

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.067.5: 627.7.066.35

СМОТРОВОЕ ОКНО С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ

© 2013 г. В. И. Арбузов*, доктор физ.-мат. наук; В. Л. Кузовая**;
И. П. Полякова**, канд. техн. наук; А. Э. Пуйша**, канд. техн. наук

* Всероссийский научный центр “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Смотровые окна приборов наблюдения, которые используются при проведении работ с использованием высокоинтенсивного гамма-нейтронного излучения или в экстремальных условиях, в том числе при ликвидации последствий аварий на предприятиях атомной энергетики, должны обеспечивать необходимый уровень защиты операторов и наибольший угол наблюдения местности. Разработанные соотношения толщины специальных оптических материалов позволяют достигать коэффициента ослабления гамма-излучения до 5000 раз при мощности дозы до 5×10^6 Р/ч. Применение оптических компонентов с растрово-коническими структурами создает возможность расширения угловых полей и изменения направления осей визирования без изменения габаритно-компоновочных параметров.

Ключевые слова: оптический прибор наблюдения, стеклоблок, поле зрения, поле обзора, растрово-конические оптические элементы, ось визирования, радиационно-оптическая устойчивость стекол.

Коды OCIS: 120.4640

Поступила в редакцию 20.04.2012

При проведении работ с использованием высокоинтенсивного гамма-нейтронного излучения смотровые окна специальных камер должны обеспечивать необходимый уровень защиты операторов и наибольший угол наблюдения. Такие смотровые окна могут использоваться в качестве приборов оптического обзора механика-водителя бронемашин различного типа, работающих в экстремальных условиях, в том числе при ликвидации последствий аварий на предприятиях атомной энергетики.

Проблема повышения угловых полей зрения и обзора при одновременном повышении защитных свойств является ключевой проблемой при разработке смотровых приборов для техники, используемой в чрезвычайных ситуациях.

В настоящее время существуют два типа приборов наблюдения [1, 2]. Это смотровое окно (рис. 1), в котором оптические оси на вхо-

де и выходе системы совпадают. Такие приборы состоят из двух групп плоско-параллельных пластин, предназначенных для ослабления гамма-нейтронного излучения. На входе и выходе системы расположены защитные стекла. Входное защитное стекло таких приборов может иметь поперечный размер порядка 140×320 мм. Используются также и призмные перископические приборы статического обзора для бронированных машин, состоящие из призм и пластин с перископичностью 250–300 мм, с поперечным размером входного окна порядка 50×120 мм.

Приборы наблюдения должны обеспечивать противорадиационную защиту наблюдателей и обладать радиационно-оптической устойчивостью к поражающим факторам ионизирующего излучения с экспозиционной дозой гамма-излучения не менее 5×10^5 Р. Поэтому сте-

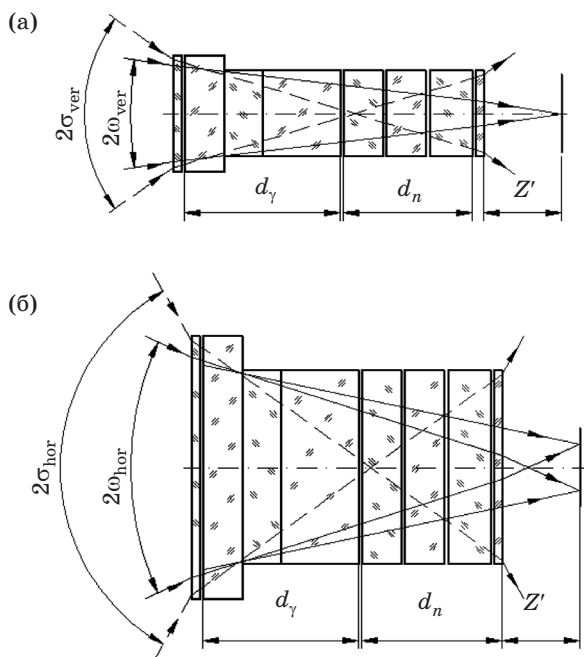


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема смотрового окна. Горизонтальное сечение – а, вертикальное сечение – б. d_γ – общая толщина первой группы пластин по ходу луча, d_n – общая толщина второй группы пластин по ходу луча, Z' – расстояние от плоскости наблюдения до последней поверхности оптической системы. σ_{hor} , σ_{ver} – угловые поля обзора, соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях, ω_{hor} , ω_{ver} – угловые поля зрения, соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

