

УДК 629.7.023:629.76:531.3

Конюхов А.С.

НТУУ «Киевский политехнический институт» г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ И ИНЕРЦИОННО-МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРТОТРОПНОЙ ГЛАДКОБОЛОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ БИКОНИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ СТВОРКИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Konjuhov A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

THE DEFINITION OF STIFFNESS AND INERTIAL MASS CHARACTERISTICS OF AN ORTHOTROPIC SMOOTH SHELL BICONICAL MODEL OF A SECTION LEAF OF A HEAD FAIRING

Предложен универсальный численный метод гладкооболочечной аппроксимации вафельной обшивки биконического отсека головного обтекателя (ГО) ракет-носителей (РН). Техника “сглаживания” проиллюстрирована на примере определения методом конечных элементов жесткостных и инерционно-массовых характеристик ортотропной гладкооболочечной модели типовой биконической секции створки ГО. Представление имитационной модели секции ГО данного типа ориентировано на использование двумерных оболочечных и балочных конечных элементов. Разработанный метод расчета обеспечивает эффективный алгоритм определения числовых данных при создании имитационных динамических моделей тонкостенных биконических оболочек вафельного типа подкрепленных массивными шпангоутами для отсеков головного обтекателя РН. Практическое применение разработанного метода осуществлялось для проведения амплитудно-частотного анализа ракетносителя «Циклон-4».

Ключевые слова: ракета-носитель, головной обтекатель, динамический анализ, биконическая тонкостенная оболочка, шпангоут, метод конечных элементов, жесткость, инерционно-массовые характеристики, ортотропная гладкооболочечная модель биконической секции створки головного обтекателя, упругие свойства ортотропных материалов

Введение. Построение рациональных динамических моделей современных жидкостных ракет-носителей (РН) содержит, как правило, элементы эвристики [1-3]. Адекватность модели определяется сравнением данных расчетного исследования, полученных для разных степеней идеализации исходного объекта. Принимаемые к рассмотрению динамические модели РН зависят от используемых гипотез и упрощающих предположений, в том числе от аппроксимации геометрии элементов конструкции РН.

Головной обтекатель (ГО) РН «Циклон-4» представляет собой цилиндроконический сварной отсек вафельной конструкции диаметром 4м и имеет два типа исполнения, которые отличаются длиной цилиндрической части: тип 01 (8,59м) и тип 02 (9,59м). Конструктивно ГО состоит из двух створок, скрепленных между собой с помощью механических замков. Цилиндрическая и биконическая секции головного обтекателя (ГО) РН выполнены в виде тонкостенных оболочечных конструкций вафельного типа с продольным (стрингеры) и поперечным (шпангоуты) подкреплением, образующим множество ячеек регулярной структуры на внутренней поверхности оболочек.

Задача исследования упругой динамики створок ГО с исходной детализацией геометрии секций оболочки при построении динамической модели РН [2] не осуществима на современном уровне развития вычислительной техники. В этой связи, предлагается рациональная упрощающая аппроксимация геометрии оболочечных элементов вафельного типа гладкооболочечными аналогами с использованием условий эквивалентности жесткостных и инерционно - массовых характеристик. Такой подход позволяет отказаться от привлечения неоправданно больших вычислительных ресурсов при математическом моделировании динамики ГО на основе трехмерных конечных элементов (КЭ) [4]. Представление имитационной модели ГО с аппроксимацией биконической секции гладкими оболочками ориентировано на использование двумерных оболочечных КЭ, что обеспечивает эффективность расчетного исследования динамики ГО в рамках принятой модели [5].

