

УДК 621.398

Термовидеосистема для установки на космические аппараты и ракеты-носители

Д. И. Климов¹, В. А. Благодырев²

²к. т. н.

^{1,2}АО «Российские космические системы»

e-mail: tm016@rniikp.ru

Аннотация. Рассматривается термовидеосистема с возможностью использования термозащиты и защиты объективов и приборов с зарядовой связью (ПЗС) от воздействия радиационных факторов для видеокамер (ВК), расположенных вблизи термонагруженных элементов космических аппаратов (КА) и ракет-носителей (РН) для отслеживания термообстановки посредством видеотелеметрии. Представлена модель термокожуха, его основные параметры и характеристики. Получены выражения для подбора толщины термослоя в зависимости от подлетного времени РН, а также толщины термослоя для заданного времени воздействия температуры. Приведен пример термозащиты ВК с заданным диаметром зрачка объектива и подлетным временем РН на опорную орбиту. Предлагается использовать перископическое устройство для защиты от воздействия радиационных факторов линз объективов и ПЗС. Приведены выражения для размера зеркал перископа, а также для угла поворота зеркал перископов при одновременном использовании двух видеокамер, направленных на одно поле изображения объекта.

Ключевые слова: термокожух, каменная вата, подлетное время РН, теплопроводность, удельная теплоемкость, перископ, зеркало, угол поворота, угол обзора

ThermoVideoSystem for Installation on Spacecraft

D. I. Klimov¹, V. A. Blagodyryov²

²candidate of engineering science

^{1,2}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: tm016@rniikp.ru

Abstract. The thermovideosystem with possibility of use of thermoprotection and protection of objectives and devices with charging communication from influence of radiating factors for videocameras, the space vehicles located near to thermoloaded elements and carrier rockets for tracing of thermoconditions by means of video telemetry is considered. The thermocasing model, its key parameters and characteristics is presented. Expressions for selection of a thickness of a thermolayer depending on flying time of carrier rockets, and also a thickness of a thermolayer for preset time of influence of temperature are received. The example of thermoprotection videocameras with the set diameter of a eye of an objective and flying time of carrier rockets for a basic orbit is resulted. It is offered to use the periscopic device for protection against influence of radiating factors of lenses of objectives and devices with charging communication. Expressions for the size of mirrors of a periscope, and also for an angle of rotation of mirrors of periscopes are resulted at simultaneous use of two videocameras directed on one image box of object.

Keywords: hermocasing, stone cotton wool, flying time of the rocket, heat conductivity, specific thermal capacity, periscope, mirror, an angle of rotation, review angle

Общие понятия

Для надежного функционирования видеокамеры при низких и высоких температурах необходима ее защита в виде термокожуха.

Термокожух — основное средство защиты видеокамеры при ее эксплуатации в условиях космического пространства для организации видеонаблюдения термонагруженных элементов КА или РН. Термокожухи можно разделить на две основные группы: термокожухи и гермокожухи. Термокожухи оснащены системами обогрева (охлаждения), которые обеспечивают корректную работу камер при низких (высоких) температурах. А гермокожухи защищают видеокамеры от попадания влаги и пыли. Термокожухи способны также защищать камеры видеонаблюдения от различных механических повреждений.

Основной задачей термокожухов является защита видеокамер от механических повреждений, влияния внешней среды и обеспечение работоспособности камеры при различных условиях эксплуатации.

Основной параметр термокожуха, имеющий важное значение, — диапазон рабочих температур. Это параметр показывает, при какой воздействующей температуре термокожух сможет обеспечить нормальную работу видеокамеры.

Защита камер в условиях низких (высоких) температур может быть достигнута несколькими способами [1]:

- используется обогрев (охлаждение) монтажной пластины термокожуха, на которую устанавливается камера;
- обогрев (охлаждение) линзы объектива по периметру;
- обогрев (охлаждение) корпуса всей камеры.

В некоторых термокожухах скомбинированы разные способы поддержания температуры внутреннего объема.

При использовании термокожуха возникает угроза выпадения конденсата (запотевание) на смотровом стекле. Эффективный способ борьбы с запотеванием — распределение мощности нагревателя вблизи линзы объектива или обогрев (охлаждение) самой линзы по ее периметру. При наличии атмосферы иногда используются вентиляторы,

обеспечивающие движение воздуха (газа) внутри термокожуха.