клубок этих приборов состоит не менее чем из двух частей, выполненных из различных оптических материалов, например, крон-флинт серии 200 или оргстекло-флинт серии 200.

Угловые поля обзора местности и угловые поля зрения приборов определяются поперечными размерами защитных стекол и расстоянием от плоскости наблюдения до последней поверхности оптической системы (Z'). В табл. 1 приведены основные оптические параметры приборов обоих типов.

Повышение степени защиты от гамма-нейтронного излучения

Первая по ходу светового луча группа пластин (рис. 1) с общей толщиной d_γ состоит из содержащего свинец оптического стекла с большим коэффициентом поглощения γ -излучения μ_γ .

Вторая группа пластин с общей толщиной d_n выполнена из полимерного оптического ма-

Таблица 1. Основные оптические параметры приборов наблюдения

Оптические параметры	Смотровое окно	Прибор статического обзора
размеры входного окна, мм	140×320	50×120
Z' , мм	100,0	100,0
угловое поле обзора в горизонтальной плоскости, $2\sigma_{hor}$, град	120	80
угловое поле обзора в вертикальной плоскости, $2\sigma_{ver}$, град	50	30
угловое поле зрения в горизонтальной плоскости, $2\omega_{hor}$, град	52	36
угловое поле зрения в вертикальной плоскости, $2\omega_{ver}$, град	18	7

териала с большим коэффициентом поглощения нейтронного излучения. Между толщинами обеих групп пластин выполняется соотношение $d_\gamma = (1,1-1,9)d_n$. Суммарная толщина вдоль оптической оси пластин первой группы определяется зависимостью

$$d_\gamma = \ln K_\gamma / \mu_\gamma, \quad (1)$$

где K_γ – кратность ослабления γ -излучения, μ_γ – коэффициент поглощения γ -излучения оптическим стеклом.

В качестве оптического стекла, содержащего свинец, может быть использовано новое оптическое стекло марки ТФ18112, обладающее уникальными свойствами. В табл. 2 приведены основные параметры стекла ТФ18112 по

Таблица 2. Основные параметры стекол ТФ1812 и ТФ105

Параметры	ТФ105	ТФ18112
содержание PbO, мол %	35,0	40,0
плотность, г/см ³	4,77	4,31
λ_{bound} , нм	450	355
n_e	1,7617	1,6941
v_e	27,32	38,1
Доза, Р	ΔD	
1×10^5	0,088	0,017
1×10^6	0,285	0,070
1×10^7	–	0,103

сравнению с ближайшим аналогом – стеклом марки ТФ105 [3].

Как видно из таблицы, стекло ТФ18112 при увеличенном содержании оксида свинца имеет меньшую плотность и значительно расширенный в коротковолновую область рабочий спектральный диапазон (до $\lambda_{\text{bound}} = 355$ нм). Кроме того, под действием ионизирующего излучения с дозой до 1×10^6 Р образец стекла ТФ18112 толщиной 1 см имеет значительно меньшее приращение оптической плотности ΔD в видимой области спектра, чем стекло ТФ105, а при дозе 1×10^7 Р величина ΔD у стекла ТФ18112 меньше, чем у ТФ105 при дозе 1×10^5 Р.

