

УДК 535.317: 681.75

В. И. Заварзин

**ОПТИЧЕСКИЙ ПРИЦЕЛ ПЕРЕМЕННОГО
УВЕЛИЧЕНИЯ**

Предложена и обоснована оптическая схема панкратического прицела для стрелкового оружия. Рассмотрены технологические особенности сборки и перемещения оптических элементов системы, состоящей из двух и трех компонентов, а также методика определения допусков на продольную установку шкал и сеток. Приведен пример разработки прицела.

Ключевые слова: оптика, увеличение, абберационный расчет, панкратический прицел, сборка, юстировка.

Для повышения точности и комфортности наблюдения за целью в прицельных приспособлениях все чаще применяют панкратические оптические системы (ОС). Теоретически панкратическое (плавное) изменение видимого увеличения можно осуществлять в объективе, окуляре или оборачивающей системе. В прицелах, предназначенных для высокоточного наведения стрелкового оружия, плавное изменение видимого увеличения целесообразно осуществлять с помощью панкратической оборачивающей системы. Это объясняется, главным образом, тем, что требования к изготовлению оптических деталей и сборке в оборачивающей системе значительно проще, чем для окуляра или объектива. Объектив и окуляр в этом случае применяют с постоянными фокусными расстояниями.

Панкратическая оборачивающая система состоит из двух или одного подвижных компонентов. В первом случае перемещения компонентов связаны нелинейной зависимостью, обеспечивающей постоянство расстояния между предметом и изображением во всем диапазоне изменения видимого увеличения, а во втором — компенсация смещения плоскости изображения достигается путем одновременного перемещения окуляра с постоянным фокусным расстоянием.

В оптических прицельных устройствах наиболее удобна первая схема. Объясняется это тем, что в этом случае окуляр не меняет своего положения относительно стрелкового оружия, к которому прикреплен прицел, а следовательно, условия прицеливания стрелка в процессе изменения видимого увеличения прицела не будут меняться. Основная трудность, возникающая при разработке оптических прицельных приспособлений, и особенно с переменным увеличением, заключается в необходимости иметь в системе значительный вынос выходного зрочка.

Наиболее важными характеристиками глаза наблюдателя, учитываемыми при расчете и проектировании ОС прицелов, следует назвать предел разрешения, особенности отсчета долей деления, точность совмещения штрихов, размеры входного зрачка, спектральные характеристики и инерционность глаза.

Наилучшие результаты по точности визирования получают при диаметре выходного зрачка прицела в пределах 0,7...1,3 мм с оптимумом около 1 мм в условиях достаточной освещенности. Для повышения яркости изображения в измерительных геодезических приборах, например, иногда увеличивают диаметр выходного зрачка до 1,5...2 мм [1]. При необходимости обеспечения предельного разрешения превышать это значение не следует, так как это не приводит к повышению точности наведения, а лишь увеличивает разброс отсчетов в серии. Точность визирования мало зависит от фокусного расстояния окуляра, а качество изображения улучшается при его увеличении, но увеличиваются габаритные размеры. Таким образом, основную роль в повышении точности наведения играют размеры выходного зрачка и оптимальные условия освещенности поля прицела.

Габаритный и абберационный расчеты оптической схемы. Габаритный и абберационный расчеты панкратического прицела целесообразно осуществлять раздельно из условия взаимной компенсации aberrаций, с одной стороны, окуляра с постоянным фокусным расстоянием и панкратической оборачивающей системы, а с другой, — объектива [2]. При этом необходимо стремиться как можно лучше исправить aberrации окуляра, так как наличие, например, сферической aberrации приведет к нечеткому изображению сетки, располагаемой в передней фокальной плоскости окуляра, а это погрешности определения дальности и точности прицеливания. Окуляр, работающий с постоянным увеличением, будем называть глазным компонентом панкратической системы с окуляром (ПССО). При этом ПССО будет иметь значительный вынос выходного зрачка, а положение входного зрачка определяется объективом.

