

Д. А. Данильченко, И. Д. Самойленко, В. В. Волошин, Е. Д. Харченко, В. И. Онофриенко

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Основной задачей при разработке радиопрозрачных головных антенных обтекателей является создание конструкции, надежно защищающей элементы летательного аппарата, чувствительные приборы системы наведения от набегающего воздушного потока и теплового нагрева на всех этапах функционирования изделия при обеспечении требований минимальной массы, допустимой температуры подобтекательного пространства, прочностных, массово-центровочных и радиотехнических характеристик. Разработка головного антенного обтекателя – решение комплексной задачи по увязке и оптимизации геометрических аспектов проектирования с физико-механическими, радиотехническими и тепловыми характеристиками материалов. В статье представлены особенности разработки радиопрозрачных обтекателей в зависимости от скорости полета летательного аппарата, приведены основные требования к выбору геометрии внешних обводов, рассмотрены материалы конструкции, обеспечивающие требуемые радиотехнические характеристики в сочетании с минимальной массой и необходимой прочностью, приемлемую температуру среды внутри обтекателя. Рассмотрен разработанный в КБ «Южное» для летательного аппарата, развивающего скорость до 5 М, головной антенный обтекатель с обечайкой оживальной формы из стеклопластика АФ-10ПО, термостойким наконечником и стыковочным шпангоутом, выполненным из алюминиевого сплава. Рассмотрены методы проведения тепловых и прочностных расчетов обечайки, представлены результаты расчетов, подтверждающие работоспособность конструкции. Для летательного аппарата, развивающего скорость более 5 М, приведены варианты конструкции с керамическими обечайками, способы их стыковки со шпангоутами. Рассмотрены основные принципы проектирования радиопрозрачных обтекателей и особенности соединения керамических обечаек со стыковочными шпангоутами, а также приведены результаты прочностных и тепловых расчетов, обеспечивающие работоспособность конструкции и оборудования в подобтекательном пространстве.

Ключевые слова: стыковочный шпангоут, подобтекательное пространство, летательный аппарат.

Основним завданням під час розроблення радіопрозорих головних антенних обтічників є створення конструкції, яка надійно захищає елементи літального апарата, чутливі прилади системи наведення від повітряного потоку, що набігає, та теплового нагрівання на всіх етапах функціонування виробу при забезпеченні вимог мінімальної маси, допустимої температури підобтічного простору, міцнісних, масово-центрувальних і радіотехнічних характеристик. Розроблення головного антенного обтічника – це вирішення комплексного завдання з ув'язування й оптимізації геометричних аспектів проектування з фізико-механічними, радіотехнічними та тепловими характеристиками матеріалів. У статті подано особливості розроблення радіопрозорих обтічників залежно від швидкості польоту літального апарата, наведено основні вимоги до вибору геометрії зовнішніх контурів, розглянуто матеріали конструкції, які забезпечують необхідні радіотехнічні характеристики в поєднанні з мінімальною масою і необхідною міцністю, допустимою температурою середовища всередині обтічника. Розглянуто розроблений у КБ «Південне» для літального апарата, який розвиває швидкість до 5 М, головний антенний обтічник з обичайкою оживальної форми зі склопластику АФ-10ПО, термостійким наконечником та стикувальним шпангоутом, який виконано з алюмінієвого сплаву. Розглянуто методи проведення теплових і міцнісних розрахунків обичайки, подано результати розрахунків, які підтверджують працездатність конструкції. Для літального апарата, який розвиває швидкість більше 5 М, наведено варіанти конструкції з керамічними обичайками, способи їх стикування зі шпангоутами. Розглянуто основні принципи проектування радіопрозорих обтічників та особливості з'єднання керамічних обичаек зі стикувальними шпангоутами, а також наведено результати теплових і міцнісних розрахунків, які забезпечують працездатність конструкції й обладнання в підобтічному просторі.

Ключові слова: стикувальний шпангоут, підобтічний простір, літальний апарат.

