

МОНОБЛОЧНЫЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЙ ПРИЦЕЛ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

Н.В.СЕНАТОРОВ ("ЦКБ "Арсенал", Киев, Украина)
В.И.МИКИТЕНКО (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Исследованы свойства толстой телескопической линзы. Показано, что на базе этой линзы можно создать телескопический прицел для стрелкового оружия с увеличением до 1,6 крат.

Досліджено властивості товстої телескопічної лінзи. Показано, що та базі цієї лінзи можливо створити телескопічний приціл для стрілецької зброї із збільшенням до 1,6 крат.

Features of thick telescopic lens are issued. There is shown that telescopic sight for rifle weapon with magnification till 1,6 may be created on base of that lens.

Введение. Одной из важнейших характеристик оптического прицела стрелкового оружия является его надежность. В идеале пыль, грязь, вода, снег, перепады температуры, ударные нагрузки не должны влиять на работу прицела. Такие требования практически невозможно реализовать в полном объеме, т.к. оптический прицел, как правило, является довольно сложным изделием и содержит несколько хрупких стеклянных элементов, разделенных воздушными промежутками. В таких конструкциях отмечается запотевание и запыление внутренних оптических поверхностей, разъюстировка оптических элементов, возможно разрушение тонких линз под воздействием ударной нагрузки. Особенно заметна ненадежность оптических прицелов, установленных на автоматическом оружии, т.к. условия его эксплуатации заметно более сложные, чем, например, у снайперских винтовок. В то же время, требования к характеристикам таких прицелов (увеличение, сменные поля зрения, возможность введения поправок и т.п.) существенно ниже, чем у приведенных в примере. Таким образом, существует потребность в надежных, недорогих оптических прицелах для стрелкового оружия малого радиуса действия.

Постановка задачи. В [1] было показано, что толстая телескопическая линза [2] может использоваться как телескопический прицел (ТП) галилеевского типа в моноблочном исполнении. Такое исполнение решает целый ряд проблем, свойственных классической схеме прицела, в частности, - исключает запотевание внутренних оптических поверхностей при резком изменении температуры (при десантировании) и возможную разъюстировку прицела при длительных и кратковременных динамических воздействиях. При создании моноблочного ТП на базе телескопической линзы необходимо решить комплексную задачу согласования технических параметров прицела с требованиями, вытекающими из контекста выполняемой боевой задачи.

Цель данной статьи - разработать конструкцию и методику расчёта моноблочного ТП и оценить достижимые характеристики (увеличение, поле зрения и качество изображения).

Как известно, условие телескопичности толстой линзы описывается известным уравнением [3]:

$$d = (r_1 - r_2) / (1 - \mu_2), \quad (1)$$

где: d - толщина линзы по оптической оси, $r_{1,2}$ - радиусы кривизны преломляющих поверхностей и μ_2 - величина, обратная показателю преломления стекла n_2 . При этом увеличение Γ^x определяется отношением [2]:

$$\Gamma^x = r_1 / r_2. \quad (2)$$

При заданном увеличении и выбранном сорте стекла уравнения (1) и (2) позволяют определить недостающие конструктивные параметры линзы:

$$\begin{aligned} r_1 &= d \Gamma^x (1 - \mu_2) / (\Gamma^x - 1), \\ r_2 &= d (1 - \mu_2) / (\Gamma^x - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Любой ТП содержит две функциональные части - канал наблюдения цели и канал визирования прицельной сетки. Телескопическая линза непосредственно обеспечивает реализацию канала наблюдения цели. Создание канала визирования прицельной сетки для введения ее коллимированного изображения в поле зрения должно минимально усложнять конструкцию и при этом обеспечивать приемлемую точность. Целесообразно для этой цели использовать первую преломляющую поверхность линзы (рис. 1), нанеся на нее светоделительное покрытие, а прицельную сетку выполнить зеркальной на второй преломляющей поверхности.