Первый и второй компоненты ПССО имеют возможность перемещаться относительно неподвижной плоскости предмета и изображения, обеспечивая изменение видимого увеличения в диапазоне $\beta_{\min} \dots \beta_{\max}$. Видимое увеличение всего прицела будет определяться выражением

$$\Gamma = (f'_{об}/f'_{ок})\beta,$$

где $f'_{об}$, $f'_{ок}$ — фокусное расстояние объектива и окуляра; β — линейное увеличение оборачивающей системы.

Как известно, глубина резкости окуляра определяется выражением [1]

$$T = T_{ак} + T_{в} = 250/\Gamma_{ок}^2 + \lambda/A_{ок}^2,$$

где T — суммарная глубина резкости; $T_{ак}$ и $T_{в}$ — аккомодационная и волновая составляющие; λ — длина волны света, мм; $A_{ок}$ и $\Gamma_{ок}$ — апертурный угол и видимое увеличение окуляра.

В целях сохранения резкости изображения, понижающейся в результате расфокусировки при изменении видимого увеличения, необходимо, чтобы выполнялось условие стабильности положения передней фокальной плоскости относительно первого компонента в пределах глубины резкости, т.е. должно выполняться условие

$$\Delta S_F = S_{F1} - S_{F2} = f'_1(1 - d_1\Phi_{II}) - f'_2(1 - d_2\Phi_{II}) \leq T,$$

где $f'_1, f'_2, S_{F1}, S_{F2}$ — фокусные расстояния и передние отрезки подвижных компонентов; Φ_{II} — оптическая сила второго подвижного компонента; d_1, d_2 — диапазон изменения расстояния между подвижными компонентами.

Габаритные параметры и характеристики прицела связаны следующими формулами (рис. 1):

$$f'_{об} = f'_1 = -\frac{\Gamma_T f'_5}{\beta_{об.с}};$$

$$2m_1 = k_{\omega} D;$$

$$D_1 = 2m_1 + 2a_P \operatorname{tg} \omega_1;$$

$$f'_3 \frac{(1 - k\omega)D}{f_1'^2 \operatorname{tg} \omega_1} + f'_3(\beta_{об.с} - 1) + L - (f'_1 + f'_5) = 0;$$

$$D_2 = -2f'_1 \operatorname{tg} \omega_1;$$

$$D_3 = \frac{D f'_3}{f'_1};$$

$$D_4 = D_3;$$

$$\frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'_1} \left(1 + \frac{a_p}{f'_1}\right) + \frac{1}{f'_3} \left(1 - \frac{d_3}{2f'_3}\right);$$

$$D_{ПД} = -2f'_5 \operatorname{tg} \omega_6.$$

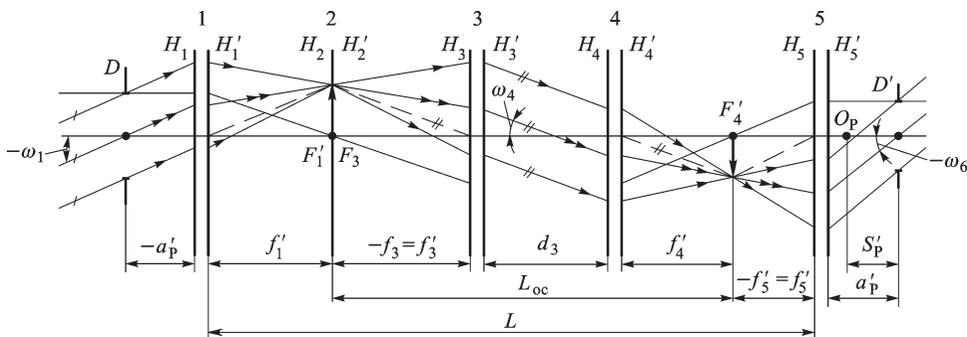


Рис. 1. Габаритная схема прицела

Угловые поля и относительные отверстия оборачивающей системы с окуляром имеют сравнительно небольшие значения, поэтому ее абберационный расчет целесообразно проводить на основе теории аббераций третьего порядка применительно к тонким компонентам. Коррекции подлежат в первую очередь полевые абберации: астигматизм, дисторсия и хроматизм видимого увеличения. Особенность расчета ПССО заключается в том, что при изменении β необходимо согласовать входной и выходной зрачки объектива, а также выходной и входной зрачки окуляра. Для согласования входного и выходного зрачков ПССО в оптическую схему были дополнительно введены два коллективных компонента, расположенных вблизи плоскости предметов и изображения. При разработке элементов оптической системы прицела необходимо выполнять требования технологичности оптических деталей и конструкций [3, 4], учитывая серийность их производства, надежность и безотказность в работе, что весьма важно из-за жестких требований по ударным нагрузкам (отдачи).