Цель работы состоит в создании адекватной модели конструктивно - ортотропной гладкой оболочки с жесткостными и инерционно-массовыми характеристиками эквивалентными соответствующим величинам

подкрепленной оболочки вафельного типа биконической секции створки ГО, а также в разработке методики расчета параметров приведения.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассматривается створка ГО, состоящая из четырех отсеков К2-К4 биконической (рис.1а) и цилиндрической секций, также разделенной на четыре отсека Ц1-Ц4. Отсеки створок ГО являются тонкостенными оболочками вафельного типа, имеющих подкрепления силовыми шпангоутами. Вспомогательные стрингеры и шпангоуты (рис.1б), образуют множество однородных ячеек прямоугольной и трапецидальной формы для обеспечения жесткости оболочек створок ГО вдоль его продольной оси и в окружном направлении. Сетка вспомогательных подкрепляющих элементов оболочки биконической секции ортогональная, совпадает с линиями главных кривизн ее отсеков и расположена несимметрично относительно срединной поверхности тонкого слоя обшивки ГО. На всех участках секций К2-К4 и Ц1-Ц4 ГО имеет место равномерное распределение ячеек (рис.2) на внутренней поверхности оболочки. Геометрические размеры вспомогательных подкрепляющих элементов типовой ячейки биконической секции указаны в табл. 1. на примере отсека К4. Методика и результаты приведения к гладкооболочечным аналогам для цилиндрических секций Ц1-Ц4 створок ГО рассмотрено в работе [5].

Конструкционный материал облочек биконической и цилиндрической секций створок ГО – алюминиевый сплав АМгбМ с известными упругими и массовыми характеристиками: модуль упругости $E = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,227$; плотность $\rho = 2640 \text{ кг/м}^3$.

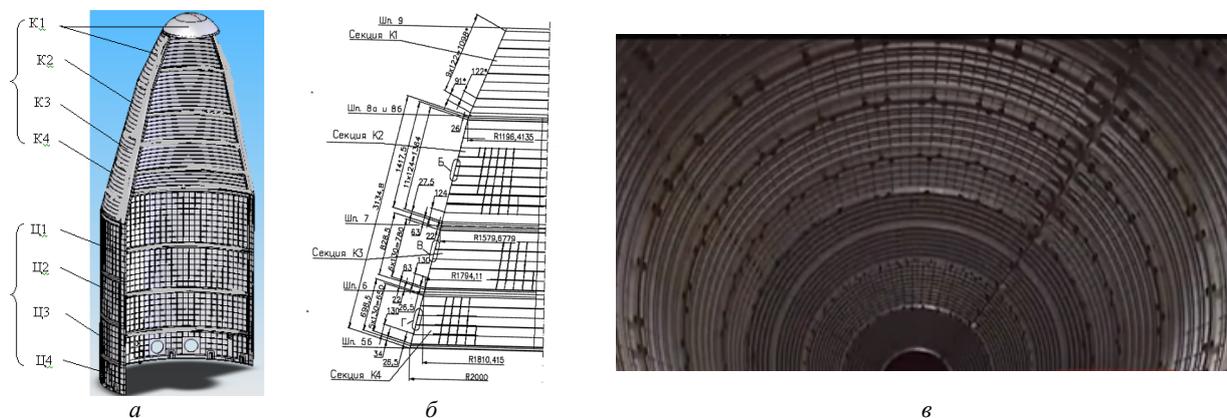


Рис. 1. Общий вид створки головного обтекателя РН (а), компоновочная схема биконической секции створок ГО (б) и фрагмент ее конструктивно-технологического исполнения (в)

Таблица 1

Геометрические размеры вспомогательных подкрепляющих элементов отсека К4

Наименование отсека	Высота стрингера, $H_{всп.стр}^{(K...)}$, мм	Толщина стрингера, $B_{всп.стр}^{(K...)}$, мм	Длина стрингера, $L_{всп.стр}^{(K...)}$, мм
К4	7,5	3	130

