);  $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$  — ширина исследуемого спектрального диапазона;  $l'$  — величина дискретизации на приемнике (размер монохроматического изображения входной щели).

Используя формулу (2), можно определить, при каком значении  $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$  можно достичь разрешения  $R = 100\,000$  на краях рабочего спектрального диапазона при использовании указанного приемника. Так, для 750 нм  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = 30$  нм, а для 400 нм  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = 16$  мкм, что значительно ниже диапазона исследования. Это приводит к необходимости либо уменьшить одновременно регистрируемый спектральный диапазон, либо использовать схему с перекрестной дисперсией. Требуется определить параметр, который на основании базовых входных данных поможет определить принципиальную схему спектрографа, либо показать реализуемость желаемой принципиальной схемы. Также нужно привести методику сквозного расчета основных параметров компонентов спектрографа на основании базовых входных данных для любой принципиальной схемы спектрографа.

### 3. ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОГРАФА НА ОСНОВАНИИ БАЗОВЫХ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

В качестве базовых входных данных для расчета берутся следующие параметры:

- желаемое спектральное разрешение  $R$ ;
- доступная длина дифракционной решетки  $L_{\text{grat}}$ ;
- входная апертура спектрографа  $A$ ;
- требуемый спектральный диапазон  $\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ ;
- высота приемника по направлению дисперсии  $L$ .

#### 3.1. Определение увеличения оптической системы спектрографа

Исходя из определения спектрального разрешения (1), можно выразить предельное спектральное приращение  $d\lambda$  следующим образом:

$$d\lambda = \frac{\lambda_{\max}}{R}. \quad (3)$$

Предельное линейное приращение спектра  $dl$  будет определяться шириной монохроматического изображения входной щели на приемнике  $l' = l\beta$ , следовательно

$$dl = l\beta, \quad (4)$$

где  $l$  — ширина входной щели спектрографа,  $\beta$  — увеличение оптической системы спектрографа.

Исходя из уравнений (3) и (4), линейная дисперсия  $\frac{dl}{d\lambda}$  может быть определена выражением:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{l\beta R}{\lambda_{\max}}. \quad (5)$$

Если мы рассчитываем оптическую систему спектрографа так, чтобы исследуемый спектральный диапазон занял весь приемник по высоте, то очевидно, что произведение линейной дисперсии и отношения спектральной ширины исследуемого диапазона к высоте приемника будет равно 1, следовательно, справедливо следующее равенство:

$$\frac{dl}{d\lambda} \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{L} = 1. \quad (6)$$

Подставив выражение (5) в уравнение (6), получаем

$$\frac{l\beta R (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{\lambda_{\max} L} = 1.$$

Преобразуем это уравнение и выразим  $\beta$ :

$$\beta = \frac{L}{lR \left(1 - \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}\right)}. \quad (7)$$

Значение  $l$  может быть определено, исходя из параметров телескопа, либо исходя из задачи прибора, по следующей формуле:

$$l = \frac{\omega D_T}{A'}, \quad (8)$$

где  $\omega$  — угловой размер исследуемого объекта;  $D_T$  — диаметр главного зеркала;  $A'$  — выходная апертура телескопа. В то же время значение  $l$  должно быть не ниже  $l = \frac{1.13\lambda_{\max}}{A}$ , согласно функции рассеяния линии. При использовании входной щели меньшего размера возрастают потери света, связанные с дифракцией на щели без существенного увеличения спектрального разрешения. Если исходное значение  $l$  не определено, то для достижения требуемого спектрального разрешения необходимо брать его равным минимально допустимому. В этом случае система будет иметь более простые силовые компоненты. При расчете спектрографа с такой щелью выражение (7) приобретает следующий вид:

$$\beta = \frac{LA}{1.13R (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}. \quad (9)$$

Если после первичного расчета  $\beta = 1$ , возможно использование автоколлимационной схемы. Если  $\beta < 1$ , необходимо рассчитывать разноплечевую схему спектрографа с требуемым увеличением.

Если  $\beta > 1$ , можно рассчитывать разноплечевую схему спектрографа, либо использовать автоколлимационную схему с расширением спектрального диапазона или увеличенным разрешением. Если  $\beta \leq 0.2$ , то достижение требуемого спектрального разрешения затруднено или невозможно в связи с большим значением относительного отверстия на проекционной камере. В этом случае необходимо рассчитывать схему с перекрестной дисперсией, в которой требуется пересчитать значение  $\beta$ , исходя из уменьшенного спектрального диапазона, который при дальнейшем расчете дифракционной решетки будет соответствовать наиболее длинноволновому порядку спектра.