В изготовленном макете смотрового прибора вторая группа пластин выполнена из полимерного оптического материала СО-120. Суммарные толщины пластин первой и второй групп равны $d_\gamma = 220$ мм и $d_n = 150$ мм соответственно, при этом выполняется соотношение $d_\gamma = 1,466d_n$.

Как показали проведенные испытания, данный смотровой прибор может быть использован в условиях воздействия γ -излучения с мощностью дозы до 5×10^6 Р/ч с коэффициентом ослабления γ -излучения до 5000 раз при наличии нейтронного излучения с энергией нейтронов более 2 МэВ.

Каждая группа пластин с толщинами, соответственно, d_γ , d_n может быть склеена в единый блок и заклеена защитными пластинами из оптического стекла К208 с просветляющими покрытиями на наружных поверхностях. В этом варианте светопропускание всей системы стеклоблока увеличивается с $\tau = 0,32$ (вариант без склейки пластин) до 0,45.

Изменение углов наблюдения

Возможности изменения угловых полей обзора и зрения полезны для приборов обоих типов – как для смотровых окон специальных камер, так и для приборов статического обзора. Особенно это актуально для перископических приборов, установленных на подвижных носителях, например, в бронированных машинах. Размер непросматриваемой зоны вокруг машины достигает примерно 20–30 м, что является неприемлемым при работе в экстремальных условиях и в ограниченных пространствах.

Увеличение углов наблюдения возможно за счет увеличения поперечных размеров входных окон и уменьшения размеров приборов вдоль

оптической оси. Однако у смотровых окон специальных камер возможность увеличения размеров входных окон ограничена возможностями поставки высококачественного оптического стекла серии 200 или ТФ18112 больших диаметров, а уменьшение общей толщины стеклянных пластин приводит к снижению защитных свойств стеклоблока. В перископических приборах статического обзора увеличение габаритных размеров призмы приводит к увеличению размеров отверстия для установки приборов в машине и, как следствие, к снижению прочностных характеристик машины: уменьшение перископичности приборов невозможно по конструктивно-компоновочным требованиям размещения приборов внутри машины, а уменьшение общей толщины пластин вдоль оптической оси снижает защитные параметры прибора.

Наиболее перспективным направлением развития приборов наблюдения с возможностью изменения углового поля зрения является использование оптических элементов с расставными коническими структурами (РКС). Они представляют собой плоскую пластину из оптически прозрачного органического материала, на одну из поверхностей которой нанесена растровая коническая структура, эквивалентная стеклянной линзе с отрицательной оптической силой. Линзы РКС могут располагаться на входе, в середине и на выходе оптической системы прибора.

На рис. 2 показана принципиальная оптическая схема перископического прибора наблюдения с возможным расположением линз

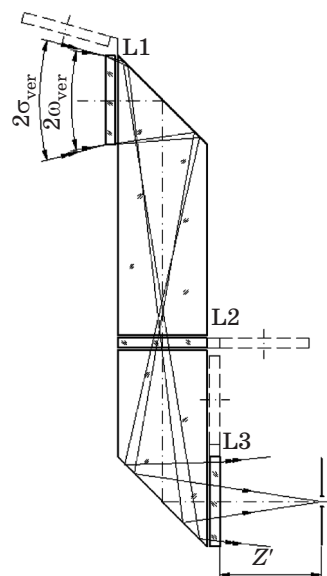


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема прибора статического обзора с линзами РКС L1, L2, L3 (вертикальное сечение). σ_{ver} – угловое поле обзора и ω_{ver} – угловое поле зрения в вертикальной плоскости, Z' – расстояние от плоскости наблюдения до последней поверхности оптической системы.

РКС в начале (L1), в середине (L2) и в конце (L3) оптического прибора.

Линзы РКС могут устанавливаться без существенного изменения конструкции прибора наблюдения с возможностью ввода-вывода из оптической системы, что удобно для наблюдателя.

Влияние эффективности размещения линз РКС на увеличение углового поля наблюдения

Рассмотрим эффективность линз РКС при использовании их в перископическом приборе статического обзора.

