

# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.7:520.2

DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-173-182

## Исследование телескопической системы с трехступенчатой сменой увеличения и стабильным положением выходного зрачка

*Т. Н. Хацевич<sup>1\*</sup>, Е. В. Шмелев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Оптическое расчетное бюро», г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: khatsevich@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены оптические телескопические системы с дискретной сменой увеличения, в которых удаление выходного зрачка составляет  $1/4$ – $1/3$  от общей длины самой системы. Такие системы могут быть положены в основу оптических прицелов с дискретной сменой увеличения. Отмечены проблемы, возникающие при трехступенчатой смене увеличения, связанные с необходимостью обеспечивать стабильное положение выходного зрачка при смене увеличения, сложностью реализации внутренней выверки, при соблюдении массогабаритных ограничений, присущих этому типу оптических приборов. Комплексное решение указанных проблем должно закладываться на схемотехническом уровне и основываться на поиске принципиальной структурной оптической схемы, ее моделировании и определении области решений, позволяющих при переходе к конечным апертурам и толщинам обеспечить высокое качество изображения. Научная гипотеза заключается в том, что включение в структуру оптической телескопической системы внутренней поворотной афокальной системы позволяет реализовать трехступенчатую смену увеличения, обеспечив неизменность положения выходного зрачка при смене увеличения, внутреннюю выверку и конкурентоспособные характеристики оптической системы изделия в целом. Цель статьи: представить результаты анализа схемного решения в параксиальном приближении, определить области решений, обеспечивающие наименьшие относительные отверстия компонентов схемы при введенных габаритных ограничениях на длину системы, диаметры компонентов и удаление выходного зрачка. Методы исследования включают аналитические методы геометрической оптики, теории оптических приборов, методы компьютерного дизайна оптических систем. Результаты исследования подтверждаются разработкой оптической системы со сменными увеличениями 1, 3 и 9 крат с удалением выходного зрачка 80 мм при длине системы в 250 мм.

**Ключевые слова:** телескопические системы, параксиальное моделирование, выходной зрачок, трехступенчатая смена увеличения, дискретная смена увеличения

### *Введение*

На текущий момент развитие визуальных прицельных систем для носимого оружия претерпевает новый виток развития, связанный с разработкой систем с дискретной сменой увеличения. Первичные образцы таких систем представлены зарубежной компанией [1] в начале этого века. Основным достоин-

ством систем с дискретной сменой увеличения является возможность применения в условиях, когда требуется адаптация под изменяющиеся условия путем быстрой смены увеличения и, соответственно, поля зрения. Скорость смены оптических характеристик обеспечивается набором дискретных положений компонентов без необходимости выдерживать промежуточные положения [2]. Прицелы

с дискретной сменой увеличения являются штатным оборудованием для ряда современных образцов вооружения [3, 4].

Актуальной задачей можно считать расширение номенклатуры и функциональности такого типа устройств, а также проведение исследований по улучшению их технических и эксплуатационных характеристик. Известная система с трехступенчатой дискретной сменой увеличения [5, 6] имеет ряд недостатков, которые, по мнению авторов, могут быть устранены на этапе выбора схемного решения и структурного синтеза системы.

Предметом исследования являются телескопические системы оптических прицелов с дискретной сменой увеличения. Отмечены проблемы, возникающие при трехступенчатой смене увеличения, связанные с необходимостью обеспечивать стабильное положение выходного зрачка при смене увеличения, сложностью реализации внутренней выверки, при соблюдении массогабаритных ограничений, присущих этому типу оптических приборов. Комплексное решение указанных проблем должно закладываться на схемотехническом уровне и быть основанным на поиске принципиальной структурной оптической схемы, ее моделировании и определении области решений, позволяющих при переходе к конечным апертурам и толщинам обеспечить высокое качество изображения.

Научная гипотеза заключается в том, что включение в структуру оптической телеско-

пической системы внутренней поворотной афокальной системы позволяет реализовать трехступенчатую смену увеличения, обеспечив неизменность положения выходного зрачка при смене увеличения, внутреннюю выверку и конкурентоспособные характеристики оптической системы изделия в целом. Исследование направлено на выявление особенностей расчета выбранного схемного решения и поиск путей улучшения характеристик. Цель статьи: представить результаты анализа схемного решения в параксиальном приближении, определить области решений, обеспечивающие наименьшие относительные отверстия компонентов схемы при введенных габаритных ограничениях на длину системы, диаметры компонентов и удаление выходного зрачка.

Методы исследования: аналитические методы геометрической оптики и теории оптических приборов, методы компьютерного дизайна оптических систем.

