

АНАЛИЗ РЕАЛИЗУЕМОГО ПОЛЯ ДОПУСКА ПРИ ДИСКРЕТНОМ СОЕДИНЕНИИ ОБОЛОЧКИ ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ВХОДНЫМ ШПАНГОУТОМ

Введение

Как известно [1 – 5] к классу конструкций типа обтекателей летательных аппаратов (ЛА) проявляется ряд высоких требований эксплуатационного характера, существенно отличающихся в зависимости от конкретного назначения проектируемого изделия. К числу общих требований, связанных с снижением их массы и повышением несущей способности относится применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), часто реализуемое трехслойными (сэндвичевыми) конструктивно-технологическими решениями (КТР) с сотовым заполнителем [2 – 5].

К числу не менее важных других относятся высокие требования к качеству аэродинамической поверхности, обеспечиваемые технологическими методами изготовления и сборки оболочки обтекателя из ПКМ с входным шпангоутом [6 – 8]. При этом наряду с минимизацией отклонений теоретического контура деталей из ПКМ, осуществляемой при изготовлении технологической формообразующей оснастки, разработкой оптимальных процессов формования изделий, выбором материала и КТР, необходимо оценить предельно допустимое отклонение входного сечения обтекателя от теоретического контура на этапе сборки, которое может обеспечить регламентированный допуск по эксплуатационным требованиям к изделию.

Постановка и решение задачи

В [8] проведен анализ реализуемых допусков на поставляемые к сборке склеиванием входной шпангоут и оболочку обтекателя ЛА.

Представляет интерес анализ поля допуска аналогичных деталей в случае их сборки соединением четным количеством n винтов (болтов), расположенных с равным шагом (рис. 1).

Как и в работе [9] принято, что шпангоут имеет среднестатистический внутренний, сопрягаемый с наружной поверхностью оболочки, радиус, равный $R_{ш}$, а наружный (сопрягаемый) среднестатистический радиус оболочки равен R_0 . Ширина шпангоута равна B , высота – $h_{ш}$. Оболочка представляет собой трехслойную конструкцию с несущими слоями толщиной δ_0 и толщиной сотового заполнителя h_3 .

В дальнейшем принято, что оболочка в зоне соединения не сжимается под действием стягивающих усилий винтов (обеспечивается, например, постановкой в сотовый заполнитель специальных втулок).

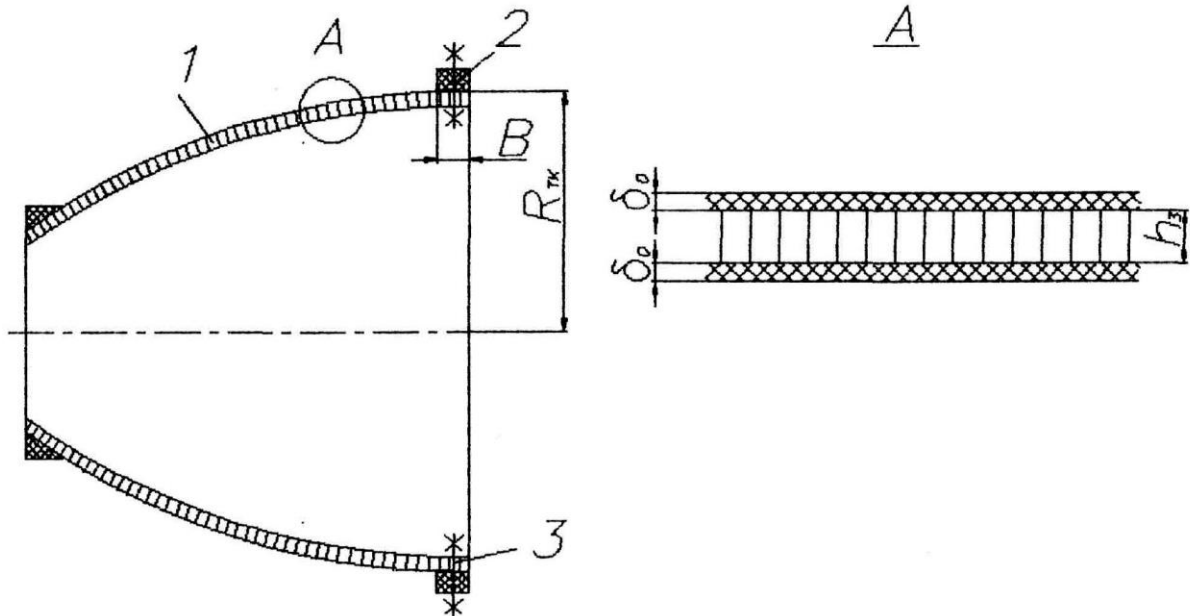


Рисунок 1 – Конструктивно-силовая схема радиоантенны:
1 – параболическая оболочка; 2 – входной шпангоут;
3 – винтовое соединение