Такие приборы, так же как и смотровые окна, должны обеспечивать противорадиационную защиту экипажа. Поэтому принципиально они представляют собой стеклоблок, состоящий не менее чем из двух частей, выполненных из различных оптических материалов с длиной хода луча в стекле l_{g1} и l_{g2} .

На рис. 3 представлена оптическая развертка вертикального сечения прибора наблюдения, приведенная к воздуху.

$$l_1 = l_{g1}/n_1, l_2 = l_{g2}/n_2, \quad (2)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления соответствующих оптических материалов.

Наибольшее угловое поле зрения без РКС определяется формулой $\text{tg}\sigma_{\max} = h_1/(l_1 + l_2 + Z')$, где h_1 – половина размера входного окна прибора. Эффективность использования РКС оценивается через угловое увеличение $\Gamma_{\text{eff}} = \text{tg}\sigma_{\Sigma}/\text{tg}\sigma_{\max}$. Рассмотрим рисунок подробнее.

1. Линза L1 на входе системы (рис. 3а) может иметь рабочие размеры, равные размеру входного окна прибора, т. е. луч входит на высоте h_1 . Увеличение углового поля с помощью линзы L1 ограничивается только целесообразностью в зависимости от назначения прибора.

$$\Gamma_{\text{eff}1} = \Gamma_1 \text{tg}\sigma_1 / \text{tg}\sigma_{\max}, \sigma_1 = \sigma_{\max}, \Gamma_{\text{eff}1} = \Gamma_1. \quad (3)$$

Наиболее приемлемые значения $\Gamma_1 = 1,5-3^{\times}$.

2. Линза L2 расположена в середине стеклоблока (рис. 3б) на расстоянии l_1 от входного окна. Угловое увеличение линзы Γ_2 ограничено размером входного окна h_1 , поэтому линза L2 используется неполным диаметром, т. е. $h_2 < h_1$.

Наибольший угол луча, под которым он проходит через край входного окна, имеет значение

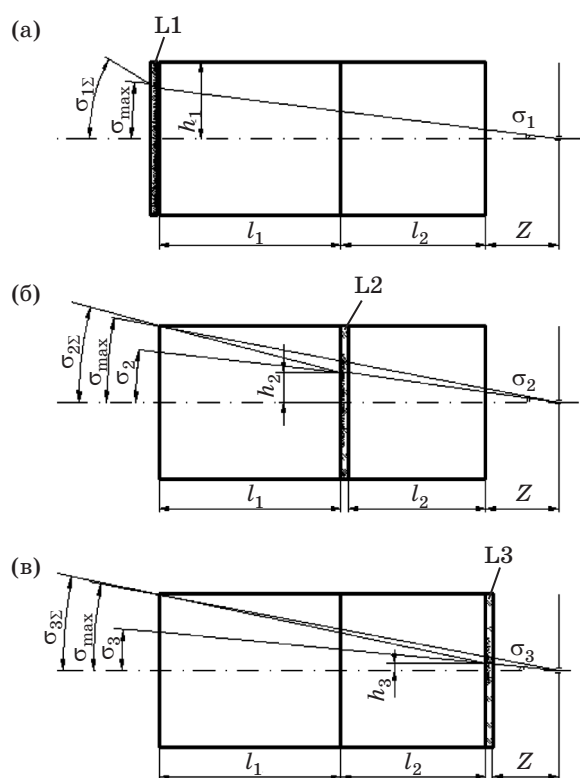


Рис. 3. Оптическая развертка вертикального сечения прибора наблюдения с линзой РКС. Σ – угловое поле зрения без РКС, σ_{Σ} – угловое поле зрения с РКС, Z – удаление зрочка наблюдателя от последней поверхности прибора вдоль оптической оси, h_1 – половина размера входного окна прибора.

$$\text{tg}\sigma_{2\Sigma} = (h_1 - h_2)/l_1 = \Gamma_2 \text{tg}\sigma_2, \quad (4)$$

где $\text{tg}\sigma_2 = h_2/(l_2 + Z')$.