### Схемное решение с однокомпонентным окуляром

Предложенное на рис. 1 схемное решение, позволяющее обеспечить трехступенчатую смену увеличения, основывается на применении в схеме поворотной афокальной системы галилеевского типа, устанавливаемой между компонентами оборачивающей системы.

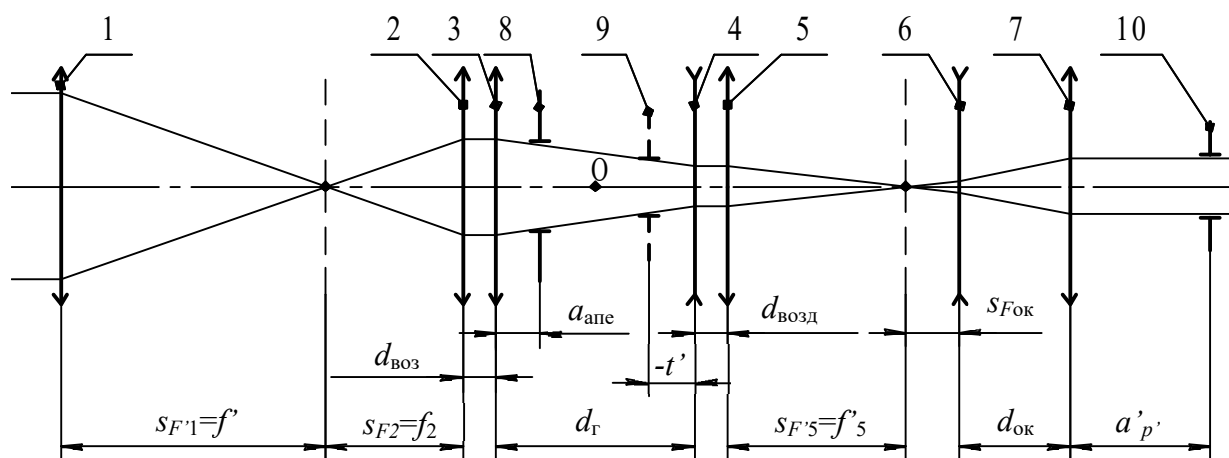


Рис. 1. Принципиальная схема телескопической системы с трехступенчатым увеличением:

1 – объектив; 2, 5 – компоненты оборачивающей системы; 3, 4 – компоненты поворотной системы смены увеличения; 6, 7 – компоненты окуляра; 8 – апертурная диафрагма; 9 – выходного зрачка системы Галилея; 10 – выходной зрачок

Объектив 1, оборачивающая система 2, 5 и окуляр 6, 7 образуют телескопическую систему, построенную по принципу схемы с двухкомпонентной оборачивающей системой с параллельным ходом осевого пучка лучей между компонентами оборачивающей системы. Компонент 6 окуляра имеет отличную от нуля оптическую силу только для случая

$$\gamma_{\max} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3; \gamma_{\text{ср}} = \sqrt{\gamma_{\max} \cdot \gamma_{\min}}; \gamma_{\min} = \gamma_1 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_2^{-1}; \gamma_2 = \sqrt{\gamma_{\max} \cdot \gamma_{\min}^{-1}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{\max}$  – максимальное увеличение системы;  $\gamma_{\text{ср}}$  – промежуточное увеличение системы;  $\gamma_{\min}$  – минимальное увеличение системы;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – увеличение соответствующих афокальных подсистем.

Возможность осуществления внутренней выверки обеспечивается тем, что сетка с визирными знаками расположена в плоскости первого промежуточного изображения и смена увеличения не оказывает влияния на направление визирной линии [7, 8].

Принципиально стабильность положения выходного зрачка в каждой из ступеней увеличения обеспечивается тем, что в афокальной поворотной системе при расчете закладывается равенство расстояний от оси поворота до плоскостей входного и выходного зрачков, а при выводе афокальной системы из хода лучей предусматривается проекционная связь между плоскостью оправы объектива и плоскостью 9, указанной на рис. 1.

$$t' = -t = -\frac{\gamma_2 \cdot d_{\Gamma}}{\gamma_2^2 + 1}; f'_3 = \frac{\gamma_2 \cdot d_{\Gamma}}{\gamma_2 - 1}; f'_4 = -\frac{f'_3}{\gamma_2}; a_{\text{апер}} = \frac{d_{\Gamma}}{\gamma_2 + 1}. \quad (2)$$