Абберационный расчет объектива проводился из условия компенсации аббераций ПССО во всем диапазоне изменения увеличения.

При необходимости прицел условно можно рассматривать состоящим из двух или трех компонентов, например: из объектива с панкратической оборачивающей системой и окуляра или из объектива и окуляра с панкратической системой, или из трех отдельных компонентов (рис. 2). Точность и качество функционирования прицела зависят не только от точности сборки, но и от точности перемещения компонентов оборачивающей системы. Рассмотрим технологические особенности сборки и перемещения оптических элементов системы, состоящей из двух и трех компонентов, оказывающих существенное влияние на точность прицеливания.

Расфокусировка оптических систем. В результате отклонения фокусных расстояний компонентов схемы от расчетных значений и вследствие погрешностей их продольной установки при сборке возможно появление расфокусировки оптической системы Δz .

Допустимая расфокусировка определяется назначением системы [3, 5]. Для оптических систем, работающих совместно с глазом, $(\Delta z)_{\text{доп}}$ определяется шириной аккомодации глаза (для оптических

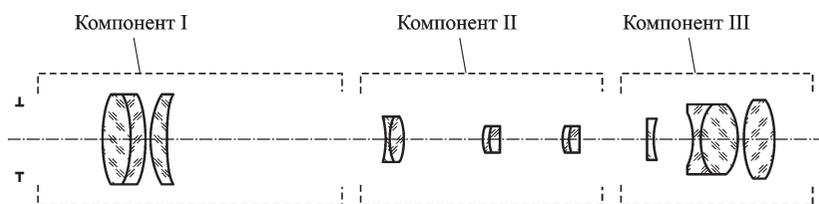


Рис. 2. Принципиальная схема прицела

и

$$x'_2 = \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 + (k_0 - k_1)m} + d_0 + (k_2 - k_1)m}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) при $m = 0$ находим

$$x'_{20} = \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0} + d_0}. \quad (4)$$

Подставив выражения (3) и (4) в уравнение (1), найдем

$$\Delta z = \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 + (k_0 - k_1)m} + d_0 + (k_2 - k_1)m} - \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0} + d_0} + k_2 m. \quad (5)$$

В случае $k_0 = k_1 = k_2$ значение расфокусировки системы составит $\Delta z = k_2 m$. Исследуя уравнение (5), нетрудно найти, что $\Delta z = 0$ в случае, если

$$m_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}, \quad m_3 = 0, \quad (6)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(k_2 - k_1) k_2 x_0 + (k_0 - k_1) k_2 d_0 - x'_{20}}{(k_2 - k_1) (k_0 - k_1) k_2}, \\ b &= \frac{(k_2 - k_1) f_2^2 - x'_{20} [(k_2 - k_1) x_0 + (k_0 - k_1) d_0] + k_2 (f_1^2 + x_0 d_0)}{(k_2 - k_1) (k_0 - k_1) k_2} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Расфокусировка трехкомпонентной оптической системы. Для трехкомпонентной системы (рис. 4) расфокусировка Δz определяется аналогичным образом по следующей формуле:

$$\Delta z = x_3 - x'_{30} + k_3 m,$$

или

$$\Delta z = -\frac{f_3^2}{\frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 + (k_0 - k_1)m} + d_{10} + (k_2 - k_1)m} - d_{20} - (k_3 - k_2)m} + \frac{f_3^2}{\frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0} + d_{10}} - d_{20}} + k_3 m, \quad (8)$$