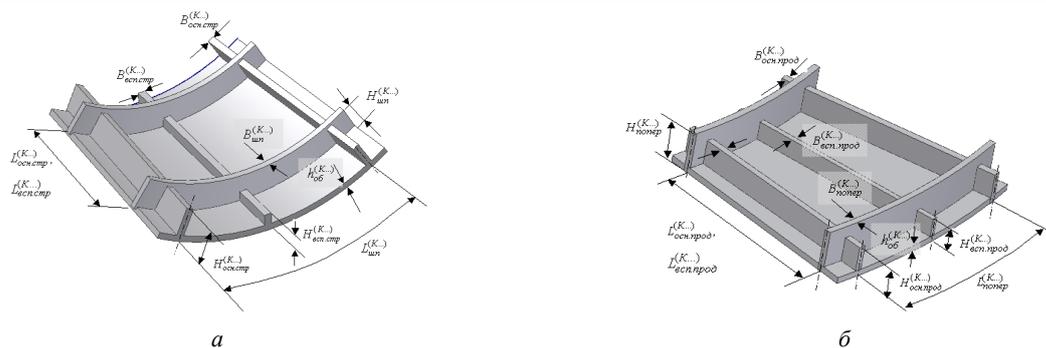


Рис. 2. Обобщенная конструкция ячейки вафельной оболочки отсеков К2-К4 биконической секции створки ГО и ее плоский прототип – аналог (б)

Для замены какой-либо части подкрепленной биконической оболочки в пределах конических отсеков К2-К4 ГО с малым (до 60 градусов) углом раствора конуса [1] эквивалентной гладкой оболочкой с постоянными жесткостными и инерционно-массовыми характеристиками ввели гипотезу об однородности размещения топологической структуры ячеек (рис.2а). При определении параметров эквивалентной гладкой оболочки для каждого конического отсека провели определенные изменения в модели конструкции типового фрагмента подкрепленной оболочки. Конструкцию фрагмента К-го отсека малой кривизны представили ячейкой плоского прототипа – аналога вафельной оболочки (в отличие от исходной конструкции) прямоугольной формы (рис.2).

Это достигали путем установления постоянной длины поперечного ребра ячейки, которая для всех ячеек рассматриваемого К-го отсека будет иметь величину $L_{nonep.const}^{(K...)}$, рассчитываемую по следующей формуле:

$$L_{nonep}^{(K...)} = \frac{1}{2}(L_{nonep.min}^{(K...)} + L_{nonep.max}^{(K...)}), \quad (1)$$

где $L_{nonep.min}^{(K...)}$ и $L_{nonep.max}^{(K...)}$ - минимальная и максимальная длина поперечного ребра типового фрагмента в пределах рассматриваемых отсеков К2-К4.

Для расчета параметров жесткости и инерционно - массовых характеристик эквивалентной гладкой оболочки биконической секции ГО вафельной конструкции с циклической симметрией геометрии вспомогательных стрингеров и шпангоутов в окружном и продольном направлениях, рассматривали соответствующий типовой фрагмент плоского прототипа – аналога (рис.2б) с приведенным геометрическим размером длины поперечного ребра ячейки $L_{nonep.const}^{(K...)}$.

В качестве критерия оценки соответствия величин жесткостных и инерционно-массовых характеристик выходной секции оболочки ГО с изотропными упругими свойствами материала и гладкой эквивалентной конструкцией оболочки ГО с ортотропными упругими свойствами материала выбрали равенство величин собственных частот и типов форм колебаний плоского прототипа – аналога вафельной фрагмента подкрепленной оболочки вафельного типа биконической секции ГО с габаритными размерами $L_{всп.прод}^{(K...)}$ в продольном направлении и $L_{nonep}^{(K...)}$ в поперечном направлении (рис.2а).

Поскольку подкрепленные оболочки отсеков биконической секции ГО имеют явно выраженные различия жесткостных характеристик в продольных и поперечных направлениях, то является очевидным, что эквивалентный материал гладкой оболочки (рис.3), сохраняющий жесткостные свойства подкрепленной оболочки, должен обладать свойствами ортотропии.



Рис. 3. Продольное ($O_*^{(K...)}x_*^{(K...)}$) и поперечное ($O_*^{(K...)}y_*^{(K...)}$) направления оболочки отсека К... биконической секции

Для расчетных упругих постоянных ортотропного материала эквивалентных гладких оболочек ввели следующие обозначения: $E_{эkv.1}^{(K...)}$ и $\mu_{эkv.1}^{(K...)}$ - модуль упругости и коэффициент Пуассона для продольного направления эквивалентной ортотропной гладкой оболочки К-го отсека; $E_{эkv.2}^{(K...)}$ и $\mu_{эkv.2}^{(K...)}$ - модуль упругости и коэффициент Пуассона для поперечного направления эквивалентной ортотропной гладкой оболочки К-го отсека.