Далее проводится расчет компонентов третьей телескопической системы, включающей компонент 5 и окуляр 7. На первом этапе поиска области предпочтительных решений предлагается задаться фокусным расстоянием окуляра  $f'_{\text{ок}}$ . Из условия проекционной связи выходного зрачка поворотной системы и выходного зрачка всей системы при заданном фокусном расстоянии окуляра определяется фокусное расстояние  $f'_5$  компонента 5. По-

двухкомпонентного окуляра. Между компонентами оборачивающей системы 2, 5 размещается афокальная система 3, 4, ось поворота которой  $O$  перпендикулярна оптической оси телескопической системы. Такое схемное решение позволяет реализовать три ступени увеличения, между значениями которых имеют место соотношения:

Исходными данными для расчета обычно выступают такие характеристики, как набор увеличений системы  $\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$ ; диаметр входного зрачка  $D_{\text{вх}}$ ; удаление выходного зрачка  $a'_{p'}$ ; угловое поле системы за окуляром  $2\omega'$  или в пространстве предметов.

Вне зависимости от схемы окуляра, расчет системы начинается с расчета поворотной системы смены увеличения, который строится таким образом, чтобы положение выходного зрачка внутри системы оставалось постоянным при ее повороте вокруг центра поворота [9]. На этом этапе задаются длиной поворотной системы  $d_{\Gamma}$  и определяют фокусные расстояния компонентов поворотной системы  $f'_3$  и  $f'_4$ , положение зрачков внутри системы  $t = -t'$ , положение апертурной диафрагмы внутри системы  $a_{\text{апер}}$ . Выражения описывают соотношения между указанными характеристиками поворотной афокальной системы:

скольку в системе с двухкомпонентным окуляром удаление выходного зрачка обеспечивается комбинацией оптических сил компонентов при любом фокусном расстоянии окуляра, то увеличение  $\gamma_3$  может варьироваться в отличие от системы с однокомпонентным окуляром. Для рассматриваемого случая при заданном  $f'_{\text{ок}}$  и положении выходного зрачка системы смены увеличения, фокусное расстояние компонента 5 определяется выражением:

$$f'_5 = \frac{-f'^2_{ок} \pm \sqrt{f'^2_{ок} \cdot (4t' \cdot (f'_{ок} - a'_{p'}) + f'^2_{ок} + 4d_{возд} \cdot (f'_{ок} - a'_{p'}))}}{2(f'_{ок} - a'_{p'})}, \quad (3)$$

где  $d_{возд}$  – воздушные промежутки вдоль оси в соответствии с рис. 1.

Выражение (3) имеет действительные корни в случае, если выполняются условия:

$$\begin{cases} f'_{ок} \neq a'_{p'} \\ f'_{ок} > 2 \cdot \left( \sqrt{t'^2 - t' \cdot (2 \cdot d_{возд} + a'_{p'}) + d^2_{возд} + a'_{p'} \cdot d_{возд} + t' - d_{возд}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Принципиальный вид выражений для фокусных расстояний объектива 1 и компонента 2 определяются однозначно и не зависят от фокусного расстояния окуляра. Опуская алгебраические преобразования, можно записать выражения, определяющие фокусные расстояния объектива 1 и компонента 2:

$$f'_1 = \frac{d_{\Gamma} \cdot \gamma_1^2 \gamma_2}{(\gamma_1 - 1)(\gamma_2^2 + 1)} - \frac{\gamma_1^2 (d_{\Gamma} + d_{возд})}{\gamma_1 - 1}; \quad f'_2 = \frac{\gamma_1 (d_{\Gamma} + d_{возд})}{\gamma_1 - 1} - \frac{d_{\Gamma} \cdot \gamma_1 \gamma_2}{(\gamma_1 - 1)(\gamma_2^2 + 1)}. \quad (5)$$

Из выражений (1)–(4) следует, что в схеме с однокомпонентным окуляром, во-первых, для достижения больших значений удалений выходного зрачка требуются увеличивать фокусное расстояние окуляра, что приводит к увеличению длины системы в целом; во-вторых, угловые увеличения афокальных подсистем определяются однозначно, что исключает возможность регулирования относительных отверстий компонентов в процессе расчета.