Сечение по внутреннему контуру шпангоута, поставляемого на сборку обтекателя, представляет собой эллипс с полуосями a_w , b_w и имеет периметр, равный периметру эквивалентного круга радиусом R_w

$$L_w = \pi \left[1,5 \left(a_w + b_w - \sqrt{a_w b_w} \right) \right] = 2\pi R_w. \quad (1)$$

Размеры полуосей a_w и b_w определяются в результате N замеров с точностью, обеспечивающей коэффициент вариации выборки менее 10% и показатель точности $P \leq 5\%$.

Сечение по наружному контуру также представляет собой эллипс с полуосями a_0 , b_0 и имеет периметр, равный периметру эквивалентного круга радиусом R_0

$$L_0 = \pi \left[1,5 \left(a_0 + b_0 - \sqrt{a_0 b_0} \right) \right] = 2\pi R_0. \quad (2)$$

Определение полуосей a_0 и b_0 идентично изложенному выше для полуосей сечения шпангоута a_w и b_w .

В точках стяжки среднестатистический зазор $\Delta_{сб}$ между эквивалентными радиусами поступающих на сборку шпангоута R_w и оболочки R_0 равен

$$\Delta_{сб} = (R_w - R_0). \quad (3)$$

Этот зазор устраняется смещениями оболочки Δ_0 и шпангоута Δ_w определяемыми из решения статически неопределимой задачи [9]:

$$\Delta_0 = \frac{P \left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^3}{E_0 I_0} \cdot \left(c - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{P \left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]}{E_0 F_0} \cdot c; \quad (4)$$

$$\Delta_w = \frac{P \left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^3}{E_w I_w} \cdot \left(c - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{P \left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)}{E_w F_w} \cdot c, \quad (5)$$

где

$$c = \frac{\alpha + \sin \alpha}{8 \sin^2 \frac{\alpha}{2}};$$

P – усилие стяжки в точке; $\alpha = \frac{2\pi}{n}$ – угол сектора между силами стяжки;

E_w , E_0 – модули упругости материала шпангоута и оболочки в окружном направлении; I_w , I_0 , F_w , F_0 – моменты инерции и площади поперечного сечения шпангоута и оболочки

$$I_w = \frac{B h_w^3}{2}, \quad I_0 = 2B \delta_0 \left(\frac{\delta_0 + h_3}{2} \right)^2; \quad (6)$$

$$F_w = B h_w, \quad F_0 = 2B \delta_0. \quad (7)$$

Сотовый наполнитель не воспринимает нагрузки.

Усилие стяжки P определяется из равенства:

$$\Delta_0 + \Delta_w = \Delta_{сб}. \quad (8)$$

Раскрывая равенство (8) с учетом (1) – (3), получим:

$$P = \frac{R_w - R_0}{\left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^3}{E_0 I_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^3}{E_w I_w} \right\} \cdot \left(c - \frac{1}{\alpha} \right) + \left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]}{E_0 F_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)}{E_w F_w} \right\} \cdot c}; \quad (9)$$

После стяжки обшивки и шпангоута в середине промежутков между винтами будут иметь место максимальные зазоры Δ_z (рис. 2).