Геометрические и инерционные характеристики эквивалентных ортотропных гладких оболочек различных отсеков биконической секции описывали с помощью двух параметров: $h_{эkv}^{(K...)}$ - толщина эквивалентной ортотропной гладкой оболочки в пределах отсека; $\rho_{эkv}^{(K...)}$ - плотность материала эквивалентной ортотропной гладкой оболочки в пределах отсека. Здесь и далее верхний индекс указывает наименование отсека биконической секции, для которого вводились данные обозначения.

Жесткостные характеристики эквивалентных ортотропных гладких оболочек представлены соотношениями

$$D_{эkv.изг.1}^{(K...)} = \frac{E_{эkv.1}^{(K...)}(h_{эkv}^{(K...)})^3}{12(1-\mu_{эkv.1}^{(K...)}\mu_{эkv.2}^{(K...)})}; \quad D_{эkv.раст.1}^{(K...)} = \frac{E_{эkv.1}^{(K...)}h_{эkv}^{(K...)}}{1-\mu_{эkv.1}^{(K...)}\mu_{эkv.2}^{(K...)}}; \quad (2)$$

$$D_{эkv.изг.2}^{(K...)} = \frac{E_{эkv.2}^{(K...)}(h_{эkv}^{(K...)})^3}{12(1-\mu_{эkv.1}^{(K...)}\mu_{эkv.2}^{(K...)})}; \quad D_{эkv.раст.2}^{(K...)} = \frac{E_{эkv.2}^{(K...)}h_{эkv}^{(K...)}}{1-\mu_{эkv.1}^{(K...)}\mu_{эkv.2}^{(K...)}}; \quad (3)$$

где - $D_{эkv.изг.1}^{(K...)}$, $D_{эkv.изг.2}^{(K...)}$ - погонная изгибная жесткость в продольном и поперечном направлении (рис.3) эквивалентной гладкой ортотропной оболочки; $D_{эkv.раст.2}^{(K...)}$, $D_{эkv.раст.1}^{(K...)}$ - погонная жесткость на растяжение в продольном и поперечном направлении эквивалентной гладкой ортотропной оболочки.

Считая, что конструктивные элементы вспомогательных шпангоутов и стрингеров равномерно распределены по поверхности подкрепленной оболочки биконической секции створок ГО, определение податливостей $\delta_{раст1}^{(o)}$, $\delta_{раст2}^{(o)}$ и $\delta_{изг1}^{(o)}$, $\delta_{изг2}^{(o)}$ соответствующих им жесткостей на растяжение и изгиб в продольном и поперечном направлениях расправленного фрагмента ($L_{фр.прод}^{(II)}$ x $L_{фр.nonep}^{(II)}$) подкрепленной оболочки проводили по формулам:

$$\delta_{раст1}^{(II)} = \frac{L_{фр.прод}^{(II)}}{L_{фр.nonep}^{(II)}D_{раст1}^{(II)}}; \quad \delta_{изг1}^{(II)} = \frac{(L_{фр.прод}^{(II)})^3}{12L_{фр.nonep}^{(II)}D_{изг1}^{(II)}}, \quad (4)$$

$$\delta_{расм2}^{(II)} = \frac{L_{фр.прод}^{(II)}}{L_{фр.попер}^{(II)} D_{расм2}^{(II)}} ; \quad \delta_{изг2}^{(II)} = \frac{(L_{фр.прод}^{(II)})^3}{12 L_{фр.попер}^{(II)} D_{изг2}^{(II)}} , \quad (5)$$

где $D_{расм1}^{(II)}, D_{расм2}^{(II)}$ и $D_{изг1}^{(II)}, D_{изг2}^{(II)}$ - погонные жесткости на растяжение, и изгиб в продольном и поперечном направлении фрагмента подкрепленной оболочки.