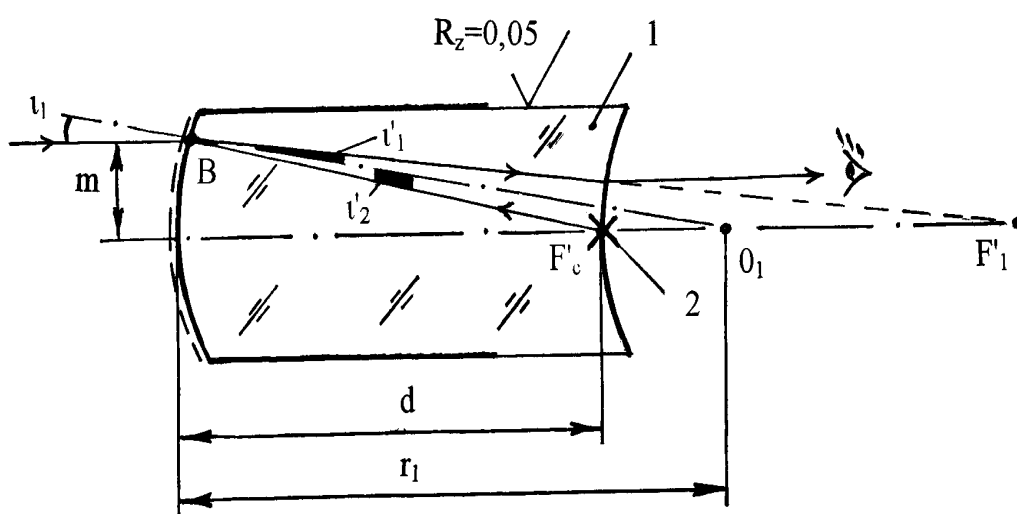


Рис. 1. Моноблочный ТП в виде центрированной линзы: 1 – линза, 2 – сетка

В простейшем случае сетка может освещаться естественным светом через светоделитель и боковую поверхность линзы, которая выполнена полированной в области, прилегающей к сетке. При этом первая поверхность линзы работает одновременно на преломление в канале наблюдения цели и на отражение в канале визирования прицельной сетки. Точка F'_c , в которой располагается центр зеркальной прицельной сетки, и фокус первой преломляющей поверхности F'_1 сопряжены зеркальной поверхностью, т.е. выполняется равенство:

$$d = r_1 / (1 + \mu_2). \quad (4)$$

Совместное решение (3) и (4) дает результат:

$$\Gamma^x = (1 + \mu_2) / 2\mu_2.$$

Из последнего равенства следует, что для достижения большого увеличения необходимо изготавливать линзу из стекла с минимальным значением μ_2 . В частности, при использовании стекла марки ТФ10, у которого $\mu_2 = 0,5513$ [4], получаем $\Gamma^x = 1,41$. Подставляя эти значения μ_2 и Γ^x в (3) и принимая условие нормировки $d = 1$, находим окончательные выражения для радиусов кривизны поверхностей: $r_1 = 1,5513$; $r_2 = 1,1025$.

Т.к. прицельная сетка во многом определяет эффективность ТП, необходимо тщательно оценить ее свойства, определяющие основные характеристики ТП в целом. Наиболее важными для выполнения боевой задачи параметрами являются форма прицельной сетки, яркость ее изображения и точность согласования с каналом наблюдения цели.

Форма прицельной сетки должна вытекать из контекста боевой задачи. Например, для автоматического оружия ближнего боя эффективным решением является сетка в виде линии с разрывом и центральной точки [5].

Яркость изображения прицельной сетки должна быть адаптивно регулируемой в зависимости от освещенности наблюдаемой сцены. Это требование в значительной степени реализуется предложенной конструкцией ТП. Однако, в условиях низкой освещенности или при других неблагоприятных обстоятельствах реальной боевой обстановки яркость изображения прицельной сетки может быть слишком малой. Для устранения этого недостатка вводят в канал визирования прицельной сетки дополнительную подсветку. В качестве источника света целесообразно использовать красный светодиод ($\lambda_{\max} \approx 0,68$ мкм), а вместо светоделительного покрытия – спектроделительное. При этом вследствие уменьшения коэффициента отражения первой поверхности телескопической линзы полезное пропускание канала наблюдения цели увеличится в k раз:

$$k = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} k_{\lambda} y_{\lambda} d\lambda}{\tau \int_0^{\infty} k_{\lambda} y_{\lambda} d\lambda},$$

где, τ_{λ} - спектральный коэффициент пропускания спектроделительного покрытия, y_{λ} - спектральная плотность потока излучения цели, k_{λ} - спектральный коэффициент относительной видности глаза и τ - коэффициент пропускания нейтрального светоделителя.

Учитывая, что спектроделительное (интерференционное) покрытие отражает в очень узком спектральном диапазоне, увеличение коэффициента полезного пропускания канала наблюдения цели может достигать 20 – 30 %. В частности, при использовании спектроделителя [(90ИЭх3)(41ИЭх3)]х9; (90ИЭх3)(41ИЭх1,5) для $\lambda_{\max} = 0,68$ мкм вместо нейтрального химического светоделителя 44Р.43Р.44Р увеличение полезного пропускания составит 22,8%.