### **Схемное решение с двухкомпонентным окуляром**

Ранее отмечалась принципиальная особенность системы с двухкомпонентным окуляром – возможность обеспечения удаления зрачка за счет комбинации оптических сил компонентов окуляра, что позволяет рассматривать различные сочетания увеличений  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$ . Предполагается, что существует область решений, в которой система с двухкомпонентным окуляром позволяет обеспечить лучшие относительные отверстия компонентов 1–5 и меньшую длину. Двухкомпонентный окуляр (далее названный телеокуляром) представлен на рис. 1 и

состоит из отрицательного компонента 6 и положительного компонента 7. Помимо исходных данных на данном этапе расчета необходимо задаться длиной поворотной системы смены увеличения, фокусным расстоянием окуляра и увеличением  $\gamma_1$  или  $\gamma_3$ . Положение компонентов телеокуляра при заданном фокусном расстоянии окуляра оказывает непосредственное влияние только на собственные относительные отверстия компонентов и, как следствие, не учитываются. Ограничения, накладываемые на длину поворотной системы, определяются габаритными соображениями, а распределение увеличений  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$  выбирается из стремления обеспечения минимальных относительных отверстий компонентов.

Воспользовавшись формулами, приведенными в [10], и опуская алгебраические преобразования, можно записать формулы для вычисления оптической силы первого компонента окуляра  $\Phi_6$ , второго компонента окуляра  $\Phi_7$ , расстояния между компонентами  $d_{ок}$ , а также фокусного расстояния компонента 2 оборачивающей системы:

$$f'_5 = -\frac{\gamma_3}{f'_{ок}}; \quad c = 1 - a_F \Phi_{ок};$$

$$\Phi_6 = \frac{a'_{p'} \Phi_{ок} (1 - c + a_{p1} \cdot \Phi_{ок}) - a_{p1} \Phi_{ок} + c}{a'_{p'} (1 - c) (a_{p1} \cdot \Phi_{ок} - c + 1) - a_{p1}}; \quad \Phi_7 = \Phi_{ок} - \Phi_6 (1 - c); \quad d_{ок} = \frac{c}{\Phi_7},$$

где  $a_{p1} = a_F - \frac{f'_5 (d_{возд} \cdot \gamma_2^2 + d_{\Gamma} \cdot \gamma_2 + d_{возд})}{(f'_5 - d_{возд}) (\gamma_2^2 + 1) - d_{\Gamma} \cdot \gamma_2} - f'_5$ .

Дальнейший поиск области решения основан на сравнительном анализе рассмотренных схемных решений, ориентированных на поиск конфигураций с лучшими относительными отверстиям компонентов 1–5.

### Обсуждение результатов

На основании вышеприведенных соотношений для двух схемных решений можно определить критерии оценивания систем и сравнить полученные системы между собой. Сравнение проводится из обобщенного предположения, что существуют решения с усложненной системой окуляра, которые позволят облегчить синтез и последующую оптимизацию остальной части оптической системы путем уменьшения относительных отверстий компонентов. Для сравнения выбрана система со значением  $f'_{ок}$  однокомпонентного окуляра, соответствующим условию (4). Вариантным моделированием определено, что при фиксированной длине системы с однокомпонентным окуляром относительные отверстия компонентов первой и третьей афокальных подсистем тем выше, чем длиннее поворотная система смены увеличения. Для обсуждения предлагается использовать схему при  $d_{\Gamma} = 25$  мм и  $f'_{ок} = 46$  мм, что удовлетворяет условию (4).

Для случая двухкомпонентного окуляра выбор характеристик становится менее очевидным. Передний фокальный отрезок телескопа является отрицательным, а его изменение оказывает влияние только на относительные отверстия компонентов 6, 7, и в данном сравнении не учитывается. Значение данного параметра определяется в ходе небольшого дополнительного расчета после опреде-

ления возможных распределений увеличений между афокальными подсистемами. В связи с ограничениями на поперечные габаритные размеры системы в среднем положении, длина поворотной системы ограничена значениями от 25 до 35 мм. Также в качестве переменного параметра используется увеличение  $\gamma_3$ , значение которого изменяется от минус 0,75 до минус 1,3 крат.

Анализ всего многообразия возможных систем затруднен ввиду того, что количество возможных изменяемых параметров превышает возможности наглядного представления результатов. Несмотря на то, что фокусное расстояние окуляра также можно использовать в качестве изменяемого параметра, в данном сравнении рассматривается случай  $f'_{ок} = 30$  мм, что, с одной стороны, сужает область решений, а с другой – позволяет рассмотреть достаточно узкую область решений системы, полагая, что она будет расширена с учетом диапазона изменения  $f'_{ок}$ .

Для оценки систем использован критерий относительных отверстий компонентов и длины всей системы. На этапе структурного синтеза значения относительных отверстий компонентов в некоторой степени определяют последующую трудоемкость расчета, количество линз в системе, а также косвенно определяют ряд таких эксплуатационных параметров, как масса и коэффициент пропускания системы. Ввод отрицательного компонента в окуляр считается оправданным, если такое решение позволит уменьшить относительные отверстия компонентов.