Выбор размера термокожуха обусловлен внутренним полезным объемом, а также необходимостью размещения дополнительных устройств, входящих в комплектацию видеокамер. Внутри термокожуха может быть установлен встроенный источник питания, устройство передачи видеосигнала по каналу связи с устройством передачи видеоизображения.

Помимо термозащиты ВК от перегрева и охлаждения, для защиты от воздействия радиационных факторов линз объективов и фоторегистрирующих приборов предлагается использовать перископическое устройство, выполненное из титана с отражающим зеркалом (под углом 45°) из никеля ($T_{пл} = 1736 \text{ K}$), расположенным на главной оптической оси объектива.

В случае расширения спектрального диапазона видеорегирующей системы для измерения температурных параметров посредством видеотелетрии вблизи термонагруженных элементов КА и РН используются две ВК, направленные на одну и ту же область обзора объекта, одна из которых является фоторегистрирующим прибором с «виртуальной» фазой (ВФПЗС) и объективом из кварцевого стекла, другая — с инфракрасным фоторегистрирующим прибором (ИК ПЗС) и объективом из оптического кремния [5, 6].

Разработка модели термокожуха для отслеживания термообстановки при помощи ВК, расположенных вблизи термонагруженных элементов РН

В нашем случае видеокамеры заключены в термокожух и крепятся жестко к обтекателю РН изнутри для наблюдения термообстановки в области двигателей и насосов. Изменение температуры под обтекателем зависит только от теплового излучения двигателей. Термокожух негерметичен: дегазация происходит естественным образом по мере набора высоты РН. Информация передается от ВК на модуль сбора информации (МСИ) по термозащищенному кабелю.

В рассматриваемой ситуации термокожух будет состоять из тугоплавкого металла высокой плотности, не являющегося дорогостоящим. Наиболее подходящий в этом случае металл — титан. В качестве термоизоляционного материала необходимо взять не пожароопасный материал с высокой температурой плавления и предельно низким коэффициентом теплопроводности. Таким материалом является каменная вата — минеральная вата, изготовленная из расплава изверженных горных пород [2].

На рис. 1 приведен вариант термокожуха с расположенной в нем ВК и кабелем связи и питания. Защитный титановый корпус, термослой и корпус ВК плотно прилегают друг к другу, не создавая между собой воздушного пространства.

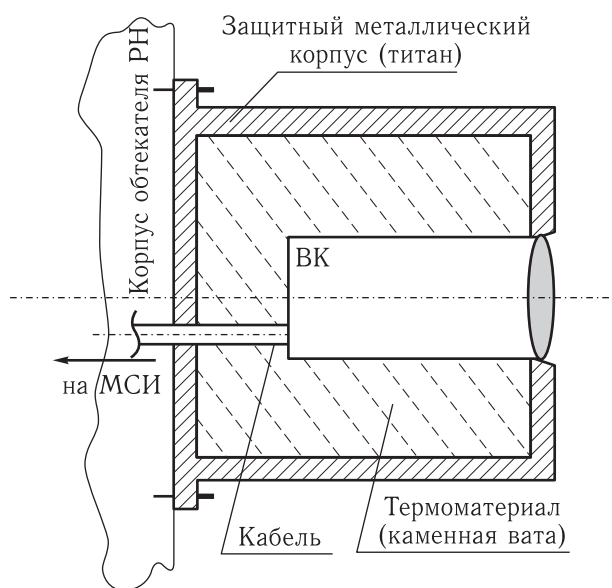


Рис. 1. Модель термокожуха с видеокamerой

Самым незащищенным элементом в рассматриваемой системе является линза объектива ВК, изготавливаемая из кварцевого стекла или оптического кремния, так как она не защищена термокожухом. Температуры деформации элементов составляют: 1300 К для кварцевого стекла и 1100 К для оптического кремния. Эти температуры и будут являться максимально возможными значениями (T_{\max}) для получения видеoinформации.

Если за исходное состояние термообстановки РН брать нормальные условия, то $T_{\text{ну}} = 300$ К, а максимальная рабочая температура ВК не должна

превышать $T_{\max P} = 350$ К. При этом температуры деформации объективов $T_{\max} = 1300$ К для кварцевого стекла и $T_{\max} = 1100$ К для оптического кремния допускают их применение в условиях с более низкой температурой (\sim на 10%).

В таблице приведены значения термодинамических величин для перечисленных выше материалов [3].