Численные значения податливостей на растяжение $\delta_{расм1}^{(o)}, \delta_{расм2}^{(o)}$ и изгиб $\delta_{изг1}^{(o)}, \delta_{изг2}^{(o)}$ для продольного и поперечного направлений расплавленного фрагмента подкрепленной оболочки можно определить с помощью системы инженерного анализа (например, MSC / NASTRAN [5]) согласно схем силовой нагрузки, показанных на рис.4, по следующим правилам:

$$\delta_{изг1}^{(o)} = u_{z*} \left| \frac{1}{P_{z*}} = 1 \right. , \quad \delta_{расм1}^{(o)} = u_{x*} \left| \frac{1}{P_{x*}} = 1 \right. ; \quad \delta_{изг2}^{(o)} = u_{z*} \left| \frac{1}{P_{z*}} = 1 \right. , \quad \delta_{расм2}^{(o)} = u_{y*} \left| \frac{1}{P_{y*}} = 1 \right. , \quad (6)$$

где $\bar{P}_{x*}, \bar{P}_{y*}$ и u_{x*}, u_{y*} - единичные силы и вызванные ими перемещения в направлении оси $Ox_*^{(o)}, Oy_*^{(o)}$ (рис.4а,б); \bar{P}_{z*} и u_{z*} - единичная сила и вызванные ею перемещения в направлении оси $Oz_*^{(o)}$ (рис.4в,г).

По условию эквивалентности погонных жесткостей в продольном направлении ортотропной гладкой и подкрепленной оболочек имеют место соотношения

$$D_{эkv.расм1}^{(o)} = D_{расм1}^{(o)} ; \quad D_{эkv.изг1}^{(o)} = D_{изг1}^{(o)} ; \quad (7)$$

$$D_{эkv.расм1}^{(o)} = \bar{E}_{эkv1}^{(o)} h_{эkv}^{(o)} ; \quad D_{эkv.изг1}^{(o)} = \frac{1}{12} \bar{E}_{эkv1}^{(o)} (h_{эkv}^{(o)})^3 , \quad (8)$$

где $\bar{E}_{эkv1}^{(o)}$ - эффективный модуль упругости для продольного направления эквивалентной ортотропной гладкой оболочки

$$\bar{E}_{эkv1}^{(o)} = \frac{E_{эkv1}^{(o)}}{1 - \mu_{эkv.1}^{(o)} \mu_{эkv.2}^{(o)}} . \quad (9)$$

Ввиду пренебрежимо малого влияния коэффициента Пуассона на напряженное состояние подкрепленной оболочки, коэффициенты Пуассона эквивалентной ортотропной гладкой оболочки принимали:

$$\mu_{эkv.1}^{(o)} = \mu_{эkv.2}^{(o)} = 0 . \quad (10)$$

При этом соотношение (9) представимо в виде

$$\bar{E}_{эkv1}^{(II)} = E_{эkv1}^{(II)} . \quad (11)$$

Располагая численными значениями величин погонных жесткостей для продольного направления эквивалентной ортотропной гладкой оболочки биконической секции, согласно выражению (4) ее толщину рассчитывали следующим образом:

$$h_{эkv}^{(o)} = \sqrt{\frac{12 D_{эkv.изг1}^{(o)}}{D_{эkv.расм1}^{(o)}}} . \quad (12)$$

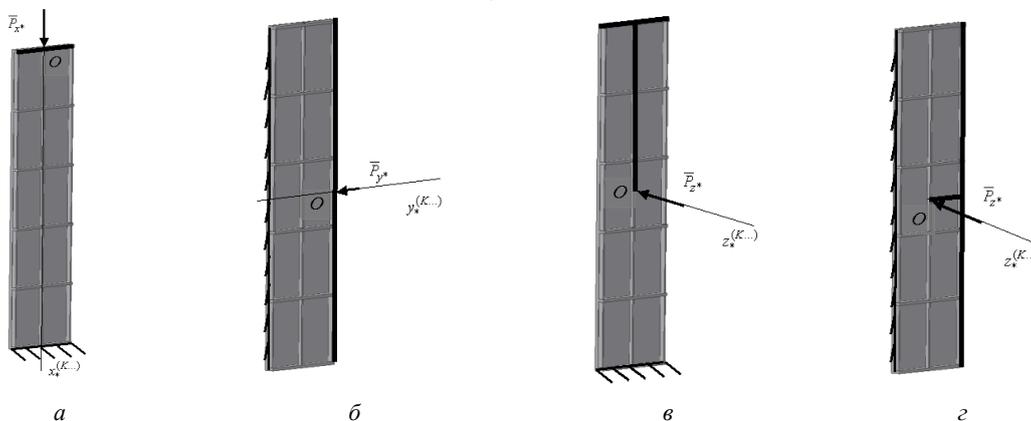


Рис. 4. Схема силового нагружения для определения продольной и поперечной податливостей фрагмента подкрепленной оболочки отсека биконической секции ГО при деформациях сжатия (а, б) и изгиба (б, в)