Точность согласования каналов наблюдения и визирования сетки зависит от aberrаций в оптической системе ТП. Принципиальным достоинством конструкции на рис.1 является частичное исправление кривизны поля сферического зеркала, образованного светоделителем, за счет размещения объекта (прицельной сетки) на сферической поверхности. При оценке параллактического рассогласования ρ между линией визирования перекрестия прицельной сетки и линией наблюдения цели, обусловленного сферической aberrацией, можно исходить из следующих соображений. Угол u_1 между нормалью к первой преломляющей поверхности в точке В и лучом от удаленной цели, идущим параллельным оптической оси на высоте m , определяется зависимостью:

$$\sin u_1 = m / r_1. \quad (5)$$

После преломления этот луч образует с нормалью угол u'_1 , равный

$$\sin u'_1 = \mu_2 \sin u_1. \quad (6)$$

Луч от перекрестия прицельной сетки образует с нормалью в точке В угол $\sin \iota'_2$, равный

$$\iota'_2 = \arctg[\sin \iota_1 / (\cos \iota_1 - 0,3554)] - \iota_1. \quad (7)$$

Очевидно, что модуль разности углов ι'_1 и ι'_2 характеризует искомую величину - в пространстве целей этой разности соответствует рассогласование ρ между линиями визирования и наблюдения, определяемое формулой

$$\rho = (\iota'_1 - \iota'_2) / \mu_2 = 1,8138 (\iota'_1 - \iota'_2). \quad (8)$$

График зависимости $\rho = F(m)$ при $d = 1$ приведен на рис. 2 (кривая 1). Из этого графика следует, если допустимое рассогласование ограничить среднеквадратическим рассеиванием оружия, которое составляет для большинства видов стрелкового оружия 3 мрад [6], то параметр m не должен превышать 0,3.

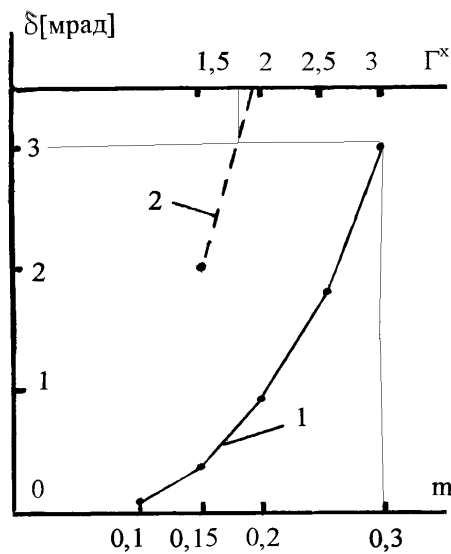


Рис. 2. Графики зависимостей параллакса от высоты осевого луча m , 2 и увеличения $F(\Gamma^x)$

Особенности размещения прицела на стрелковом оружии ограничивают его длину 100 мм, а диаметр 30 мм, т.е. $m = 0,15$ и согласно графику предельное рассогласование не превысит 0,4 мрад.

Анализ составляющих этого рассогласования показывает следующее. Рассогласование линии наблюдения цели определяется целиком сферической aberrацией телескопической линзы и согласно [2] вычисляется по формуле

$$(\delta g')_{сф} = 500 (m / r_1)^3 (d / r_1) \mu_2 (1 - \mu_2)^2 \text{ [мрад]}. \quad (9)$$

При $m = 0,15$ предельная параллактическая ошибка составляет лишь 0,03 мрад и ею можно пренебречь. Следовательно, рассогласование между линиями наблюдения цели и визирования прицельной сетки зависит только от сферической aberrации в канале прицельной сетки.

При оценке параллактического рассогласования ρ_λ между линией визирования перекрестия прицельной сетки и линией наблюдения цели, обусловленного хроматизмом, будем исходить из следующих соображений. Поскольку хроматизм обусловлен градиентом показателя преломления Δn_2 , который у стекла ТФ10 для длин волн λ_c и λ_e составляет $-0,01524$, а для λ_F и λ_e $0,01708$ [4], то частная производная $\partial \rho / \partial n_2$ определяет ρ_λ . Продифференцировав (8) с учетом (6) и (7) и переходя к конечным значениям, находим выражение для спектрального коэффициента отражения ρ_λ при $m = 0,15$:

$$\rho_{\lambda} = -53,4 \Delta n_2 + 0,4 \text{ [мрад]}.$$

Отсюда получаем $\rho_{\lambda}^{\max} = 1,2$ мрад при λ_c . Таким образом, параллактическое рассогласование из-за хроматизма в 3 раза превышает рассогласование, обусловленное сферической aberrацией.