Таблица. Термодинамические характеристики материалов, применяемых для изготовления термокожуха

Материал	Температура плавления, К	Коэффициент теплопроводности, χ , $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}\right)$	Удельная теплоемкость, c_m , $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}}\right)$	Плотность, ρ , $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$
Титан	1933	21,9	540	4540
Каменная вата	1275	0,04	800	30–220

Так как $c_{m_Ti} < c_{m_ваты}$ и $\chi_{Ti} \gg \chi_{ваты}$, то термозащита титаном по сравнению с термозащитой каменной ватой пренебрежимо мала, будем учитывать только термозащиту каменной ватой, меняя толщину слоя ваты. Титан выполняет функцию жесткого корпуса и крепления. Толщина его в среднем зависит от механических нагрузок и должна составлять $\sim 1-3$ мм.

Определим зависимость времени нагрева ВК от толщины слоя каменной ваты (в диапазоне — от нормальных условий до максимальной рабочей температуры для ВК).

Полная мощность тепловых потерь, идущая от одной грани параллелепипеда к другой при толщине пробега x , площади сечения S , изменении температуры ΔT и коэффициенте теплопроводности χ , можно определить как [4]:

$$P = -\chi \frac{S \Delta T}{x}. \quad (1)$$

Так как по определению мощность есть количество энергии в единицу времени t , а с точки зрения теплопередачи энергия является количеством теплоты Q в единицу времени, то

$$Q = \frac{|P|}{t}. \quad (2)$$

Удельная теплоемкость материала выражается соотношением

$$c_m = \frac{Q}{mT_{\text{ну}}}, \quad (3)$$

где m — масса используемого материала. Известно, что

$$m = \rho V = \rho Sx. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), а далее (3) и (1) в (2), получим:

$$\frac{c_m \rho S x T_{\text{ну}}}{t} = \chi \frac{S(T_{\text{max}} - T_{\text{max}P})}{x}. \quad (5)$$

Из (5) определим значения t и x :

$$t(x) = \frac{c_m}{\chi} \frac{T_{\text{ну}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{max}P}} \rho x^2, \quad (6)$$

$$x(t) = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\chi}{c_m} \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{max}P}}{T_{\text{ну}}} t}. \quad (7)$$

Если подлетное время РН на опорную орбиту неизвестно (рис. 2), то термокожух подбирают исходя из максимально возможных габаритов видеорегирующей системы, учитывая при этом максимальную толщину слоя каменной ваты из зависимости $t(x)$, описанной выражением (6). В случае заданного подлетного времени из зависимости $x(t)$, описанной выражением (7), выбирают минимально возможную толщину слоя каменной ваты.

Построим графики по соотношениям (6) (рис. 2) и (7) (рис. 3) для двух значений максимально допустимой температуры T_{max} : 1300 К и 1100 К, учитывая, что плотность каменной ваты составляет 200 кг/м³.

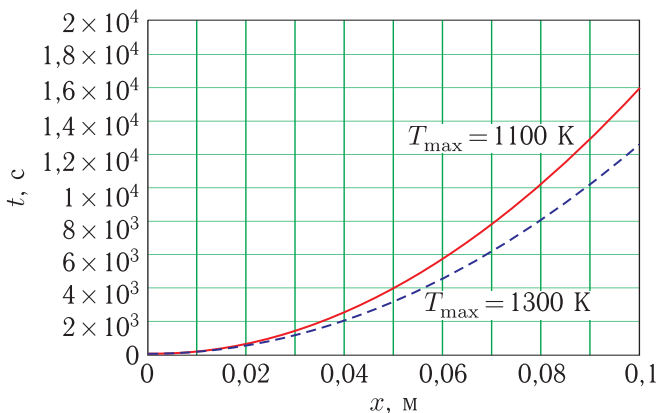


Рис. 2. Зависимость подлетного времени РН от толщины термослоя

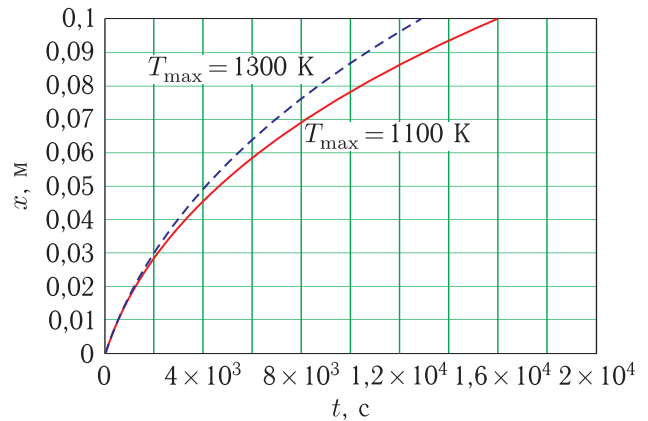


Рис. 3. Зависимость толщины термослоя от подлетного времени РН

Из графиков видно, что чем толще термослой, тем большее время будет работать видеорегирующая система.