The main task of the radiotransparent radome design is to develop a structure that reliably protects the aircraft components, sensitive instrumentation of the guidance system from incoming air flow and heating in all phases of operation, meeting all the requirements of minimum weight, allowable temperature under the radome, strength, centre of mass and radio characteristics. Development of the radome solves the complex task of coupling and optimization of the geometric aspects of design with physical-mechanical, radio and thermal properties of materials. The article dwells on the aspects of development of the radiotransparent radomes depending on the aircraft flight speed; basic requirements for the selection of outside perimeter configuration; structural materials, providing the required radio properties in combination with minimum mass and necessary strength, acceptable temperature inside the fairing. Yuzhnoye-developed radome for the up to 5 M aircraft was considered, consisting of ogive shell made of АФ-10ПО fiberglass, heat-resistant tip and structural ring made of aluminum alloy. Methods of thermal and strength analyses of the shell are considered, results of calculations confirming the fitness for work of the structure are presented. Options of configuration with ceramic shells and methods of their coupling with rings are presented for the aircraft that reaches up to 5 M speed. Basic principles of radiotransparent radomes development and aspects of ceramic shells coupling with structural rings are considered, as well as the results of strength analyses and thermal calculations that ensure the performance of the structure and equipment in the area under the radome.

Keywords: structural ring, under dome area, aircraft.

Головной антенный обтекатель (ГАО) служит для защиты конструкции летательного аппарата (ЛА) и элементов системы наведения, размещенных в подобтекательном пространстве, от набегающего потока воздуха и теплового нагрева. Одной из наиболее важных задач, решаемых в процессе его разработки, является создание надежной конструкции с минимальной массой, с обеспечением требуемых прочностных, массово-центровочных, радиотехнических характеристик и определенной температуры среды внутри обтекателя на всех этапах эксплуатации изделия, удовлетворяющей работоспособности оборудования.

Проектирование ГАО начинается с задания геометрии внешних обводов, определяемой общей аэродинамикой ЛА. Чем выше значения задаваемой скорости полета, тем больше требуемое удлинение обтекателя L/D (рис.1).

С другой стороны, для работы радиолокационной антенны с минимальными искажениями оптимальной формой обтекателя является полусфера, которая при определенном подборе толщины и материала не вносит изменения в электромагнитное поле. Применение полусферического обтекателя эффективно на скоростях до 2 М (М – число Маха), с увеличением же скорости значительно растет аэродинамическое сопротивление, что приводит к тепловым нагрузкам, изменяющим диэлектрические свойства материала.

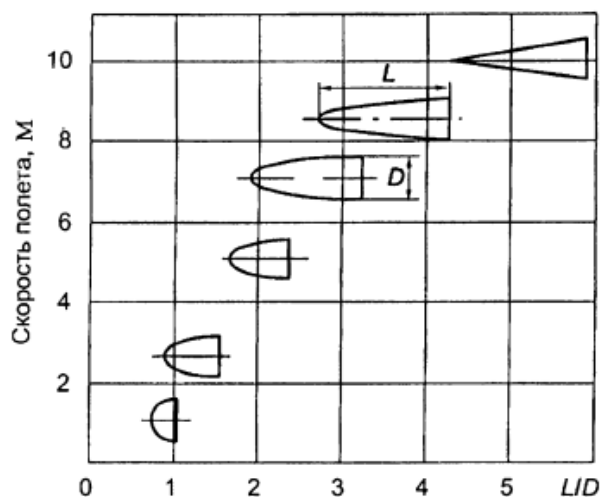


Рис. 1. Зависимость скорости полета от удлинения обтекателя:

L – длина обтекателя; D – диаметр обтекателя

Для обеспечения требуемых радиотехнических характеристик, необходимых для эффективной работы системы наведения ЛА, толщина однослойной стенки обечайки должна рассчитываться по формуле [1]

$$\delta = \frac{\lambda_0 n}{2\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}},$$

где λ_0 – длина волны; n – целое число полуволн ($n = 1, 2, 3, \dots$); ε – диэлектрическая проницаемость материала; θ – средний угол падения электромагнитной волны на стенку обтекателя у основания, принимаемый на начальном этапе равным 60° .