#### 4. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОГРАФА

Полученное значение  $\beta$  также определяет соотношение фокусного расстояния коллиматора и фокусного расстояния проекционной камеры следующим образом:

$$\beta = \frac{f'_{\text{cam}}}{f'_{\text{coll}}}. \quad (10)$$

##### 4.1. Расчет угла блеска решетки

Как было описано выше,  $\frac{dl}{d\lambda} = \frac{l\beta R}{\lambda_{\text{max}}}$ . В то же время линейную дисперсию можно выразить из уравнения дифракционной решетки:

$$k\lambda N = \sin \varphi + \sin \varphi'. \quad (11)$$

Продифференцируем уравнение решетки:

$$kN d\lambda = \cos \varphi' d\varphi'. \quad (12)$$

Получаем угловую дисперсию решетки:

$$\frac{d\varphi'}{d\lambda} = \frac{kN}{\cos \varphi'}. \quad (13)$$

В режиме автоколлимации:

$$\varphi = \varphi'; \Rightarrow kN = \frac{2 \sin \varphi'}{\lambda}. \quad (14)$$

Подставляя значение  $kN$  из уравнения (14) в формулу угловой дисперсии (13), получаем:

$$\frac{d\varphi'}{d\lambda} = \frac{2 \operatorname{tg} \varphi'}{\lambda}. \quad (15)$$

Значение угловой и линейной дисперсии связаны через фокус проекционной камеры следующим образом:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi'}{d\lambda} f'_{\text{cam}}. \quad (16)$$

Подставив в выражение (16) значение  $\frac{d\varphi'}{d\lambda}$  из уравнения (15), получим:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi') f'_{\text{cam}}}{\lambda_{\text{max}}}. \quad (17)$$

Так как в выражениях (5) и (17) определяется линейная дисперсия двумя разными способами, справедливо равенство:

$$\frac{l\beta R}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi') f'_{\text{cam}}}{\lambda_{\text{max}}}. \quad (18)$$

Выразим спектральное разрешение:

$$R = \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi') f'_{\text{cam}}}{l\beta}. \quad (19)$$

Согласно формуле (9), получаем:

$$R = \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi') f'_{\text{coll}}}{l}. \quad (20)$$

Таким образом, мы выразили спектральное разрешение через два искоемых параметра  $\varphi'$  и  $f'_{\text{coll}}$ .

Длину дифракционной решетки можно выразить относительно диаметра коллимированного пучка  $D_{\text{coll}}$  как  $L_{\text{grat}} = \frac{D_{\text{coll}}}{\cos \varphi'}$ . В то же время  $D_{\text{coll}} = 2A f'_{\text{coll}}$ , следовательно:

$$L_{\text{grat}} = \frac{2A f'_{\text{coll}}}{\cos \varphi'}. \quad (21)$$

Так как в выражениях (20) и (21) есть две неизвестные величины —  $\varphi'$  и  $f'_{\text{coll}}$ , для их нахождения можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} R = \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi') f'_{\text{coll}}}{l}, \\ L_{\text{grat}} = \frac{2A f'_{\text{coll}}}{\cos \varphi'}. \end{cases} \quad (22)$$

Выразим  $f'_{\text{coll}}$  из второго уравнения системы и подставим в первое. После преобразований получим:

$$R = \frac{\sin(\varphi') L_{\text{grat}}}{A l}.$$

Выразим  $\varphi'$ :

$$\varphi' = \sin^{-1} \left( \frac{R A l}{L_{\text{grat}}} \right). \quad (23)$$

Таким образом, находим угол блеска решетки.

#### 4.2. Расчет фокусного расстояния коллиматора и проекционной камеры

Подставив значение угла блеска, найденное в соотношении (23), во второе уравнение системы (22) и выразив фокусное расстояние коллиматора, найдем его по следующей формуле:

$$f'_{\text{coll}} = \frac{L_{\text{grat}} \cos \varphi'}{2A}. \quad (24)$$

Далее, согласно (10), найдем фокусное расстояние проекционной камеры:

$$f'_{\text{cam}} = \beta f'_{\text{coll}}. \quad (25)$$

#### 4.3. Определение частоты дифракционной решетки и рабочего спектрального порядка

Для сохранения высокой эффективности дифракционной решетки, использующейся для достижения высокого спектрального разрешения, такая решетка должна работать в режиме автоколлимации или близком к нему. В этом случае уравнение дифракционной решетки принимает следующий вид:

$$2n \sin \varphi' = k\lambda N,$$

где  $n$  — показатель преломления среды, в которой работает отражательная дифракционная решетка;  $k$  — порядок спектра, на котором выделяется расчетная длина волны  $\lambda$ ;  $N$  — частота дифракционной решетки.

