

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВОЛНОВОДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Кудрявцев И.В., Гоцелюк О.Б., Михнёв М.М., Новиков Е.С.

научный руководитель докт. техн. наук Сильченко П.Н.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-257.2013.8

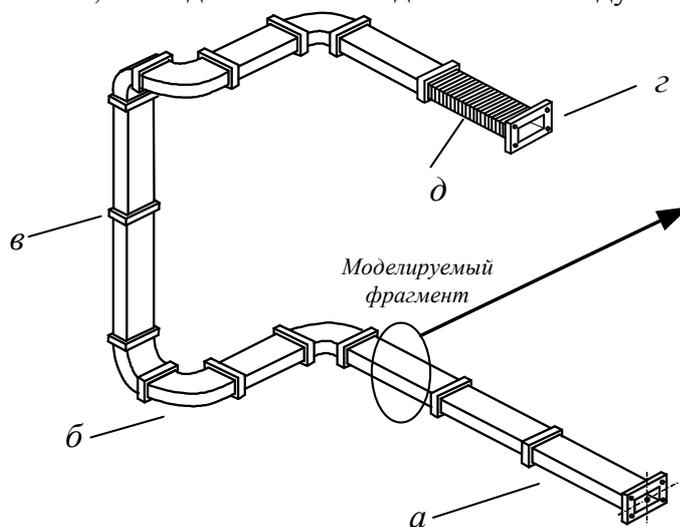
Функционально-эксплуатационные параметры, прочностные, динамические и жесткостные характеристики в сочетании с уменьшением массы волноводов антенно-фидерных устройств (АФУ) космических аппаратов (КА) можно обеспечить применением более точных методов их расчёта и рациональным выбором всех конструктивных размеров элементов с учётом в методиках результатов экспериментальных исследований.

Получение точного аналитического решения этой задачи расчёта тонкостенной оболочечной конструкции волновода является весьма сложным. Использование численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ) не обеспечивает необходимой точности и корректности результатов и сильно зависит от типа и количества конечных элементов (КЭ), на которые разбита исходная геометрия рассчитываемой конструкции, а также ограничивается ресурсами ЭВМ.

Нами разработаны методики, согласно которым, в глобальной постановке протяженные участки волноводов моделируются пространственными стержневыми конструкциями, имеющие соответствующие закрепления и нагруженными эквивалентными нагрузками. Разработаны методы проведения их статического и динамического анализа, включающего в себя квазистатический анализ, модальный анализ, анализ на синусоидальную вибрацию, термоупругий анализ и анализ изменения их геометрии с имитацией температурных деформаций, полученных в ходе сборки пайкой.

Методики позволяют проведение уточненных расчетов отдельных локальных участков конструкции АФУ. Для этого, после расчета участка или же всей волноводной системы как стержневой конструкции, выделяется интересующий участок и транслируется в виде твердотельной модели в ППП Ansys (Nastran и др.) с соответствующими силовыми факторами по своим границам. Дальнейший расчет выделенного участка выполняется методом МКЭ в используемом ППП, и требует уже незначительных машинных затрат.

Для верификации полученного численного решения выделенного участка предлагается методика их аналитического расчета, которая рассматривает конструкцию волновода АФУ в виде набора прямых элементов, последовательно соединенных между собой (рис.1).



*а – прямой элемент; б – изогнутый элемент; в – муфта; г – фланец; д – гибкая секция*

Рисунок 1 – Участок волновода АФУ

Составные прямые элементы АФУ имеют тонкостенное прямоугольное поперечное сечение и представляют собой оболочечные конструкции. Предложено разбиение исходной прямоугольной конструкции элементов на отдельные подэлементы в виде пластин.