При выборе материала конструкции головного антенного обтекателя учитываются следующие основные характеристики:

- температурный диапазон функционирования материалов, который должен соответствовать условиям эксплуатации;
- параметры прочности, которые обеспечивают функционирование конструкции под воздействием силовых нагрузок;
- высокая эрозионная стойкость к набегающему потоку воздуха;
- низкая плотность, обеспечивающая минимальную массу конструкции;
- комбинация высокой прочности σ_v и низкой плотности γ ;
- радиотехнические свойства, не допускающие значительных искажений радиоволн заданного спектра и ослабления мощности электромагнитного потока, излучаемого антенной;
- технологические свойства материалов, заключающиеся в возможности изготовления изделия без значительных затрат;
- стоимость и доступность материалов.

Таким образом, разработка ГАО – это решение комплексной задачи по увязке и оптимизации геометрических аспектов проектирования с физико-механическими, радиотехническими и тепловыми характеристиками материалов.

Конструктивно ГАО состоят из радиопрозрачной обечайки и стыковочного шпангоута.

Стыковочный шпангоут предназначен для соединения обтекателя с корпусом ЛА с помощью элементов крепления – резьбовых шпилек или эксцентриковых втулок.

Радиопрозрачные материалы, из которых изготавливают обечайку обтекателя, – это диэлектрики, которые не изменяют амплитуду электромагнитной волны, проходящей через них, и не вызывают хаотического изменения ее фазы. Радиопрозрачность материалов означает, что они не отражают радиоволн и имеют малые диэлектрические потери в интервале рабочих температур.

Радиопрозрачные обечайки изготавливают из керамики и композиционных материалов, например из стеклопластика.

Стеклопластиковые обечайки используются в обтекателях ЛА, скорость которых не превышает 5 М (рис. 2).

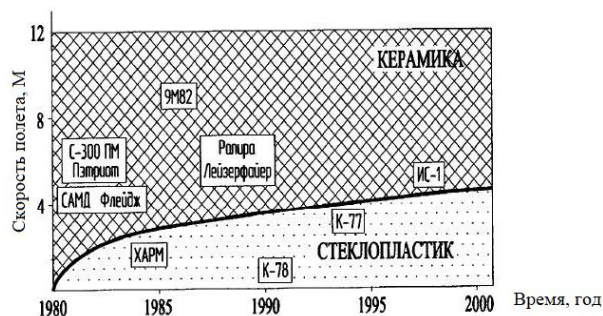


Рис. 2. Применение керамических и стеклопластиковых материалов в обтекателях ракет в зависимости от скорости

В КБ «Южное» для ЛА, развивающего скорость до 5 М, разработана конструкция аэродинамического обтекателя с обечайкой оживальной формы из стеклопластика АФ-10ПО [3], представленная на рис. 3. Спереди обечайки выполнен шпангоут, к которому крепится термостойкий наконечник, изготовленный из пресс-материала ДСВ-2. С заднего торца к стеклопластиковой обечайке крепится стыковочный шпангоут, изготовленный из алюминиевого сплава. Крепление стыковочного шпангоута осуществляется с помощью клея на эпоксидной основе и элементов крепления – винтов с гайками. Наружная поверхность обечайки и наконечника покрыта радиопрозрачным теплоизоляционным покрытием. Для соединения обтекателя с корпусом ЛА на торце шпангоута установлены шпильки.

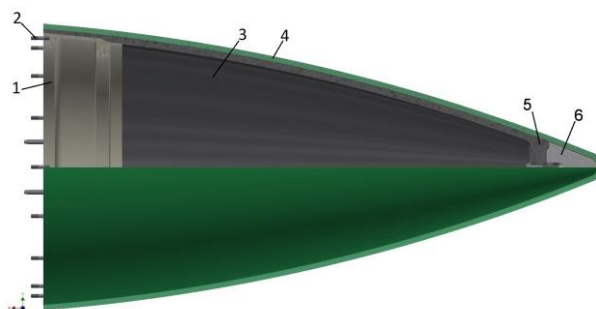


Рис. 3. Обтекатель с обечайкой из стеклопластика: 1 – торцевой шпангоут; 2 – резьбовая шпилька; 3 – стеклопластиковая обечайка; 4 – теплозащитное покрытие; 5 – шпангоут; 6 – наконечник

Применение в конструкции обечайки стеклопластика вызвано технологичностью изготовления – простым оборудованием для формовки, доступностью и относительно дешевой стоимостью материалов.