где $k_0 m$ — смещение предметной плоскости (плоскости I); $k_1 m$, $k_2 m$,

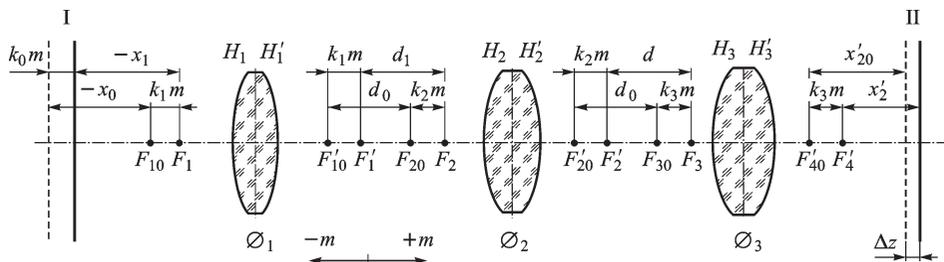


Рис. 4. Оптическая схема трехкомпонентной ОС

k_3m — соответственно смещения первого, второго и третьего компонентов системы.

Формулы (5) и (8) для расфокусировки справедливы также в случае перемещающихся компонентов схемы в системах переменного увеличения с линейной связью между перемещениями компонентов. В этом случае коэффициенты k_0 , k_1 , k_2 представляют собой передаточные отношения между перемещениями компонентов, а формулы (5) и (8) определяют закон изменения смещения плоскости изображения в функции перемещения m в двух- и трехкомпонентных системах переменного увеличения соответственно.

Рассматривая с позиции возможности коррекции отдельный оптический компонент многокомпонентной ОС, подчеркнем, что при прочих равных условиях коррекция каждого компонента тем легче, чем меньше его оптическая сила (относительное отверстие).

В телескопических системах под фокусировкой понимают установку сетки в фокальной плоскости объектива. При предварительной установке сетки в фокусе окуляра точность фокусировки зависит от точности совмещения фокальных плоскостей объектива и окуляра (установки нуля диоптрий).

В оптических системах прицелов в местах промежуточных изображений устанавливают сетки. В этих случаях неточность фокусировки не только влияет на правильность диоптрийной установки, но и вызывает параллакс сетки прибора, что влияет на точность прицеливания.

Допуски на продольную установку шкал и сеток. Параллакс, вызванный ошибками продольной установки шкал и сеток в оптических приборах, снижает точность измерений. Основное требование, которое должно выполняться при продольной установке шкал и сеток в оптических измерительных приборах, заключается в том, что плоскость сетки должна совпадать с плоскостью изображения предмета. Это требование приблизительно выполняется при сборке и юстировке прибора, а при эксплуатации нарушается по различным причинам: за счет тепловой деформации труб и неточной фокусировки прибора на плоскость наводки, вследствие панкратического перемещения

элементов оптической схемы, а также за счет продольных aberrаций оптической системы.

Продольная установка шкал и сеток в приборах должна удовлетворять двум условиям.

1. Сетка (или шкала) и изображение предмета, которое на нее проектируется, должны быть видны одновременно резко. Это требование предъявляется ко всем приборам, работающим совместно с глазом.

2. Остаточный линейный или угловой параллакс должен быть меньше допустимого, определяемого точностью измерения.

Может оказаться, что выполнения первого требования — обеспечения одновременной резкости изображений предмета и сетки при наблюдении глазом через окуляр — вполне достаточно, если остаточный параллакс не превосходит допустимого из условий измерения. В противном случае допуски на продольную установку сетки должны быть назначены из требований точности измерения. В соответствии с этим допуск на установку сетки в первом случае задается в диоптрийной мере ($A_{\text{доп}}$), а во втором случае — допустимым параллаксом, например $(\theta_{\text{об}})_{\text{доп}}$.

Все предметы, расположенные вблизи фокуса объектива на расстоянии z , имеют в пространстве предметов сопряженные плоскости, находящиеся в “практической бесконечности” z_{∞} , м:

$$z_{\infty} = 1,25(d_{\text{вых}})^2. \quad (9)$$

Выражая допуск на продольную установку сетки (из условия одновременной резкости) $A_{\text{резк}}$, дптр, расстоянием до ее изображения за окуляром, получаем (рис. 5):

$$A_{\text{резк}} \leq \frac{1}{z_{\infty}} = \frac{1}{1,25 (d_{\text{вых}})^2} = \frac{0,8}{(d_{\text{вых}})^2}.$$

Здесь $d_{\text{вых}}$ — диаметр рабочего выходного зрачка, мм.