При этом модуль упругости в продольном направлении эквивалентной ортотропной гладкой оболочки в соответствии с выражениями (2) - (6) может быть найден по формуле:

$$E_{\text{экв.1}}^{(o)} = \frac{D_{\text{экв.расм.1}}^{(o)}}{h_{\text{экв}}^{(o)}}. \quad (13)$$

В предположении о равенстве погонных жесткостей на растяжение для поперечного направления подкрепленных оболочек секций ГО (рис. 3б, г) и эквивалентных фрагментов ортотропных гладких оболочек определяли по аналогичной методике модули упругости $E_{\text{экв.2}}^{(K...)}$ для поперечного направления модели гладких оболочек отсеков К2-К4.

Для согласования величин инерционно-массовых характеристик подкрепленной оболочки биконической секции и соответствующей ей эквивалентной ортотропной гладкой оболочки определяли массу $m_{\text{фр.экв}}^{(o)}$ расправленного фрагмента подкрепленной оболочки биконической секции. Согласно требованию равенства величин массовых характеристик рассматриваемого фрагмента подкрепленной оболочки и соответствующего ему фрагмента эквивалентной ортотропной гладкой оболочки, справедливо следующее выражение:

$$m_{\text{фр.экв}}^{(o)} = m_{\text{фр}}^{(o)}. \quad (14)$$

По известным величинам массы фрагмента подкрепленной оболочки биконической секции $m_{\text{фр}}^{(K...)} = \rho^{(K...)} V_{\text{фр}}^{(K...)}$ и объема фрагмента эквивалентной ортотропной гладкой оболочки $V_{\text{фр.экв}}^{(o)} = L_{\text{фр.прод}}^{(o)} L_{\text{фр.попер}}^{(o)} h_{\text{экв}}^{(o)}$ определяли плотность материала расчетной модели

$$\rho_{\text{экв}}^{(o)} = \frac{m_{\text{фр.экв}}^{(o)}}{V_{\text{экв.расм1}}^{(o)}} \quad (15)$$

Приравняв массу $m_{\text{фр.экв}}^{(o)}$ и погонные жесткости $D_{\text{экв.расм1}}^{(o)}$, $D_{\text{экв.расм2}}^{(o)}$, $D_{\text{экв.изг1}}^{(o)}$ эквивалентной ортотропной гладкой оболочки соответственно массе $m_{\text{фр}}^{(o)}$ и погонным жесткостям $D_{\text{расм1}}^{(o)}$, $D_{\text{расм2}}^{(o)}$, $D_{\text{изг1}}^{(o)}$, подкрепленной оболочки, которые были определены в результате численных экспериментов с помощью лицензированных пакетов прикладных программ SolidWorks и MSC / NASTRAN [6] (ГКБ «Южное, г.Днепропетровск), получили четыре независимых параметра $\rho_{\text{экв}}^{(o)}$, $h_{\text{экв}}^{(o)}$, $E_{\text{экв1}}^{(o)}$ и $E_{\text{экв2}}^{(o)}$, которые вместе с коэффициентами Пуассона $\mu_{\text{экв1}}^{(o)}$ и $\mu_{\text{экв2}}^{(o)}$ полностью характеризуют эквивалентные ортотропные гладкооболочечные аппроксимации биконических секций ГО.

Расчетные геометрические и физические характеристики фрагментов подкрепленной оболочки отсеков К2-К4 биконической секции и эквивалентной ей ортотропной гладкой оболочки представлены в табл. 2. Искомые значения параметров эквивалентной ортотропной гладкой оболочки отсеков биконической секции ГО представлены в табл. 3.