Эффективность линзы L2 определяется соотношением

$$\Gamma_{\text{eff}2} = \text{tg}\sigma_{2\Sigma} / \text{tg}\sigma_{\max} = \Gamma_2 \text{tg}\sigma_2 / \text{tg}\sigma_{\max}. \quad (5)$$

В зависимости от места расположения линзы L2, т. е. от соотношения величин l_1 , l_2 и Z' наиболее вероятные значения $\Gamma_{\text{eff}2} = 1,3-2^{\times}$.

3. Линза L3, расположенная на выходе системы (рис. 3в), также работает в неполном размере, т. е. $h_3 < h_1$. Наибольший угол луча, под которым он проходит через край входного окна, определяется формулой $\text{tg}\sigma_{3\Sigma} = (h_1 - h_2)/(l_1 + l_2)$. Если линза имеет увеличение Γ_3 , то $\text{tg}\sigma_{3\Sigma} = \Gamma_3 \text{tg}\sigma_3$, где $\text{tg}\sigma_3 = h_3/Z$. Эффективность линзы L3 определяется соотношением $\Gamma_{\text{eff}3} = \text{tg}\sigma_{3\Sigma} / \text{tg}\sigma_{\max} = \Gamma_3 \text{tg}\sigma_3 / \text{tg}\sigma_{\max}$. Наиболее приемлемые значения $\Gamma_{\text{eff}3} = 1,2-1,5^{\times}$.

4. При использовании линз РКС для увеличения углов наблюдения местности происходит изменение видимого увеличения приборов Γ_{vis}

Таблица 3. Значения углов наблюдения в приборах статического обзора

Параметры	Углы, град	
	штатный образец	прибор с РКС
угловое поле обзора в горизонтальной плоскости	73	180
угловое поле обзора в вертикальной плоскости	27	70
верхний угол поля обзора в вертикальной плоскости	12	30
нижний угол поля обзора в вертикальной плоскости	15	40
угловое поле зрения в горизонтальной плоскости	36	80
угловое поле зрения в вертикальной плоскости	7	12

в сторону уменьшения в соотношении $\Gamma_{vis} = 1/\Gamma_{eff}$.

На базе прибора наблюдения ТНПО-160 разработан и изготовлен макетный образец прибора статического обзора с растровым коническим элементом, расположенным на входе в оптическую систему. Это позволило при сохранении перископичности и габаритов прибора значительно увеличить углы наблюдения местности. В табл. 3 приведены основные углы наблюдения полученной системы по сравнению с прибором без РКС.

Изменение направления оси визирования

Применение линз РКС позволяет без изменения габаритно-компоновочных решений приборов получить большую информативность наблюдения и существенно уменьшить непрозрачиваемую зону вокруг машины-носителя.

С помощью элементов с РКС возможно изменение направления оси визирования при наблюдении через смотровое окно специальных камер, а также через перископический призмный прибор статического обзора, что особенно важно при работе с близко расположенными объектами или в условиях ограниченного пространства. Для этого используются линзы РКС, оптические оси которых смещены относительно оптической оси прибора наблюдения. Так же как и при изменении угла наблюдения местности, линзы РКС могут располагаться в начале, в середине или в конце оптической системы. Рассмотрим эти варианты.

1. При расположении линзы РКС L1 на входном окне прибора (рис. 4а) угол наклона оси визирования выбирается в зависимости от назначения прибора и ограничен только габаритами машины-носителя. Угол наклона

на оптической оси визирования в этом случае определяется по формуле $\Delta\alpha_{01} = \Gamma_1 \operatorname{tg}\alpha_1$, где Γ_1 – увеличение линзы L1, α_1 – угол визирования на ось линзы РКС при смещении оси на $\Delta h_1/(l_1 + l_2 + Z')$.