Моделирование проводилось для следующих исходных данных:  $D_{вх} = 36$  мм;  $\gamma_{мин} = 1$

крат;  $\gamma_{\text{ср}} = 3$  крат;  $\gamma_{\text{макс}} = 9$  крат;  
 $a'_p = 80$  мм;  $d_{\text{возд}} = 5$  мм,  $2\omega' = 17,5^\circ$ . Пред-  
 ставленный набор характеристик является со-  
 вокупностью характеристик конкурентоспо-  
 собного решения в номенклатуре рассматри-  
 ваемых приборов.

Сравнение проводилось путем моделиро-  
 вания различных конфигураций систем в про-  
 граммном среде Excel, а также определения  
 высот падения первого и второго параксиаль-  
 ного луча. Под относительным отверстием  
 понималось наибольшее отношение удвоен-  
 ной высоты падения луча на компонент к его  
 фокусному расстоянию при рассмотрении  
 всех режимов работы устройства.

Фокусные расстояния компонентов пер-  
 вой афокальной системы и поворотной си-  
 стемы смены увеличения зависят от распре-  
 деления увеличений в системе и длины пово-

ротной системы. Использование окуляра  
 с меньшим фокусным расстоянием, а также  
 использование распределения увеличений  
 как оптимизационного параметра позволяет  
 найти варианты с меньшими относитель-  
 ными отверстиями компонентов и меньшей  
 длиной. Диаграмма на рис. 2 отображает об-  
 ласть решений для диапазона изменения па-  
 раметров системы с двухкомпонентным оку-  
 лярором, в которой длина и относительные от-  
 верстия компонентов меньше, нежели в ба-  
 зовой системе.

На основе предложенной оптической схе-  
 мы, а также исходных данных, ранее приня-  
 тых для моделирования, разработана оптиче-  
 ская система с трехступенчатой дискретной  
 сменой увеличения со стабильным положен-  
 ием выходного зрачка. На рис. 3 приведен  
 ход лучей в разработанной оптической си-  
 стеме.

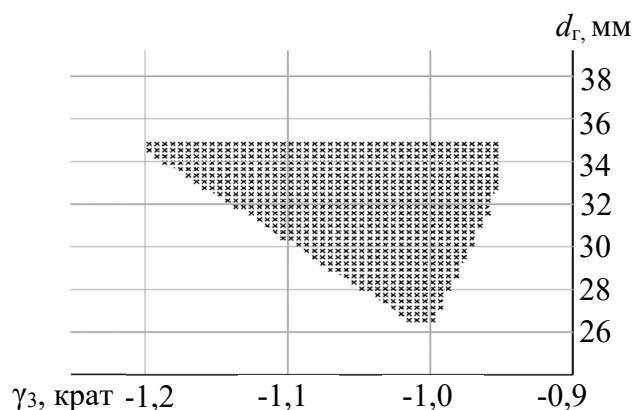


Рис. 2. Область решения для двухкомпонентного окуляра

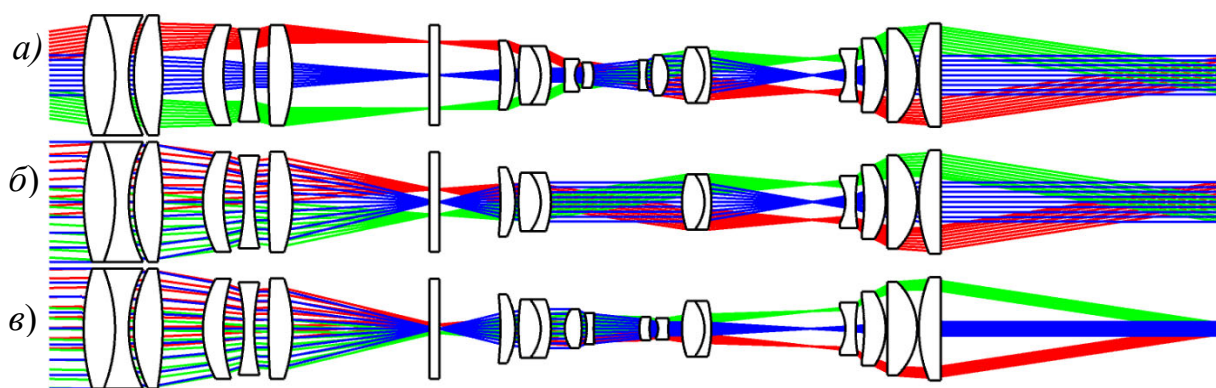


Рис. 3. Ход лучей в оптической системе:

а) при увеличении 1 крат; б) увеличении 3 крат; в) увеличении 9 крат

В общем случае эффект повышения удаления выходного зрачка наблюдается благодаря выносу главных плоскостей окуляра [11]. Вынос главных плоскостей за последнюю поверхность окуляра можно охарактеризовать

$$S'_{p'} = k \cdot f'_{ок} + (f'_5 - d_{возд} + t') \cdot \left( \frac{f'_{ок}}{f'_5} \right)^2. \quad (7)$$

В схеме однокомпонентного окуляра коэффициент  $k$  меньше или равен 1. Для системы, представленной на рис. 3, первый по ходу лучей отрицательный компонент окуляра обеспечивает вынос главных плоскостей за последнюю поверхность окуляра, что позволяет достичь коэффициента окуляра, равного 2.

Оптическая система выполнена без применения сложных нетехнологичных элемен-

тов. Расчетные значения характеристик качества изображения соответствуют требованиям, предъявляемым к визуальным оптическим системам. На рис. 4 приведен график среднеквадратических значений (СКЗ) пятен рассеяния при диаметре выходного зрачка 4 мм и график дисторсии на основной длине волны по приведенным координатам поля для трех ступеней.

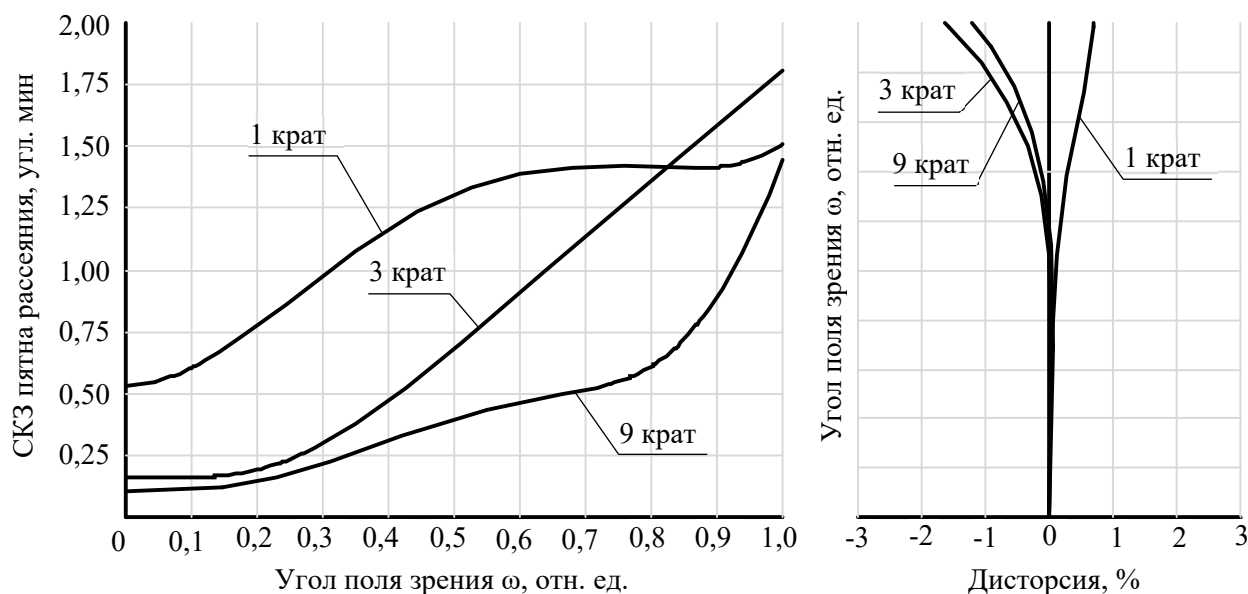


Рис. 4. Полихроматические СКЗ пятен рассеяния по полю и дисторсия для трех ступеней увеличения

Значения СКЗ рассчитаны для длин волн видимого диапазона, дисторсия при увеличениях 3 и 9 крат – менее 3%. Удаление выходного зрачка в каждой из ступеней  $82 \pm 0,5$  мм, что составляет примерно 1/3 от общей длины системы. Расчетные значения характеристик качества изображения соответствуют требованиям, предъявляемым к визуальным оптическим системам, и сопоставимы с характеристиками [12], заявляемыми отечественными авторами [13].

### Заключение

В выводах отмечается следующее.

