

УДК 629.7

Проектирование радиопрозрачных конструкций из композиционных материалов

О. Г. ЖИДКОВА; А. В. БОРОДАВИН; Д. В. МИТЮШКИНА; Н. В. БЕРСЕКОВА
Специальное конструкторско-технологическое бюро "Пластик", г. Сызрань, Самарская обл., Россия

Рассмотрены вопросы проектирования радиопрозрачных головных антенных обтекателей летательных аппаратов (ЛА). Приведены обоснования выбора стеклопластика как композиционного материала (КМ), наиболее подходящего для изготовления изделия. Описаны элементы аналитических прочностных расчетов радиопрозрачных обтекателей (РПО). На примере разработанной конструкции обтекателя из КМ описаны особенности математического моделирования. Показана важность роли конечно-элементного анализа при оценке работоспособности конструкции на разных этапах эксплуатации. Проведено сравнение результатов напряженно-деформированного состояния при разных видах нагрузок.

Ключевые слова: радиопрозрачный обтекатель, стеклопластик, аэродинамические нагрузки, прочностной расчет, метод конечных элементов, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Постоянный рост скоростей и маневренности ЛА является тенденцией развития авиационной и ракетной техники, что приводит к повышению требований, предъявляемых к радиопрозрачным элементам конструкции — антенным головным обтекателям ЛА.

Независимо от функционального назначения радиопрозрачный обтекатель является одним из важных элементов конструкции ЛА, в большой степени определяющим аэродинамические характеристики. Большой комплекс требований к ним является сложным и противоречивым.

Инфракрасные и радиолокационные системы управления широко применяются в авиационной и ракетной технике. Обтекатели ЛА должны удовлетворять требованиям по радиотехническим характеристикам (РТХ), а именно не искажать радиоволны заданного спектра частот и не уменьшать мощность электромагнитного потока. Удовлетворение требований по РТХ обеспечивается определенной толщиной стенки вдоль образующей оболочки обтекателя, что накладывает ограничения на

прочностные и теплозащитные характеристики РПО. К данному виду конструкции предъявляются такие требования, как минимальная масса, достаточные прочность и надежность.

Нелегкой задачей при проектировании обтекателей ЛА является подбор материала конструкции, обеспечивающего заданную стабильность диэлектрических свойств в целях минимального искажения электромагнитного поля в заданном спектре частот при всех условиях эксплуатации [1]. Условием обеспечения стабильной рабочей температуры для радиотехнической аппаратуры в носовом отсеке ЛА является создание РПО из материала, обладающего хорошими теплоизолирующими свойствами, в том числе низкой теплопроводностью и достаточной теплоемкостью. Если применять КМ с более высоким коэффициентом теплопроводности, обеспечивая тем самым понижение температурных напряжений в стенке обтекателя, то это приведет к росту температуры внутри конструкции и повреждению радиотехнической аппаратуры. Компромиссным решением является установка теплозащитного слоя, что ухудшает прохождение электромагнитных волн и требует дополнительного уточнения диэлектрических характеристик конструкции.

Материалов, удовлетворяющих изложенные требования, существует множество, но наиболее перспективными являются керамические материалы, стеклопластики, органопластики [1].

Стеклопластики на основе полимерной матрицы и армирующего стекловолоконистого материала сочетают в себе высокую прочность, небольшую плотность, хорошие диэлектрические свойства и приемлемую стоимость, что делает их наиболее распространенным композитом для радиопрозрачных изделий. Возможность различных соотноше-

Жидкова Ольга Геннадьевна, заместитель генерального конструктора по научной работе.

E-mail: oprtkr-prg@sktb-plastik.ru

Бородавин Андрей Викторович, заместитель начальника отдела проектных разработок и опытно-конструкторских работ.

E-mail: oprtkr-zn3@sktb-plastik.ru

Митюшкина Диана Викторовна, ведущий инженер по тепловым расчетам.

E-mail: oprtkr-prg@sktb-plastik.ru

Берсекова Наталья Васильевна, инженер 2-й категории по расчетам на прочность.