2. При расположении линзы L2 в середине системы (рис. 4б) и смещении ее центра на Δh_2 угол визирования на ось линзы L2 вычисляется по формуле $\operatorname{tg}\sigma_2 = \Delta h_2/(l_2 + Z')$.

Если линза имеет увеличение Γ_2 , то изменение угла наклона оптической оси визирования определяется соотношением

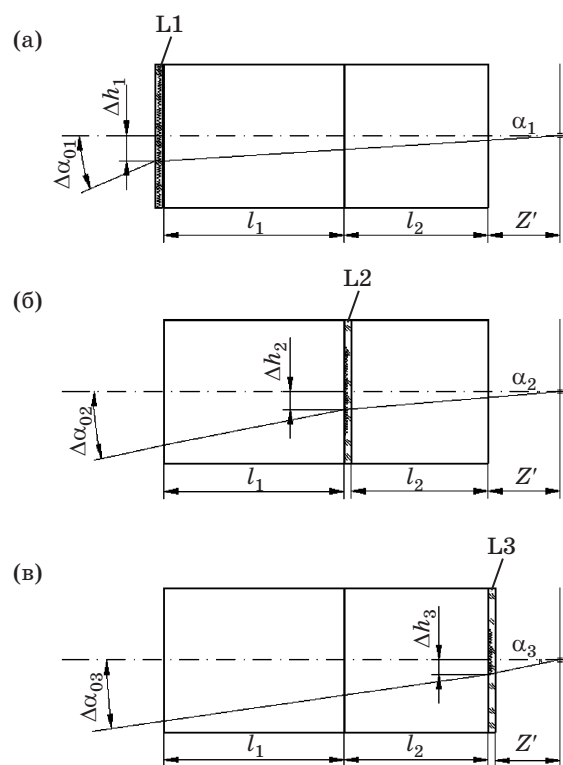


Рис. 4. Принципиальные схемы изменения осевого направления визирования в приборах наблюдения с линзой РКС. Пояснения к обозначениям в тексте.

$$\Delta\alpha_{02} = \Gamma_2 \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (6)$$

В связи с тем, что ось визирования не должна выходить за пределы входного окна, эффективность линзы L2 определяется величиной Δh_2 . Увеличение линзы находится в пределах $\Gamma_2 = 1,3-2^\times$.

3. При использовании линзы РКС L3 на выходном окне системы (рис. 4в) и смещении ее центра на Δh_3 угол визирования на оптическую ось линзы L3 равен $\operatorname{tg}\alpha_3 = \Delta h_3/Z'$.

Возможный угол наклона оптической оси системы в этом случае определяется увеличением линзы Γ_3 и ограниченным размером входного окна с высотой h_1

$$\Delta\alpha_{03} = \Gamma_3 \operatorname{tg}\alpha_3. \quad (7)$$

Эффективность работы этой линзы ограничена большим удалением линзы от входного окна прибора и величиной $\Gamma_3 = 1,3-1,5^\times$.

4. Изменение угла визирования возможно оптическими элементами, у которых увеличение $\Gamma = 1^\times$, например, оптическим клином. В этом случае величина $\Delta\alpha_0$ определяется оптическими параметрами системы и габаритными ограничениями корпуса машины-носителя.

Изменение угла визирования системы возможно в любом направлении в зависимости от направления и смещения оптической оси линзы РКС от оптической оси прибора, необходимыми для каждого конкретного случая.