Для реализации преимуществ, которые открываются при эксплуатации оптических прицелов со сменными полями зрения, необходимы поиск новых схемных решений, которые позволяют сохранять постоянство удаления выходного зрачка при смене увеличения, и разработка методики их рас-

чета. Предложена принципиальная схема построения телескопической системы с трехступенчатой сменой увеличения, основанная на включении в схему поворотной афокальной системы, обеспечивающая удаления выходного зрачка  $1/4 - 1/3$  от общей длины самой системы, значение которого не меняется при смене увеличения.

В работе приводятся соотношения для определения параметров компонентов схемы с учетом габаритных ограничений, позволяющие находить решения с наименьшими относительными отверстиями компонентов, оптимальные с точки зрения перехода на конечные апертуры и толщины.

Анализируется способ повышения удаления выходного зрачка, основанный на применении двухкомпонентного окуляра с первым

по ходу лучей отрицательным компонентом, обеспечивающий вынос задней главной плоскости за последнюю поверхность окуляра (названный в статье телеокуляром). Приводятся области решений, которые могут быть полезны для построения телескопических систем с удалениями выходного зрачка, составляющими  $1/4 - 1/3$  от общей длины самой системы.

Результаты исследования подтверждаются разработкой оптической системы со сменными увеличениями 1, 3 и 9 крат с удалением выходного зрачка 82 мм при длине системы 250 мм. Как изложенный в статье подход к выбору параметров компонентов схемы, так и инженерное решение на его основе могут представлять интерес для предприятий оптического приборостроения.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации от образовательного фонда «Талант и успех», договор № 442-М от 30.12.2020.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. US 7869125. United States. Multi-magnification viewing and aiming scope [Electronic resource] / S. Szapiel, B. Ross. – Pub. Date 11.01.2011. – 11 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US7869125B2/>.
2. Хацевич Т. Н., Волкова К. Д., Дружкин Е. В. Моделирование юстировки телескопических панкратических систем // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 156–172.
3. РПК-16. Российский взгляд на современный легкий ручной пулемет [Электронный ресурс] // Военное обозрение: [Сайт]. – Режим доступа: <https://topwar.ru/155044-rpk-16-rossijskij-vzgljad-na-sovremennuj-legkij-ruchnoj-pulemet.html> (дата обращения 17.04.2022).
4. Обзор прицела 1П86 [Электронный ресурс] // Военное обозрение: [Сайт]. – Режим доступа: <https://topwar.ru/184316-obzor-privela-1p86.html> (дата обращения 17.04.2022).
5. US 8988773. United States. Optical sighting device [Electronic resource] / S. Szapiel. – Pub. Date 24.03.2015. – 12 p. – Access from Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US8988773B2/>.
6. Elcan Specter 1/3/9 [Электронный ресурс] // Armament Technology [Сайт]. – Режим доступа: <https://armament.com/spectertr-1-3-9/> (дата обращения: 07.05.2022).
7. Радостев Д. А., Хацевич Т. Н. Обеспечение специальных требований при разработке оптической схемы прицела со сменными полями зрения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 6 : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 67–72.
8. Хацевич Т. Н., Волкова К. Д., Дружкин Е. В. Оптико-кинематический способ обеспечения стабильности положения визирной линии в оптических приборах с дискретной сменой увеличения // Актуальные проблемы оптотехники : сб. материалов Национ. науч.-техн. конф., 21 сентября 2017 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 48–58.
9. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов : учеб. пособие / Серия «Выдающиеся ученые ИТМО». – СПб. : СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – 274 с.
10. Можаров, Г. А., Русаков А. С. Формулы для согласования зрачков при расчете телескопических систем // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 1. – С. 105–108.
11. Хацевич Т. Н., Волкова К. Д. Обеспечение стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения в оптических панкратических прицелах // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 9. – С. 34–43.



12. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. В 2 ч. Ч. I : учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МИИГАиК, 2009 . – 350 с.

13. Патент 2547044 Российская Федерация № 2014120776/12 : оптический прицел с дискретной сменой увеличения : заявл. 22.05.2014 : опублик. 10.04.2015, Бюл. № 10. – 11 с.

### Об авторах

Татьяна Николаевна Хацевич – профессор кафедры фотоники и приборостроения.

Евгений Владимирович Шмелев – магистрант кафедры фотоники и приборостроения, инженер-конструктор.