Детали из стеклопластика АФ-10ПО широко применяются в ракетной технике, их изготавливают методом выкладки пропитанной связующим стеклоткани на оправку с последующим отверждением при температуре 160°C и давлении 0,9-2 кгс/см².

Технология изготовления обечайки из стеклопластика включает в себя следующие основные операции:

- подготовку армирующего наполнителя – стеклоткани Т-10-80 и приготовление связующего АФ-10;
- пропитку наполнителя связующим;
- формообразование детали и отверждение;
- механическую доработку;
- контроль качества.

Возможность использования стеклопластиков для материала обечайки ЛА (рис. 3) определяется температурным диапазоном их работы. Для стеклопластика АФ-10ПО этот показатель составляет от -50 до +300°C, причем при 300°C данный материал сохраняет около 60% прочности при изгибе.

Для подтверждения возможности использования в конструкции радиопрозрачного обтекателя обечайки из стеклопластика проводятся тепловые и прочностные расчеты. Тепловые расчеты должны подтвердить, что температура стеклопластика при максимальном нагреве ЛА находится в диапазоне рабочих температур.

При расчете тепловых полей в обечайке достаточно решить одномерную нестационарную задачу теплопроводности в многослойной плоской стенке [1].

Если тепловой поток i -того слоя подчиняется закону Фурье

$$q = -\lambda_j(z, T_j) \frac{\partial T_j}{\partial z},$$

где λ_j – теплопроводность; T_j – температура стенки; z – координата по толщине стенки, то для каждого слоя можно получить одномерное квазилинейное уравнение теплопроводности

$$c_j(z, T_j) \rho_j(z) \frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_j(z, T_j) \frac{\partial T_j}{\partial z}).$$

Тепловые расчеты для стеклопластика, проведенные на ГП «КБ «Южное», показывают, что максимальная температура на наружной поверхности стеклопластиковой

обечайки не превышает 190°C. Этот показатель находится в диапазоне рабочих температур стеклопластика, при которых он сохраняет приемлемые прочностные характеристики. Максимальная температура на внутренней стенке обечайки 112°C и соответственно максимальная температура среды внутри обтекателя 110°C создают нормальные условия для функционирования радиолокационных систем (РЛС).

В расчетах на прочность применяют соединение балочной и безмоментной теории расчета обечаек [1, 2].

При расчете напряжений в обечайке обтекателя по балочной теории обтекатель рассматривают как консольно закрепленную балку, имеющую кольцевой профиль поперечного сечения и переменный профиль по продольной оси.

Нормальные наибольшие растягивающие напряжения расположены в плоскости симметрии нагрузки (наветренная сторона) и определяются в каждом расчетном сечении по формуле [1]

$$\sigma_{\max}^p = \frac{M}{\pi R^2 \delta} - \frac{T}{2\pi R \delta},$$

где R – средний радиус поперечного сечения обечайки обтекателя; δ – толщина в сечении, перпендикулярном оси обтекателя.

Аналогично для зоны сжатия (подветренная сторона) максимальные сжимающие напряжения рассчитываются как

$$\sigma_{\max}^c = -\frac{M}{\pi R^2 \delta} - \frac{T}{2\pi R \delta}.$$

Балочная теория определения напряжений в обечайке обтекателя дает удовлетворительные результаты для зон с небольшой кривизной меридиана, в частности для участка соединения обечайки со шпангоутом, являющегося наиболее напряженным. Но она не учитывает кривизны меридиана и окружных напряжений в обтекателе. Для полноты расчета необходимо объединить балочную теорию с теорией безмоментных оболочек. При этом нужно ввести закон распределения нормальных меридиональных и касательных напряжений в окружных сечениях обечайки

$$\sigma_M = a + b \cos \varphi;$$

$$\tau = c \sin \varphi.$$

Уточненные расчетные формулы для расчета нормальных меридиональных и касательных напряжений в окружных сечениях обечайки

$$\sigma_M = \frac{T}{2\pi r \delta \cos\theta} + \frac{M}{\pi r^2 h \cos\theta} \cos\varphi ;$$

$$\tau = \left[\frac{Q}{\pi r \delta} - \frac{M \cdot \text{ctg}\theta}{\pi r^2 \delta} \right] \sin\varphi ,$$

где θ – угол конусности обечайки; h – расстояние от наружного до внутреннего слоя теплозащитного покрытия в заданном сечении, при этом $h=0$ в начале движения.