При $d_{\text{вых}} > d_{3,\Gamma} = 2$ мм имеем

$$A_{\text{резк}} = \frac{0,8}{(d_{\text{вых}})^2} = \frac{0,8}{2^2} = 0,2 \text{ дптр} = \text{const.}$$

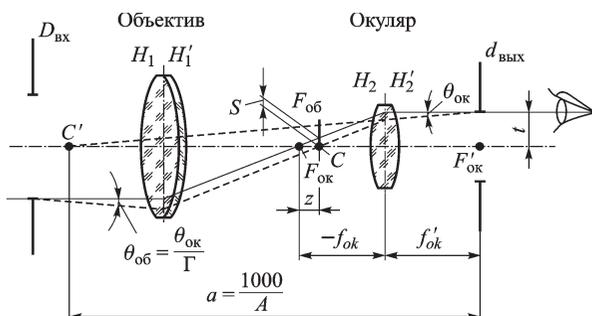


Рис. 5. Оптическая схема телескопической системы

Таким образом, допуск из условия одновременной резкости для таких приборов можно принимать одинаковым и равным 0,2 дптр. С помощью формулы Ньютона по допуску $A_{\text{резк}}$ получаем значение $z_{\text{доп}}$, мм, — допуск на точность совмещения сетки с плоскостью изображения:

$$(z_{\text{доп}})_{\text{I}} \leq \frac{f'_{\text{ок}}{}^2}{a} = \frac{f'_{\text{ок}}{}^2 A_{\text{резк}}}{1000}. \quad (10)$$

Остаточный параллакс при установке сетки по признаку одновременной резкости с точностью $A_{\text{резк}}$ можно найти и сравнить с параллаксом, допустимым из условий измерений, по следующим формулам:

$$(\theta_{\text{ок}})''_{\text{ост}} = \frac{t_{\text{M}} A_{\text{резк}}}{1000} \cdot 206\,000 = 206 t_{\text{M}} A_{\text{резк}} \leq \theta_{\text{доп}} \Gamma \quad (11)$$

— остаточный угловой параллакс в угловых секундах, где

$$t_{\text{M}} = \frac{d_{\text{вых}} - 1}{2} \quad \text{для} \quad d_{\text{вых}} \geq d_{\text{з.г}}, \quad (12)$$

$$t_{\text{M}} = \frac{d_{\text{вых}}}{4} \quad \text{для} \quad d_{\text{вых}} < d_{\text{з.г}};$$

$$(S_{\text{ок}})_{\text{ост}} = (\theta_{\text{ок}})_{\text{ост}} f'_{\text{ок}} = \frac{t_{\text{M}} A_{\text{резк}}}{1000} f'_{\text{ок}} \leq S_{\text{доп}} V_{\text{об}} \quad (13)$$

— остаточный линейный параллакс, где $V_{\text{об}}$ — линейное увеличение объектива микроскопа.

В правой части неравенств стоит значение допустимого параллакса в пространстве предметов, пересчитанное для пространства изображения. В этом случае точность совмещения сетки с плоскостью изображения может быть рассчитана подстановкой в уравнение (10) значения $A_{\text{резк}}$, найденного из выражений (11) и (13):

$$(z_{\text{доп}})_{\text{II}} \leq \frac{f'_{\text{ок}}{}^2}{1000} \cdot \frac{\theta_{\text{доп}} \Gamma}{206 t_{\text{M}}} \quad (14)$$

и

$$(z_{\text{доп}})_{\text{II}} \leq \frac{f'_{\text{ок}}}{t_{\text{M}}} S_{\text{доп}} V_{\text{об}}. \quad (15)$$

Устранение параллакса достигается взаимным смещением сетки или объектива в нужную сторону. Это может быть выполнено ввинчиванием оправы объектива по резьбе, подрезкой опорного торца оправы или трубы и т.д. При крупносерийном и массовом производстве может быть применена так называемая результативная обработка — подрезка оправы на станке со специальным приспособлением, имитирующим узел готового прибора.