E-mail: oprtkr-prg@sktb-plastik.ru

Статья поступила в редакцию 31 октября 2019 г.

© Жидкова О. Г., Бородавин А. В., Митюшкина Д. В., Берсекова Н. В., 2020

ний армирующих и связующих компонентов позволяет создавать КМ с широким диапазоном регулируемых свойств [2].

Краткий обзор конструкций радиопрозрачных обтекателей

По функциональному назначению выделяют различные виды радиопрозрачных обтекателей:

- обтекатели бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК) для авиационной и наземной техники;
- обтекатели для радиолокационных станций (РЛС) головок самонаведения;
- судовые РПО и т. д.

Обтекатели изготавливают из стеклопластиков радиотехнического назначения методами автоклавного формования, прессования и пропитки под давлением. На рис. 1 представлен полуэллипсоидный обтекатель БРЛК "Арбалет" вертолета Ка-52, являющийся составной частью фюзеляжа и вписываемый в аэродинамический контур. Обтекатель разработан и изготовлен в ООО "СКТБ "Пластик".



Рис. 1. Радиопрозрачный обтекатель БРЛК [3]

На рис. 2 показаны пилон, РПО и антенна РЛС самолета дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО).

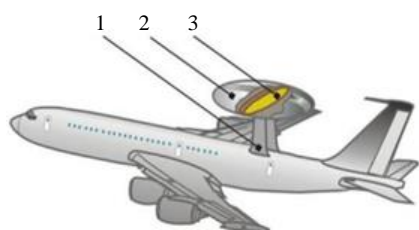


Рис. 2. Самолет ДРЛО [4]:
1 — пилон;
2 — РПО;
3 — антенна РЛС

Радиопрозрачные обтекатели ЛА имеют сложную структуру, т. к. они должны соответствовать требованиям по аэродинамическим параметрам и несут значительную нагрузку, являясь частью конструкции этих объектов. Форма РПО в большей степени зависит от места установки радиолокатора и его антенны. На рис. 3, а и б показаны РПО для зенитно-ракетной системы и для РЛС для подводных лодок и надводных кораблей.

На рис. 3, в представлен разработанный и изготовленный методом прессования в ООО СКТБ "Пластик" широкополосный радиопрозрачный об-

текатель из микросферостеклотекстолита для антенного поста самолета МИГ-29.



а



б



в

Рис. 3. Радиопрозрачные обтекатели: для зенитно-ракетной системы С-200 [5] (а), трехдиапазонный для РЛС подводных лодок и надводных кораблей [6] (б), антенного поста самолета МИГ-29 [3] (в)

Носовые радиопрозрачные обтекатели ракет имеют, как правило, заостренную форму (рис. 4). В условиях полета в плотных слоях атмосферы набегающий поток воздуха воздействует на РПО и создает значительные аэродинамические нагрузки (статические и динамические), вибрацию и аэродинамический нагрев. Аэродинамические нагрузки определяются формой и местом расположения обтекателя, скоростью и высотой полета [7—10]. Большие скорости полета вызывают существенный аэродинамический нагрев поверхности обтекателей (часто 1000 °С и выше) [7] и температурные перепады, что сужает выбор материалов для них.



Рис. 4. Ракета с носовым радиопрозрачным обтекателем заостренной формы [10]

К ракетным РПО предъявляются более высокие требования по эрозионной стойкости, прочности в условиях высоких температур, радиопрозрачности. Для их изготовления используют армирующие термостойкие материалы (ткани на основе кварцевых и кремнеземных волокон) и термостойкие связующие (кремнийорганические, эпоксикремнийорганические, модифицированные фенольные, полиимидные и т. п.) [2].

Элементы прочностных расчетов радиопрозрачных обтекателей

В общем случае выход из строя РПО может быть обусловлен возникновением в материале изделия напряжений, превышающих предел прочности, или потерей формоустойчивости [2].