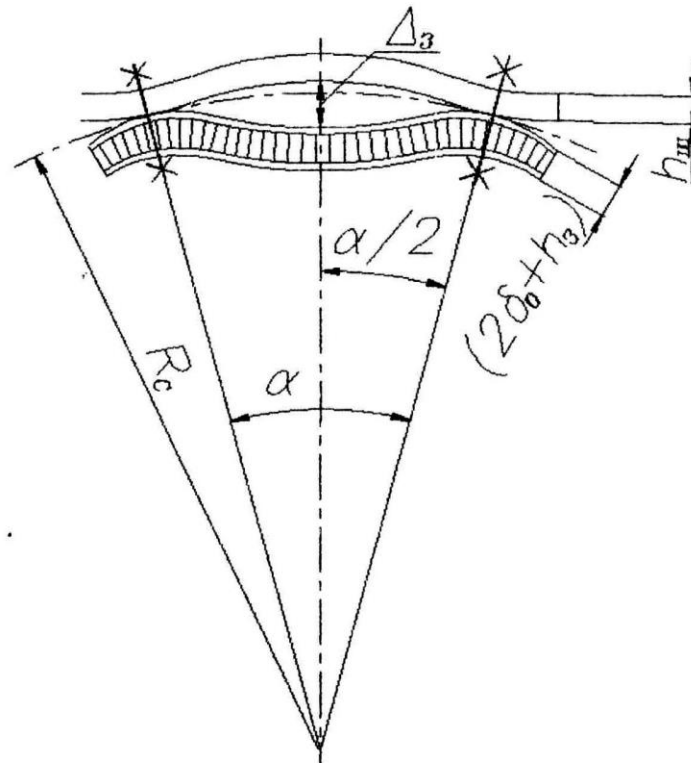


Рисунок 2 – Схема определения зазора Δ_z

Для определения зазора Δ_z , равного

$$\Delta_z = \Delta_{z0} + \Delta_{zш}, \quad (10)$$

где Δ_{z0} , $\Delta_{zш}$ – смещение контура обшивки и шпангоута при $\alpha/2$ относительно радиуса сопряжения R_c оболочки и шпангоута после стяжки (рис. 1), необходимо решить статически неопределимые задачи для шпангоута и оболочки методом сил, приложив в точке искомого смещения единичные силы.

В силу симметрии системы и нагрузок может быть рассмотрена задача интегрального определения искомых смещений при одновременном приложении единичных усилий в n точках, смещенных относительно точек стяжки на угол $\alpha/2$.

Тогда вместо кольцевой системы может рассматриваться сектор с углом раствора $\alpha/2$, в пределах которого эпюры грузового и единичного состояния имеют разные знаки и масштаб, но изменяются по одному и тому же закону (рис. 3).

Так как решение задач рис. 3 известно [10], искомые смещения оболочки и шпангоута определяются по формуле Мора*:

* Перемещения от осевых и перерезывающих сил более чем на два порядка меньше перемещений от изгибающего момента, что позволяет ими пренебречь.

$$\Delta_3 = \frac{2n}{EI} \int_0^{\alpha/2} M \bar{M} d\varphi, \quad (11)$$

где $M, \bar{M}$ – известные аналитические выражения [9] изгибающих моментов в грузовом и единичном состояниях (рис. 2) на участке $\frac{\alpha}{2} \geq \varphi \geq 0$.