Анализ прочности обтекателя с обечайкой из стеклопластика проводился для следующих расчетных случаев, приведенных в табл. 1

Таблица 1

Расчетные случаи и коэффициенты безопасности

Расчетный случай	Коэффициент безопасности, f
Железнодорожная транспортировка в ТПК	2,0
Водная транспортировка в ТПК	2,0
Авиационная транспортировка в ТПК	1,5
Крановая перегрузка	2,0
Старт	1,5
Полет	1,3

Основным расчетным случаем для обтекателя является нагружение в полете.

Исходными данными для прочностного расчета обтекателя со стеклопластиковой обечайкой являются: конструкция корпуса обтекателя, физико-механические характеристики (ФМХ) материалов, эксплуатационные нагрузки, температурные режимы.

Физико-механические характеристики стеклопластика в диапазоне рабочих температур нагрева приведены в табл. 2.

Таблица 2

ФМХ стеклопластика АФ-10ПО

Температура нагрева, °С	σ_b , кгс/см ²	$E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	δ , %
20	$\sigma_{\text{раст}}=2200$ $\sigma_{\text{сж}}=2400$	1,4	2
200	$\sigma_{\text{раст}}=1500$ $\sigma_{\text{сж}}=1800$	0,95	-
300	$\sigma_{\text{раст}}=1200$ $\sigma_{\text{сж}}=1600$	0,9	-

В табл. 2 приняты следующие обозначения:

σ_b – предел прочности; $\sigma_{\text{раст}}$, $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на растяжение и сжатие соответственно; E – модуль упругости; δ – относительное удлинение.

Максимальные эксплуатационные нагрузки на стеклопластиковую обечайку для расчетного случая в полете приведены в табл. 3.

Таблица 3

Максимальные эксплуатационные нагрузки на стеклопластиковую обечайку

T , кгс	M , кгс·м	P , кг/см ²
367...771	305...548	1,21...1,98

В табл. 3 приняты следующие обозначения: T , M , P – осевая сила, изгибающий момент и внешнее давление соответственно.

Максимальные температуры нагрева стеклопластиковой обечайки для случая полета и соответствующие им характеристики материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Прочностные характеристики стеклопластика АФ-10ПО

при максимальных температурах нагрева

T , °С	σ_b , кгс/см ²	σ_{02} , кгс/см ²	$E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²
95...170	1700...1950 ($\sigma_{\text{раст}}$)	1400...1650 ($\sigma_{\text{сж}}$)	1,1...1,2

В табл. 4 приняты следующие обозначения: T – температура нагрева; σ_b , σ_{02} – предел прочности и предел текучести соответственно; E – модуль упругости.

Расчеты прочности проводились на расчетные нагрузки (коэффициент безопасности $f=1,3$) с использованием инженерных методов анализа.

Результаты прочностных расчетов стеклопластиковой обечайки для основного расчетного случая в полете приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов прочности стеклопластиковой обечайки

δ , см	R_{cp} , см	η
0,6	15,3	1,8...3,0

В табл. 5 приняты следующие обозначения: δ , R_{cp} – расчетная толщина и наружный радиус обечайки по среднему сечению от-

секов соответственно; η – коэффициент запаса прочности.

Результаты расчетов показали достаточную прочность обечайки из стеклопластика ($\eta = 1,8...3$ в зависимости от дальности). Таким образом, тепловые и прочностные расчеты подтверждают возможность применения обечайки из стеклопластика в конструкции обтекателя ЛА при полете со скоростью до 5 М. Но при скоростях, превышающих 5 М, обтекатели из стеклопластика разрушаются, поэтому возникает необходимость использовать обечайку из керамики. На рис. 4 представлены графики зависимости скорости полета ЛА от предельных возможностей материалов обечаек обтекателей.