Известно, что вывод РН на опорную орбиту длится примерно 10–12 мин. Для видеокамеры, находящейся в термонагруженной зоне, с учетом максимально допустимой температуры деформации для объектива из оптического кремния (T_{max} , т.е. 1100 К), толщина защитного термослоя, выполненного из каменной ваты плотностью 200 кг/м³, будет составлять ~ 0,021 м (21 мм) (см. рис. 3).

Разработка модели перископического устройства для защиты от воздействия радиационных факторов линз объективов и фоторегирующих приборов видеокамер

Помимо термозащиты ВК от перегрева и охлаждения, для защиты линз объективов и фоторегирующих приборов от воздействия радиационных факторов можно использовать перископическое устройство, выполненное из титана с отражающим зеркалом (под углом 45°) из никеля ($T_{\text{пл}} = 1736$ К), расположенным на главной оптической оси объектива (рис. 4).

Определим выражение для минимального значения размера пятна на зеркале перископа D_{min} ,

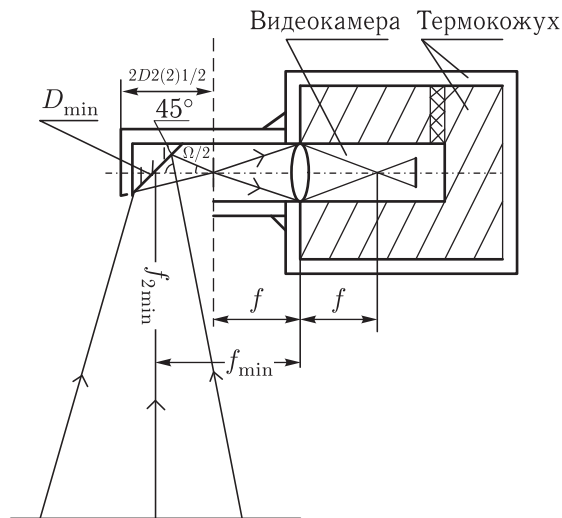


Рис. 4. Защита ВК термокожухом и перископом

проецируемого на фоторегистрирующий прибор через объектив и зеркало перископа при заданном значении угла обзора $\Omega = 28^\circ$ и f_{\min} (рис. 5), а также минимальные габариты самого зеркала D . Так как зеркало перископа можно расположить сколь угодно близко к объективу ВК, но так, чтобы оно не касалось самого объектива, а объектив и прибор с зарядовой связью (ПЗС) должны быть защищены от прямого попадания светового потока и радиационных воздействий, то расстояние от центра объектива до зеркала (на главной оптической оси) выберем равным половине расстояния от центра объектива до центра диагонали фоточувствительной зоны ПЗС [7], т. е. $f_{\min} = f + f'$. При этом длина раструба перископа будет равна фокусному расстоянию линзы объектива, а оставшееся расстояние до зеркала перископа на главной оптической оси, $f_{\min} - f = f + f' - f = f' = \frac{f}{d}l$, где l — диагональный размер фоточувствительной зоны ПЗС. На рис. 5 угол $\beta = \Omega/2$.

Сначала выразим D_1 из системы уравнений

$$\begin{cases} f_{\min} = L_1 \cos \Omega/2 + D_1 \cos \pi/4, \\ L_1 \sin \Omega/2 = D_1 \sin \pi/4, \end{cases} \quad (8)$$

отсюда

$$D_1 = \frac{f_{\min}}{\cos \pi/4 + \sin \pi/4 \times \operatorname{ctg} \Omega/2}. \quad (9)$$

Выразим D_2 :

$$D_2 = D_1 \operatorname{tg}(\pi/4 + \Omega/2). \quad (10)$$

Таким образом,

$$D_{\min} = D_1 + D_2, \quad (11)$$

$$D = 2D_2. \quad (12)$$

Подставляя (9) и (10) в (11) и (12), получим выражения для D_{\min} и D :

$$D_{\min} = \frac{2\sqrt{2}f_{\min}}{(1 - \operatorname{tg}(\Omega/2))(1 + \operatorname{ctg}(\Omega/2))}, \quad (13)$$

$$D = \frac{2\sqrt{2}f_{\min}(1 + \operatorname{tg}(\Omega/2))}{(1 - \operatorname{tg}(\Omega/2))(1 + \operatorname{ctg}(\Omega/2))}. \quad (14)$$

Построим графические зависимости $D_{\min}(f_{\min}, \Omega)$ и $D(f_{\min}, \Omega)$ (рис. 6–9).