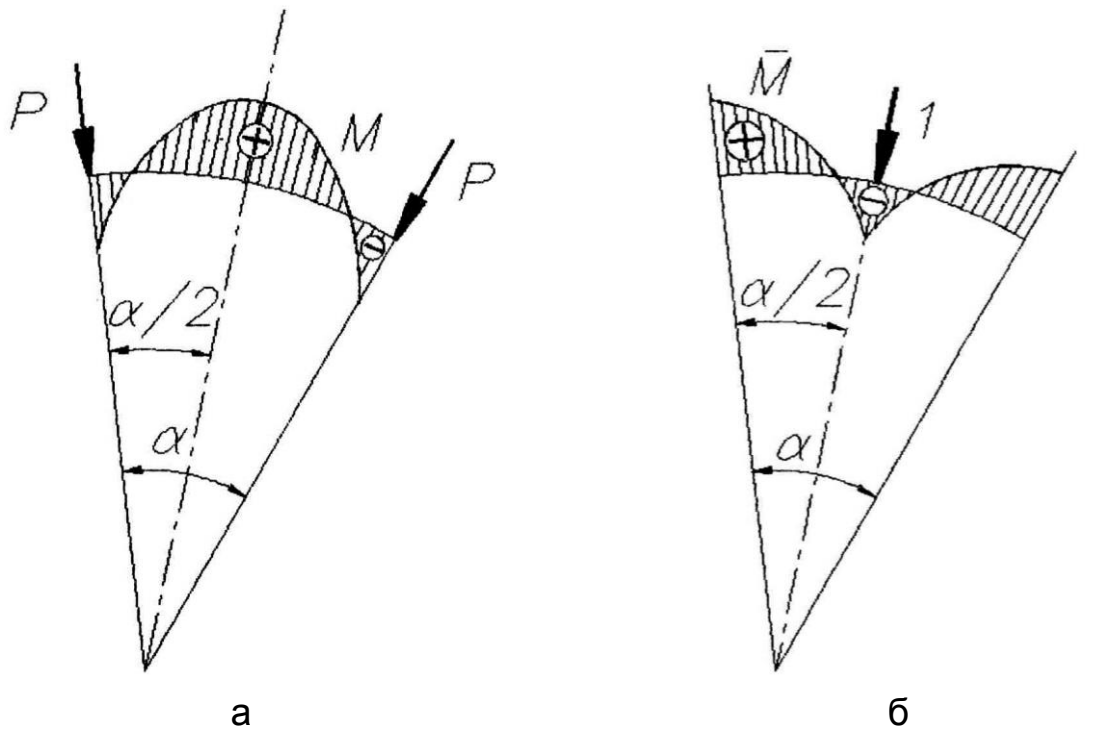


Рисунок 3 – Эпюры изгибающих моментов в оболочке (шпангоуте) при одновременном приложении единичных усилий в n смещенных на $\alpha/2$ точках: а – в грузовом состоянии; б – в единичном состоянии

Подставляя эти выражения в (11), получим:

$$\begin{aligned} \Delta_c &= \frac{2PR^3}{EI} \int_0^{\alpha/2} \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \phi\right)}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \right] \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos\phi}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \right) d\varphi = \\ &= \frac{PR^3}{2EI} \left(\alpha \cos\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя в (12) вместо R, EI соответствующие параметры оболочки и шпангоута, получим с учетом (9):

$$\begin{aligned}
\Delta_{30} = & \frac{2(R_w - R_0) \left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^3 \left(\frac{2\pi}{n} \cos \frac{\pi}{n} + \sin \frac{\pi}{n} \right)}{E_0 I_0} \\
& \cdot \left[\left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^3}{E_0 I_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^3}{E_w I_w} \right\} \frac{\left(\frac{4\pi^2}{n} + \frac{2\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n} - 1 \right)}{16 \frac{\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \right. \\
& \left. + \left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]}{E_0 F_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)}{E_w F_w} \right\} \frac{\left(\frac{2\pi}{n} + \sin \frac{2\pi}{n} \right)}{8 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \right]^{-1} \quad ; (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{3w} = & \frac{2(R_w - R_0) \left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^3 \left(\frac{2\pi}{n} \cos \frac{\pi}{n} + \sin \frac{\pi}{n} \right)}{E_w I_w} \\
& \cdot \left[\left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^3}{E_0 I_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^3}{E_w I_w} \right\} \frac{\left(\frac{4\pi^2}{n} + \frac{2\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n} - 1 \right)}{16 \frac{\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \right. \\
& \left. + \left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]}{E_0 F_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)}{E_w F_w} \right\} \frac{\left(\frac{2\pi}{n} + \sin \frac{2\pi}{n} \right)}{8 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \right]^{-1} \quad ; (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_3 = 2(R_w - R_0) & \left\{ \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2}\right)^3}{E_w I_w} + \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2}\right)\right]^3}{E_0 I_0} \right\} \left(\frac{2\pi}{n} \cos \frac{\pi}{n} + \sin \frac{\pi}{n} \right) \cdot \\
& \cdot \left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2}\right)\right]^3}{E_0 I_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2}\right)^3}{E_w I_w} \right\} \frac{\left(\frac{4\pi^2}{n} + \frac{2\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n} - 1 \right)}{16 \frac{\pi}{n} \sin^2 \frac{\pi}{n}} + \\
& + \left\{ \frac{\left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2}\right)\right]}{E_0 F_0} + \frac{\left(R_w + \frac{h_w}{2}\right)}{E_w F_w} \right\} \frac{\left(\frac{2\pi}{n} + \sin \frac{2\pi}{n} \right)}{8 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \right]^{-1} \quad . \quad (15)
\end{aligned}$$

Максимальный среднестатистический допуск на отклонение от теоретического контура оболочки равен:

$$\Delta_{mk \max}^c = (R_0 - R_{mk}) - (2\delta_0 + h_3) + \Delta_0, \quad (16)$$

а минимальный среднестатистический допуск определяется зависимостью

$$\Delta_{mk \min}^c = \Delta_{mk \max}^c - \Delta_{30}. \quad (17)$$

Максимальный реализуемый допуск $\Delta_{mk \max}^p$ определяется заменой в (4) и (16) R_0 на a_0 , а минимальный реализуемый допуск $\Delta_{mk \min}^p$ – заменой в (4) и (16) R_0 на b_0 .