Носовые РО ракет чаще имеют заостренную форму, приближающуюся к конической. Если на оболочку, выполненную в виде полного конуса, жестко защемленного по краям, действует внешнее давление P , то критическая нагрузка рассчитывается по уравнению [11]:

$$\bar{P} = \frac{P}{E} = 2,8 \left(\frac{h}{L} \right)^{5/2} \frac{\text{ctg}^{3/2} \omega}{(1-\mu^2)^{3/4}}, \quad (1)$$

где L — длина образующей конуса;
 ω — половина угла при вершине конуса;
 E, μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки;
 h — толщина оболочки.

Как показывает практика, формулу (1) следует использовать, если $10^\circ < \omega < 70^\circ$. Если же угол $\omega < 10^\circ$, то при вычислении критических нагрузок коническую оболочку можно заменить на цилиндрическую с радиусом, равным среднему радиусу конической оболочки.

Далее приведем формулы для расчета критических нагрузок, приводящих к потере формоустойчивости цилиндрических оболочек [12, 13].

При воздействии на цилиндрическую оболочку внешнего давления P (рис. 5) его критическое значение составляет:

$$\bar{P} = \frac{P}{E} = \frac{n^2}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \left[1 + \frac{1}{n^2} \left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 \right]^2 + \frac{h}{R} \left(\frac{\pi R}{L} \right)^4 \frac{1}{n^6 \left[1 + \frac{1}{n^2} \left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где R — радиус цилиндрической оболочки.

Критическое значение \bar{P} находится путем минимизации числа окружных волн n ($n > 4$).

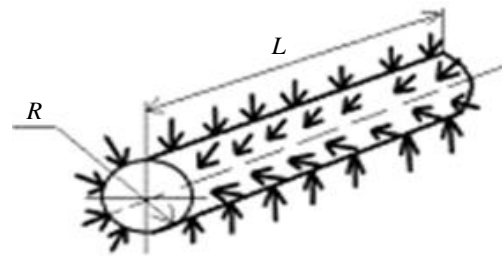


Рис. 5. Нагрузка цилиндрической оболочки внешним давлением

При меньших значениях n ($n = 2$ и 3) следует применять формулу [14]

$$\bar{P} = \frac{1}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{n^2-1} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \times \left\{ 1 + \left[\left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 + n^2 \right]^2 - 2 \left[\mu \left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 + n^2 \right] \right\} + \frac{h}{R} \left(\frac{\pi R}{L} \right)^4 \frac{1}{(n^2-1) \left[\left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 + n^2 \right]^2}. \quad (3)$$

В целях улучшения согласования расчетных и экспериментальных данных авторы работы [11] рекомендуют вводить в полученные уравнения поправочные коэффициенты K , значения которых приведены в таблице.

Поправочные коэффициенты K для определения критических нагрузок

Форма оболочки и характер нагрузки	Значения поправочных коэффициентов K при различных отношениях R/h			
	< 250	500	750	1000
Сфера, внешнее давление	0,25	0,20	0,17	0,13
Цилиндр, осевое сжатие	0,30	0,23	0,20	0,17
Цилиндр, внешнее давление	0,70	0,60	—	0,50

В отличие от изотропных материалов стеклопластики характеризуются ярко выраженной анизотропией физико-механических свойств, которые существенно зависят от ориентации армирующих стеклянных волокон. В связи с этим использование классических уравнений, справедливых для изотропных материалов, при расчете конструкций из стеклопластиков может приводить к ошибкам.

В первом приближении стеклопластик на основе стеклоткани может быть представлен как ортотропный материал, характеризуемый различными значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона в основных направлениях армирования [2].

В этом случае при воздействии на цилиндрическую оболочку внешнего давления P при $m = 1$ (m — число полуволн в продольном направлении) и $n > 1$ (n — число волн в окружном направлении) расчетное уравнение для определения критической нагрузки имеет вид

$$\bar{P} = \frac{A+B}{C}, \quad (4)$$

где

$$A = \frac{1}{12(1-\mu_1\mu_2)} \frac{E_r}{E_{oc}} \left(\frac{h}{R}\right)^2 \left(\frac{L}{\pi R}\right)^2 \frac{n^4}{m^2} \times \left\{ 1 + 2 \left[\mu_{oc} + 2 \frac{G_c}{E_r} (1-\mu_1\mu_2) \right] \left(\frac{\pi R}{L}\right)^2 \left(\frac{m}{n}\right)^2 + \frac{E_{oc}}{E_r} \left(\frac{\pi R}{L}\right)^4 \left(\frac{m}{n}\right)^4 \right\}, \quad (5)$$