В данной формуле  $\lambda = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{2}$ , то есть она является средней длиной волны исследуемого диапазона. Расчет  $N$  должен проводиться таким образом, чтобы значение  $k$  было целым числом для средней длины волны. Соблюдение этого условия позволит дифракционной решетке работать в режиме автоколлимации для средней длины волны и минимизирует дифракционные потери на краях исследуемого диапазона [10]. Также необходимо проверять полученное значение  $N$  на технологичность изготовления.

Для схемы с перекрестной дисперсией значение частоты дифракционной решетки необходимо рассчитывать так, чтобы средние длины волн всех порядков исследуемого спектрального диапазона соответствовали целому значению каждого из этих порядков.

После расчета параметров  $N$  и  $k$  необходимо провести проверку на переналожение исследуемого спектрального диапазона соседних порядков спектра дифракционной решетки. Из выражения (11) можно составить следующие соотношения: (26) — условие неналожения длинноволновой области спектрального диапазона предыдущего порядка спектра на коротковолновую область

рабочего порядка и (27) — условие неналожения коротковолновой области спектрального диапазона на следующего порядка спектра на длинноволновую область рабочего порядка:

$$\frac{k}{k-1} > \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}}, \quad (26)$$

$$\frac{k+1}{k} > \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}}. \quad (27)$$

### 5. РАСЧЕТ ЗВЕЗДНОГО СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Основные требования к спектрометру:

- спектральное разрешение  $R = 100\,000$ ;
- входная апертура  $A = 0.04$ ;
- рабочий спектральный диапазон 400–750 нм;
- ширина входной щели  $l = 168$  мкм;
- приемник размером  $60 \times 60$  мм с пикселем 13.5 мкм.

Для расчета спектрометра необходимо использовать сборку двух дифракционных решеток суммарной длиной  $L_{\text{grat}} = 800$  мм. Угол блеска дифракционной решетки  $\varphi' = 75^\circ 5'$ , частота —  $N = 37.5$  линии/мм.

В данном случае известны все базовые входные параметры спектрометра, а так же зафиксированы основные характеристики дифракционной решетки. Необходимо оценить возможность достижения требуемого спектрального разрешения, выразив  $R$  из соотношения (23). Получим:

$$R = \frac{\sin(\varphi') L_{\text{grat}}}{Al} = 115\,255.$$

Расчет показал, что при имеющихся входных данных и при использовании эшелле-решетки с обозначенными характеристиками возможно достижение спектрального разрешения  $R = 100\,000$ .

Далее необходимо определить принципиальную схему прибора. Для этого рассчитаем увеличение системы, необходимое для достижения требуемого спектрального разрешения при условии использования одиночной дисперсии, при этом  $\lambda_{\text{max}} = 750$  нм,  $\lambda_{\text{min}} = 400$  нм:

$$\beta = \frac{L}{l R \left(1 - \frac{\lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{max}}}\right)} = 0.008^x.$$

Полученное значение увеличения меньше допустимого  $0.2^x$ , значит, нужно применять схему

с перекрестной дисперсией. Так как спектральный порядок, присущий наиболее длинноволновому спектральному диапазону, является самым широким, необходимо использовать именно его при расчете основных параметров спектрометра. Можно определить минимальную длину волны порядка, выразив  $\lambda_{\min}$  из уравнения (7), и использовать значение увеличения больше  $0.2^x$ , но так как известны параметры решетки, можно точно определить  $\lambda_{\min}$  через разницу волновых чисел следующим образом:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}}. \quad (28)$$

В то же время

$$\Delta\nu = \frac{N}{2 \sin \varphi'}, \quad (29)$$

Приравняв правые части выражений (28) и (29) и выразив  $\lambda_{\min}$ , получим:

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{\frac{N}{2 \sin \varphi'} + \frac{1}{\lambda_{\max}}} = 739.3 \text{ нм.}$$

Рассчитаем увеличение системы, необходимое для достижения требуемого спектрального разрешения при условии использования одиночной дисперсии, при этом  $\lambda_{\max} = 750 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\min} = 739.3 \text{ нм}$ :

$$\beta = \frac{L}{lR \left(1 - \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}\right)} = 0.22^x.$$

Полученное значение увеличения показывает реализуемость спектрометра.