Для конкретной системы, например с $\Gamma = 10^*$, $f'_{\text{ок}} = 30$ мм и $d_{\text{вых}} = 2$ мм, определяем по формуле (12) значение t_M :

$$t_M = \frac{d_{\text{вых}} - 1}{2} = \frac{2 - 1}{2} = 0,5 \text{ мм};$$

учитывая, что $A_{\text{резк}} > 0,2$ дптр ($d_{\text{з.Г}} < d_{\text{вых}}$), по формуле (10) определяем $(z_{\text{доп}})_I$, исходя из условия одновременной резкости:

$$(z_{\text{доп}})_I = \frac{f'_{\text{ок}}{}^2 A_{\text{резк}}}{1000} = \frac{30^2 \cdot 0,2}{1000} = 0,18 \text{ мм};$$

по формуле (14) определяем $(z_{\text{доп}})_{II}$, исходя из точности измерения:

$$(z_{\text{доп}})_{II} = \frac{f'_{\text{ок}}{}^2}{1000} \cdot \frac{\theta_{\text{доп}} \Gamma}{206 \cdot t_M} = \frac{30^2}{1000} \cdot \frac{6 \cdot 10}{206 \cdot 0,5} = 0,524 \text{ мм}.$$

Окончательно допуск на совмещение сетки с фокусом объектива $z_{\text{доп}} = 0,18$ мм.

Схемы контроля установки сетки. Несовпадение сетки с плоскостью изображения предмета контролируется различными способами, но все они основаны или на наблюдении неодновременной резкости изображений сетки и предмета, или на выявлении остаточного параллакса [3, 5, 6].

Схемы контроля установки сетки в испытуемом приборе (ИП) приведены на рис. 6.

Первые две схемы основаны на измерении несовпадения резкости изображений сетки прибора и сетки коллиматора К. Для этого служит диоптрийная трубка ДТ за окуляром ИП (схема 1) или отсчетная труба Т с фокусировкой, установленная перед объективом ИП (схема 2). В первом случае измеряется $A_{\text{ДТ}}$ во втором — в Γ^2 раз меньшее значение A_T . Схема 2 может оказаться эффективнее схемы 1, если за сеткой ИП

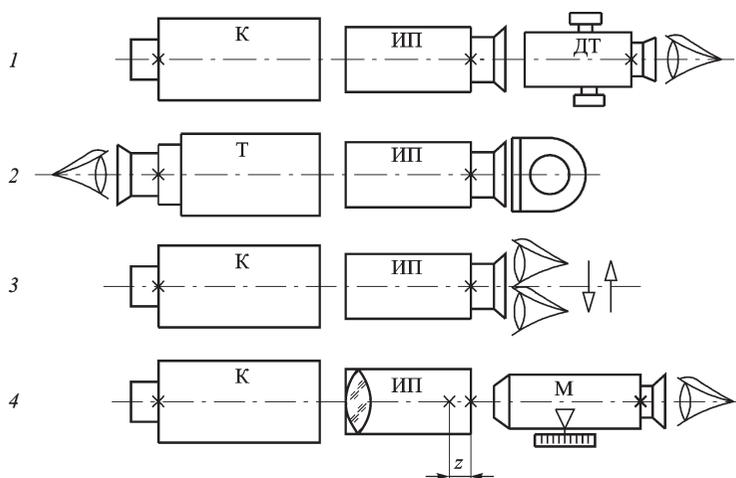


Рис. 6. Схема контроля установки сетки

стоит плохо скорректированная система, например, как в нашем случае, панкратическая.

По схеме 3 контролируется остаточный угловой параллакс. Глаз наблюдателя смещается в пределах выходного зрачка и по угломерной шкале сетки К измеряется угловой параллакс сетки ИП.

На схеме 4 показан цеховой способ измерения погрешности продольной установки сетки, при котором необходима частичная разборка ИП (на схеме удален окуляр). Отсчетный микроскоп М последовательно наводится на резкое изображение сетки К и на сетку юстируемого прибора. Разность перемещений микроскопа равна z .