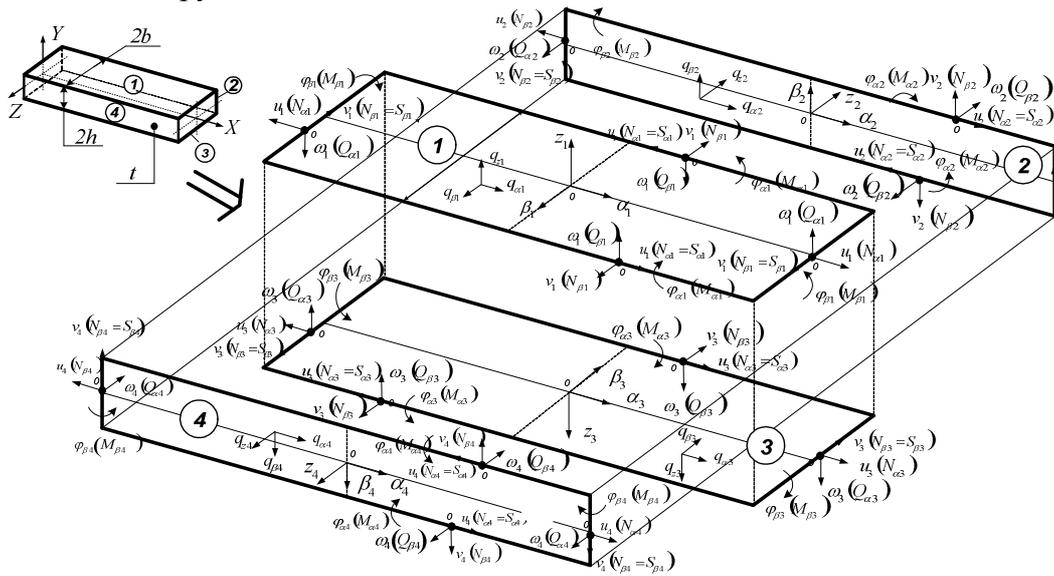


Рисунок 2 –Выделенный фрагмент волновода в виде прямого элемента

Рассматривая отдельную  $i$ -ю пластинку (рис.2), ее уравнения равновесия в готовом виде будут представлять систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно прогиба  $\omega_i$  и функции напряжений  $\varphi_i$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial^4 \varphi_i}{\partial \alpha_i^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi_i}{\partial \alpha_i^2 \partial \beta_i^2} + \frac{\partial^4 \varphi_i}{\partial \beta_i^4} = Et \cdot \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} \right]; \\ \frac{\partial^4 \omega_i}{\partial \alpha_i^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega_i}{\partial \alpha_i^2 \partial \beta_i^2} + \frac{\partial^4 \omega_i}{\partial \beta_i^4} = \frac{1}{D} \left[ N_{\alpha i} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} - 2S_i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} + N_{\beta i} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} - q_{\alpha i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha_i} - q_{\beta i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \beta_i} + q_{z i} \right]; \end{cases}$$

Уравнения полученной системы являются взаимосвязанными, и их совместное решение определяет полное напряженно-деформированное состояние каждой пластины.

Полная система дифференциальных уравнений, описывающая статическое и динамическое состояния прямого элемента будет состоять их четырех взаимосвязанных систем (1) с соответствующими граничными и краевыми условиями.

Полученная система дифференциальных уравнений является сложной и в имеющейся математической литературе не обнаружено информации о решении подобного вида систем дифференциальных уравнений, за исключением частных случаев приближенного решения.

Один из вариантов аналитического решения системы (1) для пластины предложен М.В. Сухотериным и состоит из двух частей – аналитической и численной. Но определить достоверность полученного решения не представляется возможным.

Нами предлагаются строить решения на основе зависимостей, которые учитывают специфику конструкции прямого элемента и включают отдельные компоненты, действующие вдоль широкой ( $u$ ), узкой ( $v$ ) стенок элемента длиной ( $d$ ):

$$\begin{aligned} \omega(\alpha, \beta) &= \omega_0(\beta) + \sum_n [\omega_{1n}(\alpha, \beta) + \omega_{2y}(\alpha, \beta) + \omega_{2d}(\beta) + \omega_z(\alpha, \beta)], \\ \varphi(\alpha, \beta) &= \sum_n [\varphi_n(\alpha, \beta) + \varphi_y(\alpha, \beta) + \varphi_d(\beta)], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega_0(\beta)$  – кубический сплайн,  $\omega_z(\alpha, \beta)$  - функция, полученная на основе аппроксимации экспериментальных данных, уточняющая общее решение.

### Заключение

Разработанные подходы и методики расчета используются при расчёте участков волноводов АФУ КА «Гонец» и «Луч-5А» в процессе моделирования статических, температурных и динамических воздействий.