Рассчитаем фокусы силовых компонентов:

$$f'_{\text{coll}} = \frac{L_{\text{grat}} \cos \varphi'}{2A} = 2500 \text{ мм};$$

$$f'_{\text{cam}} = f'_{\text{coll}} \beta = 541 \text{ мм.}$$

Определим порядок спектра для длины волны 750 нм:

$$k = \frac{2 \sin \varphi'}{N \lambda_{\max}} = 68.84.$$

Так как значение порядка не целое, длина волны 750 нм не будет приходиться в центр приемника, но будет содержаться в 69-м порядке спектра. В этом случае 69-й порядок спектра будет включать в себя неисследуемый диапазон.

Определим порядок спектра для длины волны 400 нм:

$$k = \frac{2 \sin \varphi'}{N \lambda_{\min}} = 129.$$

Общее число спектральных порядков, приходящих на приемник, равно 60, из чего можно рассчитать максимальную высоту входной щели. При условии пространственного разведения порядков, равного 1/10 высоты щели, максимальная высота входной щели составляет 900 мкм.

Проверим условие наложения соседних порядков спектра для рабочего спектрального диапазона 739.3–750 нм:

$$\frac{k}{k-1} = 1.0147; \quad \frac{k+1}{k} = 1.0149; \quad \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = 1.0145.$$

Переналожение отсутствует, это справедливо для всех рабочих порядков спектра.

Расчетные параметры основных компонентов спектрографа близки по своим значениям к параметрам строящегося эшелле-спектрографа высокого спектрального разрешения [11] для 6-м телескопа САО РАН. Данный факт свидетельствует о том, что полученные соотношения верны, а предложенная методика позволяет найти однозначное согласованное решение для спектрографа.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из уравнения (7), можно рассчитать требуемое увеличение оптической системы спектрографа на основе базовых входных данных. Значения увеличения позволяют выбрать предпочтительную принципиальную схему спектрографа, а так как в формуле фигурируют основные характеристики прибора, можно легко определить, какой базовый параметр следует изменить для достижения требуемого результата.

Также были выведены соотношения, позволяющие рассчитать параметры основных компонентов спектрографа, построенного на базе плоской отражательной дифракционной решетки для оценки его реализуемости. В формулах фигурирует минимальное количество основных параметров спектрографа, что упрощает расчет и дает однозначное решение для определенного набора входных параметров, кроме значения частоты дифракционной решетки  $N$ , которую необходимо рассчитывать с учетом технологичности изготовления решетки и соблюдения условия неналожения рабочего спектрального диапазона из соседних порядков спектра.

Так как все астрономические спектрографы имеют одинаковый набор основных параметров и одинаковые типы компонентов, предложенная методика может быть использована для расчета любых принципиальных схем астрономических спектрографов как с линейной дисперсией, так и с перекрестной, построенных на плоской отражательной дифракционной решетке.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
2. V. N. Vasilyev, D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, et al., *Optical Review* **23**, 878 (2016).
3. D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, A. V. Bakholdin, and G. G. Valyavin, *ASP Conf. Ser.* **510**, 546 (2017).
4. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский, *Техника и практика спектроскопии* (Наука, Москва, 1976).
5. Г. С. Ландсберг, *Оптика* (Наука, Москва, 1976).
6. Г. Г. Слюсарев, *Методы расчета оптических систем*, 2-е изд. (Машиностроение, Ленинград, 1968).
7. К. И. Тарасов, *Спектральные приборы* (Машиностроение, Ленинград, 1977).
8. И. В. Пейсахсон, *Оптика спектральных приборов* (Машиностроение, Ленинград, 1975).
9. М. И. Апенко, А. С. Дубовик, *Прикладная оптика* (Наука, Москва, 1971).
10. А. А. Заглубский, Н. М. Цыганенко, А. П. Чернова, *1. Основы оптических измерений: Пособие* (Соло, Санкт-Петербург, 2007).
11. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).

## Computation of Astronomical Spectrograph Based on a Flat Reflective Diffraction Grating

**D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, O. A. Voznesenskaya, and A. V. Bakholdin**

A technique for computing the spectrograph for astrophysical studies based on the basic input and output parameters of the optical system. In the framework of the proposed technique, it is possible to determine the main properties of the spectrograph components: the focal length of the collimator, the focal length of the projection camera, the blaze angle of the grating, the frequency of the grating. The following parameters are used as the basic ones: the required spectral resolution, the spectral range studied, the spectrograph entrance aperture, the height of the detector in the direction of dispersion, and the available length of the diffraction grating. Recommendations are proposed on the choice of the schematic of the spectrograph based on the computed magnification in the optical system of the device inferred from the basic parameters.

Keywords: *instrumentation: spectrographs*