С увеличением угла обзора ВК и расстояния от объектива до зеркала перископа размеры зеркала увеличиваются, причем более существенное увеличение происходит при увеличении угла обзора выше 40° и использовании короткофокусных объективов.

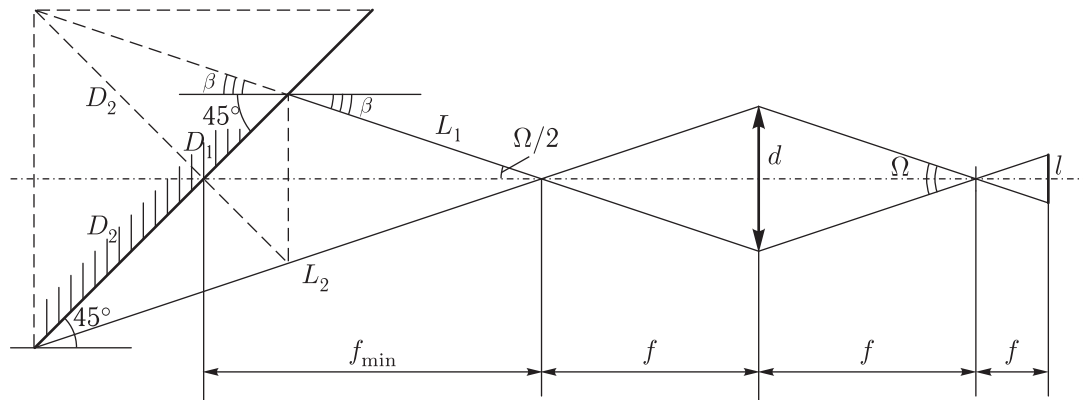
При наблюдении одного поля изображения объекта с двух ВК (одна ВК с ВФПЗС и объективом из кварцевого стекла, другая ВК с ИК ПЗС и объективом из оптического кремния) требуется, чтобы главные оптические оси объективов ВК через зеркала перископов проходили через одну точку на контролируемом объекте. Для этого необходимо повернуть зеркала перископов на угол $\gamma/2$ навстречу друг другу (рис. 10) [8], при этом торцы перископов с зеркалами должны располагаться на одной плоскости. Для обеих ВК f_{\min} должно быть одинаковым. Также одинаковым будет минимальное расстояние от главной оптической оси до центра объекта $f_{2\min}$ и угол обзора Ω .

Так как внешние размеры термокожухов должны быть одинаковыми, то ввиду разных диаметров объективов будут различаться и размеры видеокамер, а следовательно, и толщина термослоя.

Рассчитаем угол γ .

$$z_{\min} = 2D_2 + 2\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (15)$$

где Δ_1 — толщина титановой оболочки термокожуха, Δ_2 и Δ_3 — толщины термослоев.



- d — диаметр зрчка объектива;
- l — диагональный размер ПЗС;
- Ω — зона обзора;
- f_{2min} — минимальное расстояние на главной оптической оси от объектива до объекта, при котором на ПЗС проецируется четкой изображение;
- f — фокус объектива

Рис. 5. Расчет минимального значения размера пятна на зеркале перископа и габаритов зеркала перископа