После определения расчетных параметров приведенной толщины, плотности, модулей упругости (табл. 3) биконических секций эквивалентных ортотропных гладкооболочечных аппроксимаций (рис.5) выполняли оценку рассогласования их удельной жесткости на изгиб (такой, что приходится на единицу длины) в поперечном направлении и подкрепленных оболочек отсеков К2 - К4 ГО.

Сравнивая между собой величины удельной изгибной жесткости рассматриваемой подкрепленной оболочки К-го отсека

$$\kappa_{\text{изг2}}^{(K...)} = 12 L_{\text{фр.прод}}^{(K...)} D_{\text{изг2}}^{(K...)} \quad (16)$$

и соответствующей ей эквивалентной ортотропной гладкой оболочки

$$\kappa_{\text{экв.изг2}}^{(K...)} = L_{\text{фр.прод}}^{(K...)} (h_{\text{экв}}^{(K...)})^3 \frac{E_{\text{экв2}}^{(K...)}}{1 - \mu_{\text{экв1}}^{(K...)} \mu_{\text{экв2}}^{(K...)}} \quad (17)$$

определяли невязку $\Delta \kappa_{\text{изг2}}^{(K...)}$:

$$\Delta \kappa_{\text{изг2}}^{(K...)} = \kappa_{\text{изг2}}^{(K...)} - \kappa_{\text{экв.изг2}}^{(K...)}, \quad (18)$$

которую компенсировали парой дополнительных шпангоутов, расположенных с обоих торцов К-го отсека. При этом является очевидным, что величина удельной изгибной жесткости одного дополнительного шпангоута $B_{\text{доп.шп}}^{(K...)}$ будет равна половине величины невязки $\Delta \kappa_{\text{изг2}}^{(K...)}$,

$$\kappa_{\text{доп.шп}}^{(K...)} = \frac{1}{2} \Delta \kappa_{\text{изг2}}^{(K...)} = \kappa_{\text{доп.шп}}^{(K...)} = \alpha \cdot E_{\text{доп.шп}}^{(K...)} \cdot B_{\text{доп.шп}}^{(K...)} \cdot (H_{\text{доп.шп}}^{(K...)})^3 \quad (19)$$

где $B_{\text{доп.шп}}^{(K...)}$ и $H_{\text{доп.шп}}^{(K...)}$ - толщина, и высота дополнительного шпангоута; $E_{\text{доп.шп}}^{(K...)}$ - модуль упругости материала дополнительного шпангоута; $\alpha = 1 \div 4$ - нормировочный коэффициент. $m_{\text{фр}}^{(K...)}$

Таблиця 2

Численные значения параметров подкрепленной и эквивалентной ортотропной гладкой оболочки отсеков биконической секции

Наименование отсека	Объем распрямленного фрагмента подкрепленной оболочки $V_{фр}^{(K...)}, м^3$	Плотность материала подкрепленной оболочки $\rho^{(K...)}, кг/м^3$	Масса распрямленного фрагмента подкрепленной оболочки $m_{фр}^{(K...)}, кг$	Объем распрямленного фрагмента эквивалентной ортотропной гладкой оболочки $V_{фр.эquiv}^{(K...)}, м^3$
K1	$0,723515 \cdot 10^{-3}$	2640	1,696	$1,858203 \cdot 10^{-3}$
K2	$0,602759 \cdot 10^{-3}$	2640	1,589	$1,777203 \cdot 10^{-3}$
K3	$0,463630 \cdot 10^{-3}$	2640	1,224	$1,748253 \cdot 10^{-3}$
K4	$0,429417 \cdot 10^{-3}$	2640	1,134	$1,593826 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3

Параметры эквивалентной ортотропной гладкой оболочки отсеков K2-K4 биконической секции