где E_{oc}, μ_{oc} — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала в осевом направлении;

E_r, μ_r — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала в окружном направлении;

G_c — модуль сдвига стеклопластика в плоскости армирования;

$$B = \frac{\frac{m^2}{n^4} \left(\frac{\pi R}{L}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{oc}}{G_c} - 2\mu_{oc}\right) \left(\frac{\pi R}{L}\right)^2 \left(\frac{m}{n}\right)^2 + \frac{E_{oc}}{E_r} \left(\frac{\pi R}{L}\right)^4 \left(\frac{m}{n}\right)^4}; \quad (6)$$

$$C = \frac{R}{L} \left(\frac{L}{\pi R}\right)^2 \left(\frac{n}{m}\right)^2. \quad (7)$$

Приведенные уравнения могут быть использованы и для решения обратной задачи — определения требуемой толщины оболочки при известной нагрузке [2].

Проектирование и роль конечно-элементного моделирования в создании радиопрозрачных обтекателей ЛА

Конструктивно-технологические решения, разрабатываемые при создании РПО из КМ, являются сложной трудоемкой задачей, которая затрагивает не только методы изготовления, но и свойства исходных материалов, расчет и проектирование конструкций и условия эксплуатации [15]. На начальных этапах проектирования аналитическая зависимость позволяет выбрать принципиальную конструкцию РПО и назначить минимальные толщины. Детальное проектирование радиопрозрачных конструкций с учетом сложного характера внешних воздействий и экстремальных условий эксплуатации невозможно без систем инженерного проектирования и анализа, позволяющих моделировать процессы как деформации, так и разрушения конструкций [16].

Проектирование опытной конструкции радиопрозрачного обтекателя ЛА (рис. 6) из стеклопластика сопровождалось исследованием НДС и осуществлялось с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа NX Nastran [17].

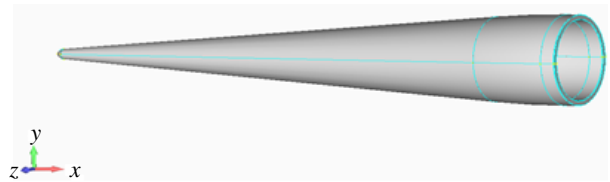


Рис.6. Опытная радиопрозрачная конструкция радиопрозрачного обтекателя летательного аппарата

При оценке НДС конструкции с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для достижения необходимой точности результатов важно правильно выбрать тип элемента, с помощью которого будет построена конечно-элементная модель (КЭМ). В отличие от аналитического метода решения задач МКЭ имеет некоторые погрешности, связанные не только с вычислительной процедурой, но и с построением математической модели. К ним относятся:

- погрешности дискретизации;
- погрешности, возникающие из-за различия реальной границы моделируемой конструкции и ее аппроксимации;
- погрешности выбора базисной функции, обусловленные разницей между точным решением и его представлением некоторой функцией в пределах элемента [18, 19].

В качестве критерия сходимости численного решения к точному решению используется экспериментальная проверка расчетов, так как аналитические критерии сходимости той или иной задачи

МКЭ сложны и представляют собой область отдельных исследований.

Метод конечных элементов получил очень широкое распространение и стал одним из основных методов расчета конструкций. Это объясняется универсальностью подхода, лежащего в основе МКЭ и заключающегося в представлении геометрии любого деформируемого тела в виде совокупности элементов простейшей формы: треугольной, четырехугольной и т. д. Элементы могут быть одномерными, плоскими и пространственными, с прямолинейными и криволинейными сторонами, что позволяет практически точно построить КЭМ конструкции [20].