Анализ составляющих этого рассогласования показывает следующее. Рассогласование линии наблюдения цели определяется целиком хроматизмом телескопической линзы, который можно найти, вычислив $\partial(\delta g')_{\text{сф}}/\partial n_2$. Согласно (9) имеем:

$$(\delta g')_{\text{хр}} = 0,3 \mu_2^2 (4\mu_2 - 3\mu_2^2 - 1)\Delta n_2 \text{ [мрад]}.$$

При $\Delta n_2 = -0,01524$ предельное значение $(\delta g')_{\text{хр}}$ не превысит 0,04 мрад и хроматизмом можно пренебречь. Таким образом, рассогласование между линиями наблюдения цели и визирования прицельной сетки зависит только от хроматизма в канале прицельной сетки. Однако при этом следует иметь в виду, что прицельная сетка освещается естественным светом, интенсивность которого в красной области меньше, чем в зеленой. Глаз также менее чувствителен к красным лучам по сравнению с зелеными. Следовательно, практически, хроматизм в малой степени будет сказываться на точности прицеливания.

Таким образом, моноблочный ТП в таком конструктивном исполнении имеет следующие характеристики, приведенные в таблице (столбец 2).

Хар-ки ТП при сплошном моноблоке и моноблоке в виде децентрированной линзы Табл.

Характеристика	Значение характеристики при:	
	Сплошном моноблоке	Сплошном децентрированном моноблоке
1	2	3
Увеличение (крат)	1,41	1,6
Длина моноблока (мм)	100	100
Диаметр моноблока (мм)	30	30
Зона, наблюдения перекрестия сетки (мм)	21,3	18,7
Поле зрения при удалении глаза от прицела на 75 мм (град):		
- для неподвижного глаза	7,6	6,1
- при смещении глаза в зоне наблюдения сетки	15	12,2
Масса (г)	417	417
Параллакс при перемещении глаза в зоне наблюдения перекрестия сетки (мрад)	0,4	2,8
Фокусное расстояние в канале сетки (мм)	71	48
Радиусы кривизны поверхностей r_1/r_2	155,12 / 110,25	119,65 / 74,78
Удаление сетки d_1 (мм)	100	76,94

Очевидно, что ограниченное увеличение $1,41^x$ не может в полной мере удовлетворить широкому спектру боевых задач. Поэтому исследуем возможность достижения более высокого Γ^x , сохраняя габариты моноблока и материал.

Подставив в (4) выражение (3) для r_1 , после преобразований получаем:

$$d_1 = 0,2892 \Gamma^x / (\Gamma^x - 1). \quad (10)$$

Анализ этой зависимости показывает, что при $\Gamma^x > 1,41$ параметр $d_1 < 1$, а это означает, что сетка должна находиться внутри моноблока. Возможный вариант конструктивного выполнения оптической схемы приведен на рис.3. Здесь в отличие от схемы на рис.1 телескопическая линза выполнена децентрированной, в качестве источника света используется светодиод, а вместо светоделителя – спектроделитель. При этом, во-первых, увеличивается яркость изображения сетки, во-вторых, исключаются все проблемы, связанные с хроматизмом в канале прицельной сетки.

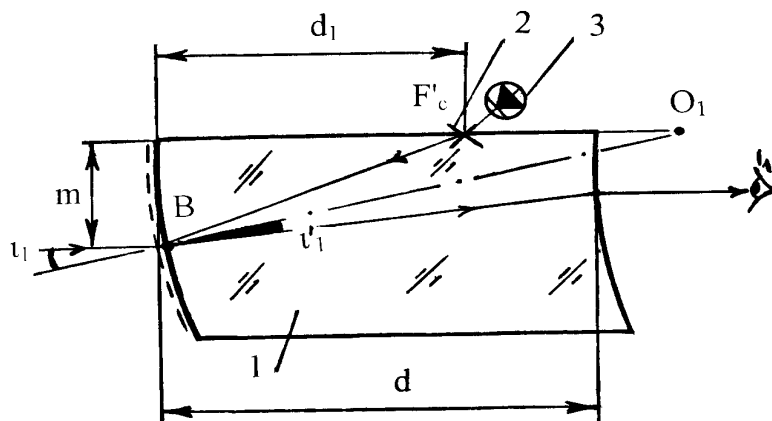


Рис. 3. Моноблочный ТП в виде децентрированной линзы: 1 – линза, 2 – сетка, 3 – светодиод