При этом a_0 , a_w , b_0 и b_w зависят от качества точности, регламентирующего точность изготовления оболочки и шпангоута.

При изготовлении обтекателя из ПКМ отклонения от теоретического контура предопределяются качеством точности изготовления формообразующей оснастки и возможностями технологических процессов формования оболочки и шпангоута.

При достаточно большом количестве точек стяжки ($n \approx 100$) $\sin \alpha \rightarrow \alpha$. Тогда $c = \frac{1}{\alpha} = \frac{R}{dS}$ и выражения (4) – (5) принимают вид:

$$\Delta_0 = \frac{P \left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^2}{E_0 F_0 dS} = \frac{q \left[R_0 - \left(\delta_0 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^2}{E_0 F_0}; \quad (18)$$

$$\Delta_w = \frac{q \left(R_w + \frac{h_w}{2} \right)^2}{E_w F_w}, \quad (19)$$

где q – интенсивность усилия стяжки.

Как видно, равенства (18) – (19) соответствуют полученным ранее в [8] для сборки обтекателя ЛА склеиванием.

Соответственно вместо (9) имеет место выражение для интенсивности q , идентичное полученному в [8].

Смещения Δ_{z0} , Δ_{zw} и Δ_z , определяемые (13) – (15), уменьшаются до незначимых величин, практически обращаясь в нуль.

В заключение рассмотрим пример при характеристиках композитного обтекателя ЛА, приведенных в [8]:

$R_{mk}=500$ мм, $h_w=10$ мм, $B=20$ мм, $\delta_0=1$ мм, $h_3=8$ мм, $E_w=100$ ГПа, $E_0=50$ ГПа, $a_0=509$ мм, $b_0=508$ мм, $a_w=512$ мм, и $b_w=510$ мм. Для указанных параметров: $R_w=511$ мм, $R_0=508,5$ мм, $\Delta_{сб}=2,5$ мм. Количество точек стяжки $n=16$.

По формуле (9) с учетом параметров c и α находим $P=188$ Н. По (4) с учетом c и α $\Delta_0=2$ мм. По (13) $\Delta_{z0}=0,19$ мм. По (16) и (17) соответственно $\Delta_{mk\max}^c=0,5$ мм, $\Delta_{mk\min}^c=0,31$ мм.

В [8] для сборки клеейкой получено $\Delta_{mk}^c=0,79$ мм. Таким образом, соединение шпангоута с оболочкой винтами может оказаться более эффективным при рациональном количестве винтов, которое следует установить. Как видно из (18) – (19), при достаточно большом $n \approx 100$ реализуемое поле допуска на отклонение оболочки от теоретического контура при склейке и соединении винтами будет практически одинаковым.

Список использованных источников

1. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов: проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания [Текст] / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2003. – 239 с.
2. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков [Текст] / И.Г. Гуртовик, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.Г. Шалгунов. – М.: Мир, 2002. – 368 с.
3. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст]: монограф./ В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский. – Х.: Нац. аэрокосм.

ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

4. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения [Текст]: монограф. в 2 т. Т. 1. Технологические несовершенства сотовых заполнителей и конструкций / А.В. Гайдачук, О.А. Карпикова, А.В. Кондратьев, М.В. Сливинский; под. ред. А.В. Гайдачука – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 279 с.

5. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники [Текст]: монограф. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, В.В. Кириченко, А.М. Потапов; под. ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.

6. Кобрин В.Н. Технологические проблемы изготовления зеркальных антенн аэрокосмического назначения из полимерных композиционных материалов [Текст] / В.Н. Кобрин, Аль-Хеяри Али // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 12. – Х., 1998. – С. 81 – 85.

7. Гайдачук В.Е. Методика выбора рациональных конструктивных параметров силового набора радиолокационных антенн [Текст] / В.Е. Гайдачук, И.А. Серебряков, Б.В. Шевчук // Расчет и проектирование конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Харьк. авиац. и-та. – Х., 1989. – С. 30 – 38.

8. Кобрин, В.Н. Нормирование поля допуска на сборку склеиванием параболических радиоантенн из композиционных материалов [Текст] [Текст] / В.Н. Кобрин, А.В. Гайдачук, Аль-Хеяри Али // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 13. – Х., 1998. – С. 28 – 33.

9. Лизин, В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций [Текст] / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1976 – 408 с.

Поступила в редакцию 13.09.2016.

*Рецензент: д-р техн. наук, доц. А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*