5. Одновременным использованием двух линз РКС, оптические силы которых различны по величине и противоположны по знаку, можно получить систему наблюдения с видимым увеличением, отличным от 1^\times , например $\Gamma_{\text{vis}} = 1,5-2^\times$, без использования классической оптики. Такая система аналогична телескопической системе Галилея. Она будет работать

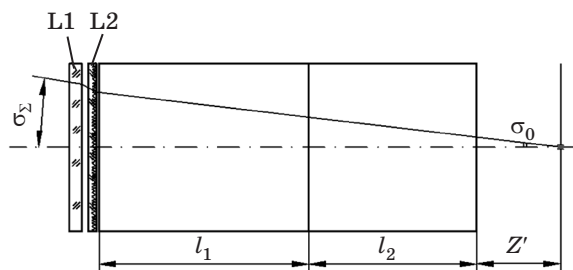


Рис. 5. Принципиальная схема прибора наблюдения с $\Gamma_{\text{vis}} > 1^\times$ при одновременном использовании двух линз РКС. Пояснения к обозначениям в тексте.

с большим удалением плоскости наблюдения от последней поверхности системы Z' . Принципиальная схема такого прибора наблюдения с $\Gamma_{\text{vis}} > 1^\times$ приведена на рис. 5. Линза L1 имеет положительную оптическую силу, линза L2 – отрицательную, при этом эквивалентное фокусное расстояние линзы L1 больше чем у L2. В таких системах угловые поля наблюдения уменьшаются в соответствии с выражением $\Gamma_{\text{vis}} = \operatorname{tg}\alpha_0/\operatorname{tg}\alpha_{\Sigma} = 1/\Gamma_{\text{eff}}$.

Изменение направления оси визирования в этих приборах также возможно за счет одновременного смещения оптических осей обеих линз РКС относительно оси прибора.

Если из хода лучей вывести линзу L1, то линза L2 увеличивает углы наблюдения, но при этом $\Gamma_{\text{vis}} < 1^\times$.

Выводы

Разработанные соотношения толщин двух групп оптических пластин, из которых состоят смотровые защитные окна, и применение специальных оптических материалов позволяют создать смотровые приборы с высокой степенью защиты от нейтронного и γ -излучения. Они могут использоваться в условиях воздействия γ -излучения с мощностью дозы до 5×10^6 Р/ч с кратностью ослабления γ -излучения до 5000 раз при наличии нейтронного излучения с энергией нейтронов более 2 МэВ.

Применение нетрадиционных оптических компонентов, в том числе линз РКС, для построения приборов наблюдения с расширенными функциональными свойствами имеет большое значение. Возможность расширения угловых полей зрения приборов и изменения направления осей наблюдения обеспечивает приборам качественно новые характеристики без изменения габаритно-компоновочных параметров. Одновременно устраняется необходимость в дополнительных смотровых окнах, повышаются защитные качества машин-носителей. Данные свойства чрезвычайно важны для приборов, размещенных на подвижных носителях, дистанционно-управляемых роботизированных транспортных средствах, аварийно-технических комплексах, работающих в условиях радиационного, химического и иного загрязнения. На принципы построения приборов статического обзора с линзами РКС получен патент РФ [4].

Использованием линз РКС с различными параметрами можно получить оптические

характеристики системы как с увеличением углового поля наблюдения без изменения направления оси визирования, так и с изменением направления оси визирования в любом желаемом направлении. При одновременном использовании не менее двух линз РКС с раз-

личными параметрами можно получить систему статического обзора с видимым увеличением, отличным от $1\times$, например $\Gamma_{\Sigma} = 1,5-2\times$, без использования классической оптики. При этом возможно изменение направления оси визирования.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы наблюдения призмные и стеклблоки. Основные параметры и технические характеристики. Нормаль Министерства, НО 5.386-76, 1976.
 2. Основы проектирования вооружения танка. Т. 2 // Теория и конструирование танка / Под ред. Исаева П.П. М.: Машиностроение, 1982. С. 145–150.
 3. *Алешин И.Н., Полякова И.П., Пуйша А.Э.* Смотровой прибор // Патент РФ № 2352968. 2009.
 4. *Михеев П.А., Пуйша А.Э., Гуляков А.В., Полякова И.П.* Прибор статического обзора // Патент РФ № 2147760. 2000.
-