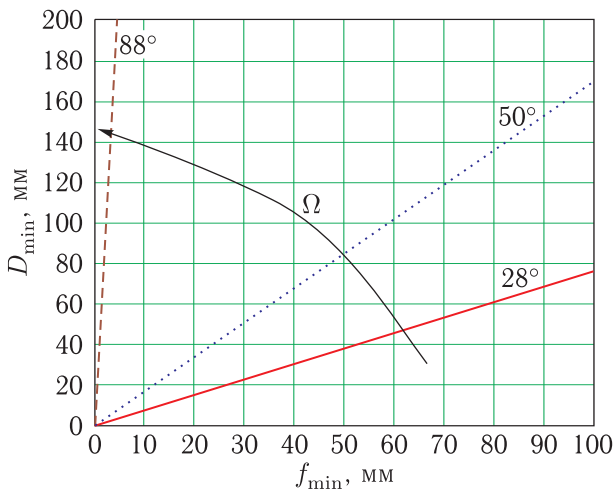


Рис. 6. Зависимость $D_{min}(f_{min})$ при различных углах обзора

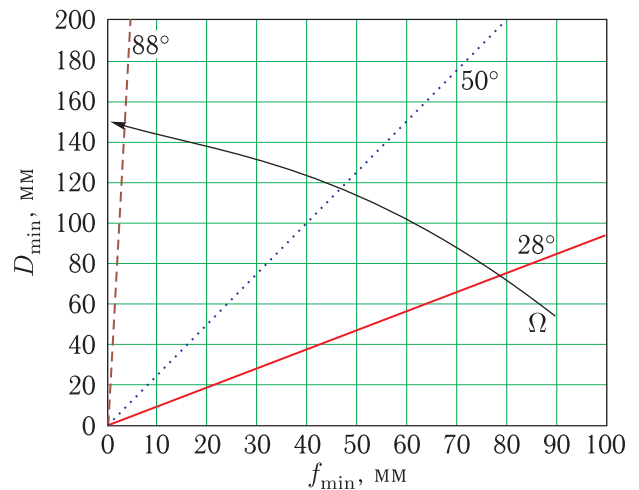


Рис. 7. Зависимость $D(f_{min})$ при различных углах обзора

Так как $f_{2min}(f, d) = \frac{f}{l}(l + d)$, то угол поворота зеркал перископов рассматриваемой видеорегистрирующей системы определяется как

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\arcsin\left(\frac{z_{min}}{2f_{2min}}\right)}{2}. \quad (16)$$

Построим график изменения угла поворота зеркал в зависимости от минимальных фокусных расстояний объективов $\gamma(f_{2min})/2$ для фиксиро-

ванных значений расстояния между оптическими осями объективов z_{min} и угла обзора Ω (рис. 11).

С удалением объекта от видеорегистрирующей системы угол поворота зеркал перископов существенно уменьшается. Так, при расстоянии видеорегистрирующей системы до объекта свыше 1 м, угол поворота зеркал перископов будет менее 1° , а при отдалении видеосистемы от объекта более чем на 10 м, угол поворота зеркал перископов будет уже менее $0,1^\circ$ и поэтому для случаев

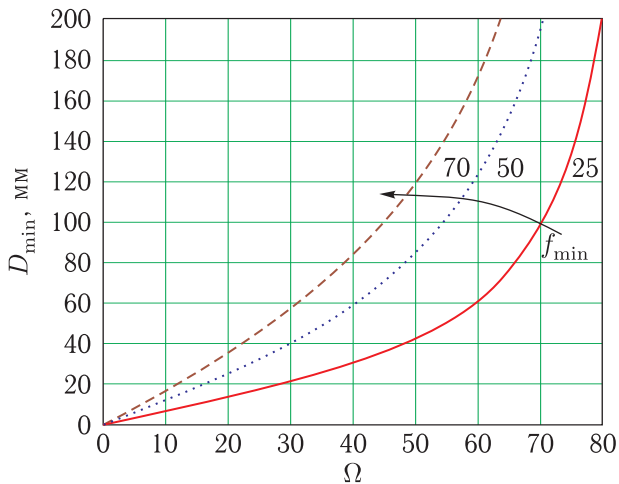


Рис. 8. Зависимость $D_{\min}(\Omega)$ при различных расстояниях от объектива до зеркала перископа

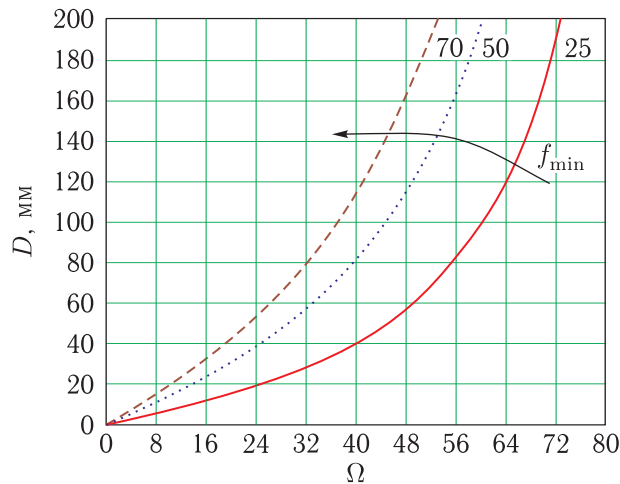


Рис. 9. Зависимость $D(\Omega)$ при различных расстояниях от объектива до зеркала перископа