Пример. В таблице приведены конструктивные параметры варианта оптической схемы [2]. Восьмая, одиннадцатая и четырнадцатая изменяемые толщины ОС представляют собой воздушные промежутки, соответствующие среднему ($\Gamma = 6^*$), минимальному ($\Gamma = 3,2^*$) и максимальному ($\Gamma = 9,8^*$) видимым увеличениям телескопической системы.

Таблица

Конструктивные параметры панкратического прицела

$\Gamma' = (3,3 \dots 10)^*$	$D_{\text{вх}} = 32,5 \text{ мм}$	$2\omega = 2^\circ 30' \dots 6^\circ 30'$
r	d	n
204,2	6,5	1
-82,99	4	K8
-294,4	0,5	ТФ7
79,69	5	1
939,7	119,5	K8
-55,21	2	1
38,99	6	ТФ7
-17,458	13,4 (36,3; 5,7)	TK20
19,187	1,5	1
9,162	3,5	Ф13
-131,52	29,8 (24,9; 18)	K8
19,187	1,5	1
9,162	3,5	Ф13
-131,52	43,9 (25,9; 63,4)	K8
∞	2	1

Дальномерная сетка наносится на плоскую поверхность плоскопараллельной пластинки и на плоскую поверхность коллективной линзы. Расстояние между плоскопараллельной пластинкой и коллективной линзой позволяет реализовать вращение пластинки относительно оптической оси, что позволяет измерять дальность до цели.

В схеме прицела выходной зрачок находится на расстоянии 70 мм от последней поверхности, что обеспечивает удобство прицеливания и уменьшает вероятность нанесения травмы стрелку из-за отдачи. Продольные размеры прицела без наглазника менее 300 мм, предел разрешения системы не более $6 \dots 20$ угл. с, что меньше погрешности глаза человека.

Прицел имеет следующие оптические и технические характеристики:

Увеличение, крат.....	3–10
Угловое поле, угл. град.....	7–2,5
Разрешение угл. с.....	20–6
Световой диаметр объектива, мм.....	40
Габаритная длина, мм.....	410

Выводы. Предложена, обоснована и рассчитана оптическая схема панкратического прицела для стрелкового оружия. Рассмотрены технологические особенности сборки и перемещения оптических элементов системы, оказывающих существенное влияние на точность прицеливания. Результаты испытаний показали преимущество разработанного прицела по сравнению с известными отечественными и зарубежными образцами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закаэнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем: Учеб. для студентов приборостроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
2. Гоев А. И., Заварзин В. И., Казаков В. И., Шимкович Э. Ф., Шмыга В. В. Оптический прицел с переменным увеличением. Патент на изобретение № 2282223. Б. И. 20.08.06 г. № 23.
3. Гоев А. И., Заварзин В. И., Перов В. А., Потелов В. В. Сборка и юстировка оптико-электронных приборов: Учеб. пособие / Под ред. В.И. Заварзина – М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 80 с.
4. Гоев А. И., Заварзин В. И., Чичварин Н. В. Организация проектирования и производства оптико-электронных систем в среде с ограниченными ресурсами // Информационные технологии. – 2001. – № 3. – Т. 2. – С. 36–43.
5. Заварзин В. И. Проектирование и производство оптико-электронных приборов // Тез. докл. II Науч.-техн. конф. (13–17 сентября 2004 г., г. Сочи) – М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 103–106.
6. Оптические системы геодезических приборов / Д.А. Аникс, О.М. Голубовский, Г.В. Петрова и др. – М.: Недра, 1981. – 240 с.

Статья поступила в редакцию 19.02.2009

Валерий Иванович Заварзин родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований”, декан факультета “Оптико-электронное приборостроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных публикаций в области оптического приборостроения.

V.I. Zavarzin (b. 1956) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. D. Sc. (Eng), professor of “Optico-Electronic Devices for Scientific Applications” Department, Dean of “Optico-Electronic Devices Technology” Faculty at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of optical engineering.