Подставляя в (3) значение $d = 1$ и $\mu_2 = 0,5513$, находим выражения для остальных конструктивных параметров моноблока: $r_1 = 0,4487 \Gamma^x / (\Gamma^x - 1)$; $r_2 = 0,4487 / (\Gamma^x - 1)$.

Удаление сетки d_1 в этом случае определяется из условия совмещения луча, который исходит от цели и пересекает первую преломляющую поверхность на высоте m в точке В, с отраженным лучом, который направлен из точки F'_c в точку В:

$$d_1 = r_1 - (r_1^2 - m^2)^{1/2} - m / \text{tg}(u_1 + u'_1),$$

где углы u_1 и u'_1 определяются по формулам (5) и (6).

Оценку параллактического рассогласования проведем по той же методике, что и для предыдущего варианта. На рис. 2 (кривая 2) представлен график зависимости $\rho = F(\Gamma^x)$ при $d = 1$, $m = 0,15$ и $\mu_2 = 0,5513$. Из анализа этого графика можно сделать следующие выводы. При допустимом рассогласовании 3 мрад увеличение такого децентрированного моноблока не должно превышать 1,6 крат.

Характеристики моноблочного ТП с децентрированной линзой приведены в таблице (столбец 3).

Для оценки надежности разработанного ТП можно использовать следующую методику. Вероятность P сохранения характеристик прицела зависит от конструктивной сложности его оптической схемы: чем больше в схеме пространственно разнесенных оптических узлов (объектив, сетка, оборачивающая система и окуляр) p , разделенных воздушными промежутками, тем больше вероятность того, что при многократном воздействии энергии отдачи на конструкцию прицела может произойти его разгерметизация и разъюстировка. Разъюстировка приведет к появлению дополнительной систематической ошибки углового положения линии прицеливания, нарушению пристрелки и появлению дополнительных шумов в наблюдаемом изображении цели. При

резком перепаде температуры разгерметизация ведет к изменению светорассеивания и светопропускания.

Таким образом выражение для вероятности Р можно представить как

$$P = 1 - \exp\{- [N_r / (p-1)NE]\}^{-1}, \quad (11)$$

где N – количество выстрелов, E- дульная энергия боеприпаса и N_r – гарантированный коэффициент надежности прицела. При моноблочном исполнении прицела $p=1$ в отличие от классической схемы, у которой $p=4$ [7], тогда из (11) следует, что при вероятности сохранения характеристик моноблочного ТП не зависит от динамики стрельбы и становится равной 1.

Выводы. Предложены технические решения моноблочных ТП с увеличенной надежностью и методики их расчетов. Достигнутые характеристики позволяют рекомендовать эти ТП для использования в составе автоматического стрелкового оружия. Дальнейшее совершенствование таких прицелов возможно путем повышения углового увеличения, снижения аберраций, доработки узла прицельной сетки.

1. *Сенаторов Н.В., Микитенко В.И.* Моноблочный телескопический визир малого увеличения // Вестник Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”, серия “Приборостроение”.- 2004.- Вып. 27.- С. 50-55.
2. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчёта оптических систем. - Л-д: “Машиностроение”, 1969.- 670 с.
3. *Сакин И.Л.* Инженерная оптика. – Л-д: «Машиностроение», 1976. – 255 с.
4. *Трубка С.В.* Расчёт двухлинзовых склеенных объективов. Справочник.- Л-д: “Машиностроение”, 1984.- 142 с.
5. *Кучеренко О.К., Сенаторов Н.В.* Однолинзовый коллиматорный прицел// «Оптический журнал» (Россия).- 1997.- Том 64, №11.- С. 58-59.
6. *Голуб Ю.Н., Большаков В.Н.* Пистолет «Форт-12» // Специальная техника и вооружение.- Науч.-метод. изд. – Киев: ОАО «Укрспецтехника». -2001. – № 2. – С. 33 – 34.
7. *Гурнович А.В., Сенаторов Н.В., Колобродов В.Г. и др.* Телескопические прицелы для стрелкового оружия// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. – 2004.- № 3(12).- С.35-41.