Получено 20.05.2022

© Т. Н. Хацевич, Е. В. Шмелев, 2022

## Investigation of a telescopic systems with three-stage magnification change and a stable exit pupil position

T. N. Khatsevich<sup>1\*</sup>, E. V. Shmelev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> «Optical Design Office», г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: khatsevich@rambler.ru

**Abstract.** The visual optical systems with three fields of view are considered in the article. The removal of the exit pupil of the considered systems is from 1/3 to 1/4 of its total length. The problems that arise during a three-stage change of magnification are considered in the paper. An important feature of such systems is the need to match the pupils of the system when changing the magnification to ensure the stability of the position of the exit pupil. The complexity of the implementation while observing weight and size restrictions are also discussed. A comprehensive solution to these problems should be laid at the circuit level and should be based on the search for a fundamental structural optical scheme. During the design process, the issues of modeling and determining the area of solutions are revealed, which make it possible to ensure high image quality in the transition to finite apertures and thicknesses. The scientific hypothesis is that a three-stage change of magnification can be realized by presence of the rotary afocal system of magnification change. At the same time, for such a solution, internal alignment and competitive characteristics of the optical system of the product as a whole are also provided. The purpose of this article is to present the results of the analysis of the circuit solution in the paraxial approximation, to determine the areas of solutions that provide the smallest relative apertures of the circuit components under the introduced overall restrictions on the length of the system, the diameters of the components and the removal of the exit pupil. The results of the study are confirmed by the development of an optical system with interchangeable magnifications of 1x, 3x and 9x with an eye relief of 80 mm with the total system length of 250 mm.

**Keywords:** telescopic systems, paraxial modeling, exit pupil, three-stage change of magnification, discrete change of magnification

### REFERENCE

1. Szapiel S., & Ross B. (2011). US 7869125. United States. Multi-magnification viewing and aiming scope. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US7869125B2/>.
2. Khatsevich, T. N., Volkova, K. D., Druzhkin, E. V. (2017). Optical design for adjustment of telescopic zoom systems. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 156–172 [in Russian].
3. RPK-16. Russian view on modern light machine gun. (n. d.). Military Review. Retrieved from <https://topwar.ru/155044-rpk-16-rossijskij-vzgljad-na-sovremennyj-legkij-ruchnoj-pulemet.html> [in Russian].
4. 1P86 sight overview. (n. d.). Military Review. Retrieved from <https://topwar.ru/184316-obzor-precela-1p86.html> [in Russian].
5. Szapiel, S. (2015). US 8988773. United States. Optical sighting device. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US8988773B2/>.

6. Elcan Specter 1/3/9. (n. d.) Armament Technology. Retrieved from <https://armament.com/spectertr-1-3-9/>.
7. Radostev, D. A., & Khatsevich, T. N. (2019). Provisioning special requirements for optical design of riflescope system with changeable fields. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 6, ch. 1. Magisterskaya nauchnaya sessiya "Pervyye shagi v nauke" [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia: International Scientific Conference: Vol. 6, Part 1. Master's Scientific Session "First Steps in Science"]* (pp. 67–73). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
8. Khatsevich, T. N., Volkova, K. D., & Druzhkin, E. V. (2017). Kinematic optical method of providing line-of-sight stabilization for optical devices with the discrete magnification. In *Sbornik materialov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: T. 1. Aktual'nyye problemy optotekhniki [Proceeding of National Scientific and Technical Conference: Vol. 1. Actual Problems of Optotechnics]* (pp. 48–58). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
9. Churilovsky, V. N. (2001). *Teoriya opticheskikh priborov [Theory of Optical Devices]*. St. Petersburg: St. Petersburg GITMO (TU) Publ., 274 p. [in Russian].
10. Mozharov, G. A., & Rusakov, A. S. (1992). Equations for pupil matching when calculating telescopic systems. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 1, 105–108 [in Russian].
11. Khatsevich, T. N., & Volkova, K. D. (2017). Stabilization of the exit pupil in an optical zoom sight with variable magnification. *Opticheskii zhurnal [Optical Journal]*, 84(9), 34-43 [in Russian].
12. Zaprjagaeva, L. A., & Sveshnikova, I. S. (2000). *Raschet i proektirovanie opticheskikh system: ch. 1 [Calculation and Design of an Optical Systems: Part 1]* (2nd ed.). Moscow: MIIGAiK Publ., 350 p. [in Russian].
13. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2014). Optical sight with discrete magnification change. Patent of the Russian Federation No. 2547044 [in Russian].

#### Author details

*Tatiana N. Khatsevich* – Professor, Department of Photonics and Device Engineering.

*Evgeniy V. Shmelev* – Graduate, Department of Photonics and Device Engineering; design engineer.

Received 20.05.2022

© T. N. Khatsevich, E. V. Shmelev, 2022