В соответствии с результатами оценки НДС определяют предельное состояние конструкции. Благодаря математическому моделированию выясняют наиболее нагруженные места конструкции РПО. Это позволяет с помощью установленных в определенных местах тензодатчиков измерить деформации. На всех этапах создания конструкции, а также на стадии экспериментальной отработки в процессе испытаний важную роль в решении задач прочности, жесткости, температурных деформаций играет КЭМ. В случае несоответствия между расчетными и экспериментальными значениями (расхождение значений более 10 %) проводятся мероприятия по корректировке модели, направленные на сокращение величины рассогласования [16].

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния радиопрозрачного обтекателя ЛА

Конечно-элементное моделирование поведения конструкции РПО из стеклопластика было проведено с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа NX Nastran (Serial Number: 1310-5H-NT-2820-004F) [17]. В качестве материала был рассмотрен неорганический высокотемпературный стеклопластик на основе кварцевой ткани и неорганического хромальмофосфатного связующего, так как в условиях повышенных температур этот материал имеет высокий уровень прочности, низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), обладает стабильными теплофизическими свойствами и сохраняет диэлектрические свойства. При построении КЭМ применяли твердотельные пространственные элементы типа Solid, предназначенные для построения конечно-элементной сетки в трехмерных телах (рис. 7). Исходя из особенностей геометрии конструкции РПО был выбран четырехгранный Solid (Tetra). Для достижения необходимой точности расчета были сформированы дополнительные (промежуточные) узлы на сторонах тетраэдральных элементов, т. е. КЭМ была построена

на десятиузловыми элементами с использованием квадратичной аппроксимации для их функций и формы.

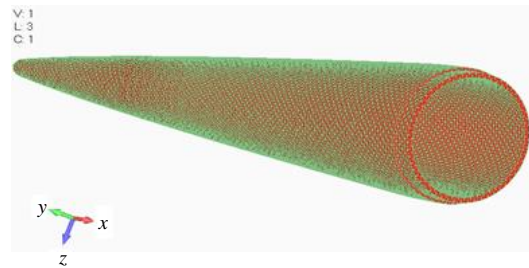


Рис. 7. Конечно-элементная модель радиопрозрачного обтекателя летательного аппарата

В процессе полета обтекатель будет испытывать аэродинамические нагрузки, которые задаются по наружной поверхности его конструкции в виде некоторого давления, изменяющегося в зависимости от времени полета.

При оценке НДС обтекателя под воздействием силовой нагрузки (в качестве аэродинамического нагружения условно принято изменяющееся по поверхности обтекателя давление на данный момент времени) модель закрепляют по торцу по трем степеням свободы, так как узловыми смещениями у конечных элементов типа Solid являются перемещения вдоль осей координат [20]. Картина НДС радиопрозрачного обтекателя из стеклопластика в результате действия на него аэродинамической нагрузки для принятого момента времени показана на рис. 8, а, б.

Наряду с аэродинамическими нагрузками набегающий поток воздуха, воздействующий на РПО в условиях полета в плотных слоях атмосферы, создает значительный аэродинамический нагрев. Проведена оценка НДС конструкции обтекателя из стеклопластика при воздействии на нее некоторой температурной нагрузки, также заданной в зависимости от времени полета по внутренней и внешней поверхностям обтекателя. При этом корпус конструкции обтекателя закреплен по фланцу в цилиндрической системе координат, ось Z которой совпадает с продольной осью конструкции, и узлы закрепления имеют возможность свободно перемещаться в радиальном направлении. Картина НДС радиопрозрачного обтекателя в результате действия на него аэродинамического нагрева показана на рис. 8, в, г.

Анализ полученных результатов показывает, что аэродинамическая нагрузка существенно влияет на НДС радиопрозрачного обтекателя из стеклопластика. Аэродинамический нагрев также оказывает влияние на работу изделия, поэтому при проектировании радиопрозрачных конструкций необходимо учитывать совместное действие нагрузок.