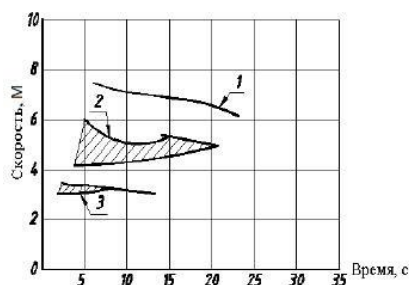


Рис. 4. Зависимости скорости полета ЛА от предельных возможностей материалов обечаек обтекателей:
1 – кварцевая керамика; 2 – пирокерам 9606;
3 – алюмооксидная керамика

Исходя из рис. 5, можно сделать вывод, что обтекатели из кварцевой керамики являются более эффективными на скоростях выше 5 М.

Кварцевая керамика – это керамические материалы на основе кварцевого стекла, отличающиеся высокой химической и термической стойкостью, стабильными электрофизическими свойствами.

В диапазоне скоростей ЛА 4–5 М возможно применение обтекателей из пирокерама 9606 или алюмооксидной керамики.

Пирокерам 9606 относится к ситаллам – термостойким стеклокристаллическим материалам. Их получают при введении в расплавленное стекло специальных добавок – тонкоизмельченных порошков. Ситалл может выдержать перепад температур со скоростью нагрева 200-300°С/с. Однако применяемые в настоящее время ситаллы обладают недостаточной термостойкостью и диэлектрическими характеристиками при

температуре на поверхности выше 1100°С, температура размягчения ситаллов не превышает 1500°С.

Непосредственное соединение керамической обечайки с корпусом ЛА затруднительно, поэтому в конструкцию вводят переходной элемент – шпангоут, в котором установлены крепежные элементы стыка.

При соединении керамической обечайки с металлическим шпангоутом возникают следующие проблемы:

- невозможность применения традиционного механического крепежа;
- разность в коэффициентах теплового линейного расширения металлического шпангоута и керамики, приводящая к возникновению значительных растягивающих напряжений в обечайке, вызывающих ее разрушение;
- необходимость тщательной герметизации стыка для обеспечения нормальной работы РЛС;
- снижение при высоких температурах прочности клеев;
- недопустимость жесткого контакта металла с керамикой.

Для решения перечисленных проблем в конструкции обтекателя применяется шпангоут из прецизионных сталей, имеющих низкий коэффициент теплового расширения; шпангоут закрепляется с помощью клеев-герметиков.

Прецизионные сплавы – это металлические сплавы с заданными физическими свойствами, которые незначительно изменяются при изменении внешних воздействий, в данном случае температуры. На рис. 5 представлены графики зависимости температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) различных материалов от температуры. Из графиков видно, что ТКЛР прецизионных сплавов 32НКД и 32НКА значительно ниже, чем у нержавеющей стали Х18Н9Т.

Соединение керамических обечаек и элементов стыковочных шпангоутов, изготовленных из приведенных выше прецизионных сплавов, осуществляется с помощью эластичных клеев-герметиков, которые благодаря своей податливости компенсируют температурные расширения склеиваемых деталей.

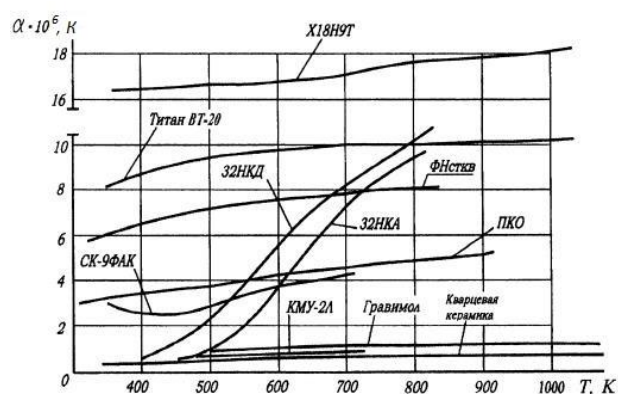


Рис. 5. Изменение ТКЛР конструкционных материалов в зависимости от температуры

На рис. 6 представлены варианты соединения керамической обечайки со стыковочным шпангоутом.