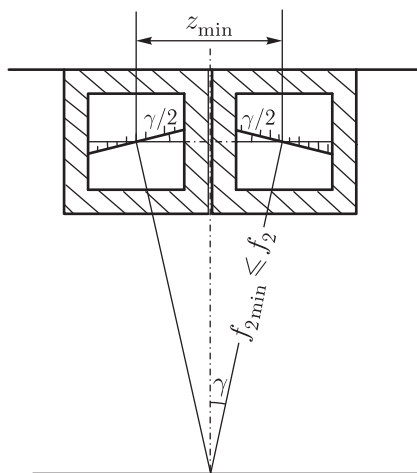


Рис. 10. Расположение видеорегирующей системы внутри прямоугольного параллелепипеда с использованием радиационной защиты

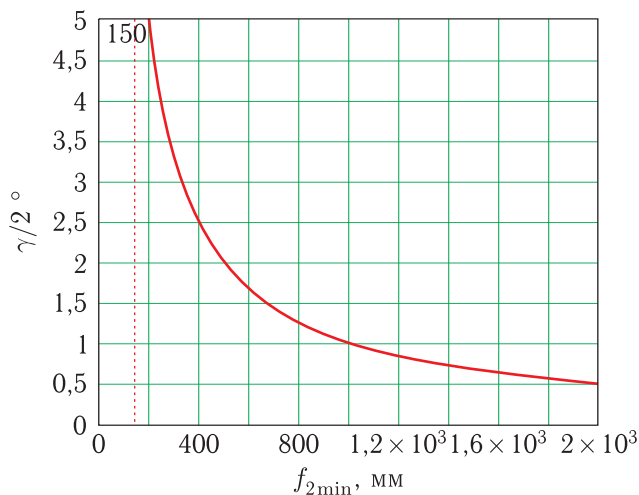


Рис. 11. Зависимость угла поворота зеркал перископов от расстояния между центрами зеркал перископов и центром поля изображения

использования ПЗС с низким разрешением или видеосистем с повышенным коэффициентом сжатия видеoinформации углом поворота зеркал можно пренебречь.

Заключение

В статье рассмотрена видеосистема, предназначенная для отслеживания термообстановки посредством видеотелетрии с использованием тер-

мозащиты и защиты объективов видеокамер и приборов с зарядовой связью от воздействия радиационных факторов. Разработана модель термокожуха, применяемая для термозащиты видеокамер, расположенных вблизи термонагруженных элементов РН. Получены выражения подлетного времени РН для подбора толщины термослоя, а также толщины термослоя для заданного подлетного времени РН на опорную орбиту. Приведен пример термозащиты видеокамер с заданным диаметром

зрачка объектива, материалом линзы объектива и подлетным временем РН на опорную орбиту.

Разработана модель перископического устройства для защиты от воздействия радиационных факторов линз объективов и фоторегистрирующих приборов как для одной ВК, так и для двух ВК, направленных на одну и ту же зону обзора. Определены выражения для расчета размеров зеркала перископа и углов поворота зеркал перископических устройств при одновременном использовании двух ВК, направленных на одно поле изображения объекта.

Список литературы

1. Горлов Ю. П., Меркин А. Л., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Стройиздат, 1980.
2. ГОСТ 31913-2011 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения».
3. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1965. 248 с.
4. Григорьев Б. А., Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен. Учеб. пособие, 2-е изд. М.: МЭИ, 2005.
5. Вишневский Г. И., Выдревич М. Г., Нестеров В. К., Ривкинд В. Л. Отечественные УФ- и ИК-ФПЗС и цифровые камеры на их основе // Электроника: наука, технология, бизнес, 8/2003. С. 18–24.
6. «Кварцевое стекло для производства оптики». Демонстративные материалы. ЗАО «Тидекс» Санкт-Петербург.
7. Ландсберг Г. С. Оптика. 5-е изд. М.: Наука, 1976.
8. Федосов И. В. Геометрическая оптика. Саратов: Сателлит, 2008. 92 с.