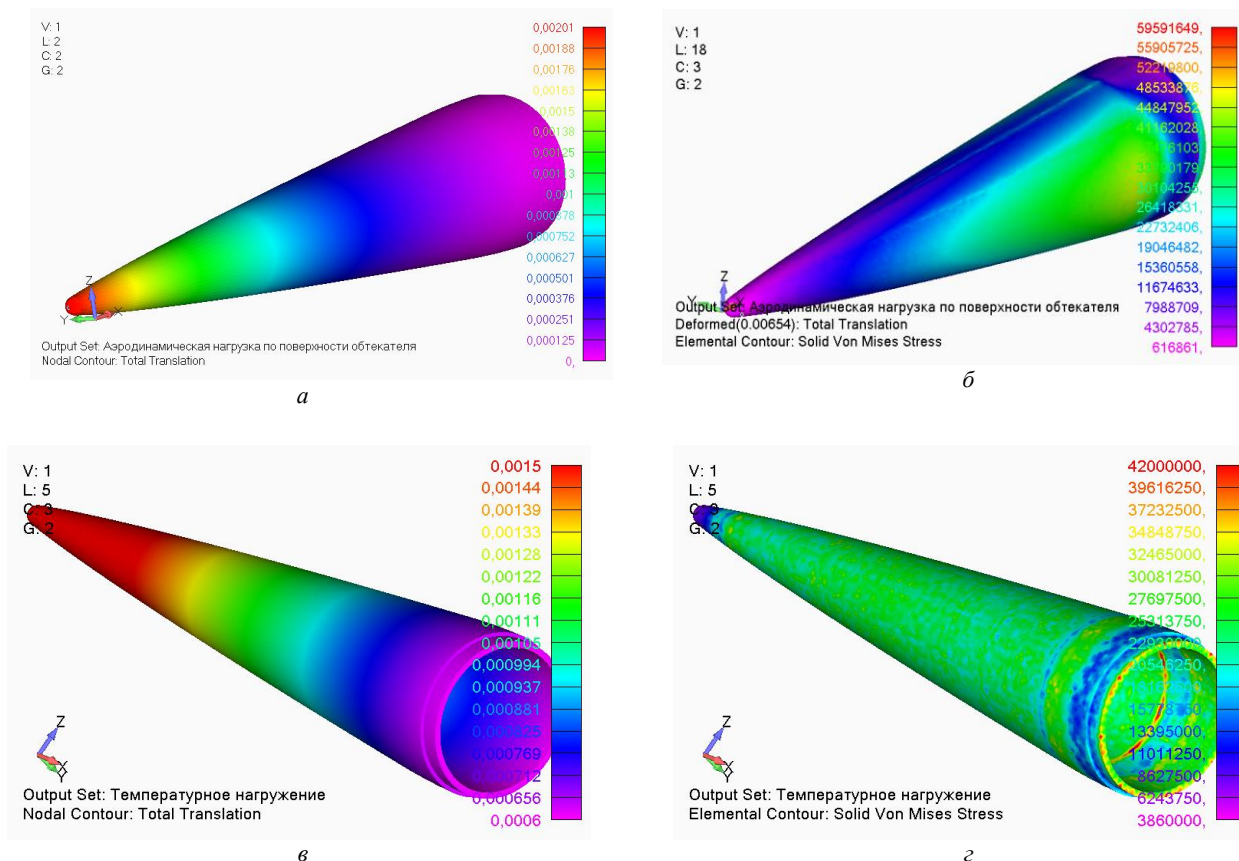


Рис. 8. Стеклопластиковый РПО в напряженно-деформированном состоянии в результате действия на него аэродинамической нагрузки (а, б) и аэродинамического нагрева (в, з):
 а, в — суммарные перемещения РПО, м;
 б, з — эквивалентные напряжения в РПО, Па

Заключение

Аналитические зависимости позволяют выбрать предварительную конструкцию РПО и на начальном этапе проектирования назначить минимальную толщину стенки. Однако дальнейшее решение комплексной задачи обеспечения формостабильности и прочности с использованием моделирования НДС радиопрозрачных композиционных конструкций целесообразно проводить методом конечных элементов.

Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволяют достаточно быстро создать подробные модели конструкций, получить результаты расчета с незначительными погрешностями, что способствует сокращению времени выполнения трудоемких задач и позволяет в дальнейшем на основе эксперимента подтвердить достоверность созданных конечно-элементных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химич А. В. Конструктивное исполнение головных обтекателей: мат. всеросс. науч.-методич. конф. "Университетский комплекс как региональный центр образования, науки

и культуры". — Оренбург: Оренбургский гос. ун-тет, 2016. С. 263—268.
 2. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. Г. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. — М.: Мир, 2002. — 368 с.
 3. <http://www.sktb-plastik.ru/156/> (дата обращения: 15.10.2019).
 4. http://oat.mai.ru/book/glava07/7_7/7_7.html#07_95_b (дата обращения: 15.10.2019).
 5. <https://rusvesna.su/news/1451454174> (дата обращения: 15.10.2019).
 6. <http://www.npo-stekloplastic.ru/production/composites/r-t-products/RadioProducts/> (дата обращения: 15.10.2019).
 7. Пригода В. А., Хокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1970. — 285 с.
 8. Каплун В. А. Обтекатели антенн СВЧ. — М.: Машиностроение, 1974. — 239 с.
 9. Трофимов К. Н. Справочник по радиолокации / Пер. с англ. / под ред. Трофимова К. Н. — М.: Сов. радио, 1977. Т. 2. С. 303—306.
 10. http://rbaze.new-factoria.ru/missile/wobb/standard_arm/standard_arm.shtml (дата обращения: 15.10.2019).
 11. Болотин В. В., Вольмир А. С., Диметберг М. Ф., Кильдибеков И. Г., Москаленко В. Н., Новичков Ю. Н., Пановко Я. Г., Швейко Ю. Ю. Прочность, устойчивость, колебания: справочник. — М.: Машиностроение, 1968. Т. 3. — 568 с.
 12. Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Копнов В. А., Поспелов А. Д., Синюков А. М. Сопротивление стеклопластиков. — М.: Машиностроение, 1968. — 304 с.

13. **Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Копнов В. А., Пospelов А. Д.** Пластинки и оболочки из стеклопластиков. — М.: Высшая школа, 1970. — 408 с.
14. **Вольмир А. С.** Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
15. **Молодцов Г. А., Биткин В. Е., Симонов В. Ф., Урмансов Ф. Ф.** Формостабильные и интегральные конструкции из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 2000. — 352 с.
16. **Биткин В. Е., Жидкова О. Г., Денисов А. В., Бородавин А. В., Митюшкина Д. В., Родионов А. В., Нонин А. С.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния размеростабильных композитных элементов конструкций оптических телескопов с помощью метода конечных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Физ.-мат. науки". 2016. Т. 20. № 4. С. 707—729.
17. <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/nxn.shtml> (дата обращения: 23.10.2019).
18. **Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z.** The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. — Amsterdam: Elsevier, 2013. — 714 p.
19. **Якупов Н. М., Киямов Х. Г., Якупов С. Н., Киямов И. Х.** Моделирование элементов конструкции сложной геометрии трехмерными конечными элементами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Т. 17. № 1. С. 145—154.
20. **Шимкович Д. Г.** Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. Сер. "Проектирование". — М.: ДМК Пресс, 2003. — 448 с.

Designing of radio-transparent constructions from composite materials

O. G. ZHIDKOVA, A. V. BORODAVIN, D. V. MITYUSHKINA, N. V. BERSEKOVA
Special Development and Technology Bureau "Plastik", Syzran, Samara region, Russia

The issues of designing radiotransparent head antenna fairings for aircraft are considered. Choosing of fiberglass as a composite material more suitable for the manufacture of the product was substantiated. Elements of analytical strength calculations of radiolucent fairings (RPO) are described. Using the developed design of RPO from a composite material as an example, the features of mathematical modeling are described. The importance of the role of finite element analysis in assessing of the structure operability at different stages of exploitation is shown. The results of the stress-strain state under different types of loads are compared.

Keywords: radiolucent fairing, fiberglass plastic, aerodynamic loads, strength calculation, finite element method, mathematical modeling, stress-strain state.