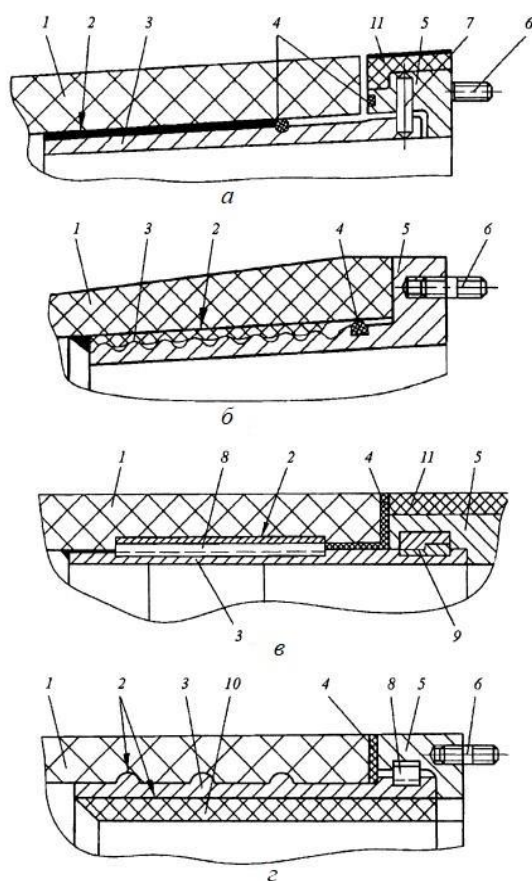


Рис. 6. Возможные конструкции соединения обтекателя со шпангоутом:

- 1 – обечайка из керамического материала;
- 2 – адгезионный слой; 3 – переходный элемент; 4 – уплотнение; 5 – шпангоут; 6 – шпилька; 7 – штифт;
- 8 – гофрированный металлический элемент; 9 – соединительный элемент (типа "байонет"); 10 – распорное кольцо; 11 – теплозащита;
- а – соединение с помощью металлического переходного элемента; б – клеерезьбовое соединение; в – соединение с металлическим переходником с помощью гофрированного соединительного элемента;
- г – комбинированная конструкция

Конструкция керамических обтекателей с применением клеев-герметиков типа «Виксинт У-2-28» в качестве силового элемента в клеевых узлах соединения обечаек из кварцевой керамики с переходным соединительным шпангоутом из сплава 32НҚД со средней рабочей температурой в клеевом шве до 180 °С широко используется на многих ракетах, например на С-300, «Пэтриот».

Вывод

Рассмотрены основные аспекты проектирования радиопрозрачных антенных обтекателей ЛА с учетом обеспечения выполнения требуемых прочностных, массово-центровочных, радиотехнических характеристик, а также температуры среды внутри обтекателя на всех этапах эксплуатации изделия.

Приведены основные материалы, используемые в конструкциях обтекателя, отражены ограничения по их применению, зависящие от скорости ЛА.

Рассмотрены особенности соединения керамических обечаек со шпангоутами с применением переходных элементов из прецизионного сплава и эластичных клеев-герметиков.

На примере разработанного в КБ «Южное» головного аэродинамического обтекателя с обечайкой из стеклопластика и шпангоутами из алюминиевого сплава [3] показаны особенности и порядок разработки конструкции, приведены результаты прочностных и тепловых расчетов.

Список использованной литературы

1. Русин М. Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.
2. Моссаковский В. И. и др. Прочность ракетных конструкций. – М.: Высш. шк., 1990. – 190 с.
3. Пат. 114323 Украина, МПК Н01Q1/42. Головной обтекатель баллистической ракеты / Шевцов Е. И., Харченко Е. Д., Волошин В. В., Самойленко И. Д.; заявитель и патентообладатель КБ «Южное». – Опубл. 10.03.2017.

Статья поступила 09.10.2018