Наименование отсека	Толщина $h_{эquiv}^{(K...)}, м$	Плотность материала $\rho_{эquiv}^{(K...)}, кг/м^3$	Модуль упругости для продольного направления $E_{эquiv1}^{(K...)}, Н/м^2$	Модуль упругости для поперечного направления $E_{эquiv2}^{(K...)}, Н/м^2$	Коэффициенты Пуассона $\mu_{эquiv1}^{(K...)}, \mu_{эquiv2}^{(K...)}$
K1	$13,513 \cdot 10^{-3}$	933,9	$1,934 \cdot 10^{10}$	$2,346 \cdot 10^{10}$	0
K2	$9,017 \cdot 10^{-3}$	893,9	$1,678 \cdot 10^{10}$	$2,044 \cdot 10^{10}$	0
K3	$12,699 \cdot 10^{-3}$	700,1	$1,373 \cdot 10^{10}$	$1,497 \cdot 10^{10}$	0
K4	$12,322 \cdot 10^{-3}$	711,3	$1,347 \cdot 10^{10}$	$1,566 \cdot 10^{10}$	0

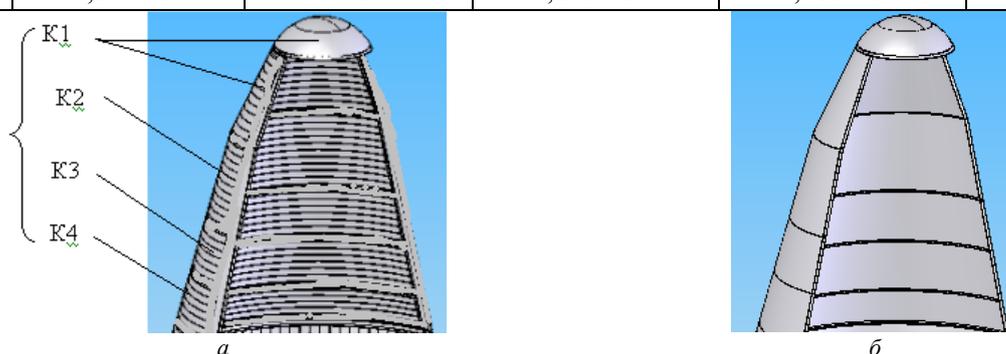


Рис. 5. Биконическая секция отсеков K1-K4 створки ГО вафельного типа (а) и ее эквивалентный аналог (б) с применением гладкооболочечных аппроксимаций после определения расчетных параметров приведенной толщины, плотности, модулей упругости ортотропного материала

Величина коэффициента α зависит от смещения $z_{доп.ун}^{(K...)}$ центра тяжести сечения шпангоута относительно нейтральной линии, которое будет иметь место при изгибе в поперечном направлении рассматриваемой эквивалентной ортотропной гладкой оболочки, усиленной двумя дополнительными шпангоутами. При выборе размеров для поперечного сечения дополнительного шпангоута необходимо, чтобы его высота значительно превосходила толщину

$$H_{доп.ун}^{(K...)} \gg B_{доп.ун}^{(K...)} \quad (20)$$

Выполнение условия (21) позволяет дополнительным шпангоутам оказывать существенное влияние на изгибную жесткость в поперечном направлении эквивалентной ортотропной гладкой оболочки. В то же время жесткость на растяжение в поперечном направлении, а также жесткости на изгиб и растяжение в продольном направлении эквивалентной ортотропной гладкой оболочки будут мало зависеть от дополнительных шпангоутов.

Для известных величин модуля упругости материала $E_{доп.ун}^{(K...)}$ и толщины $B_{доп.ун}^{(K...)}$ дополнительного шпангоута, его высота $H_{доп.ун}^{(K...)}$ может быть найдена по формуле, получаемой из выражения (20)

$$H_{доп.шпн}^{(K...)} = (0,63 \div 1,00) \left(\frac{\kappa_{доп.шпн}^{(K...)}}{E_{доп.шпн}^{(K...)} B_{доп.шпн}^{(K...)}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Отметим, что точное значение высоты дополнительного шпангоута $H_{доп.шпн}^{(K...)}$ можно определить итерационно, начиная с приближенной величины и последовательно уточняя ее с помощью экспериментально определяемой в пакете прикладных программ MSC / NASTRAN величины удельной изгибной жесткости эквивалентной ортотропной гладкой оболочки, усиленной двумя дополнительными шпангоутами.

При этом следует отметить, что если принять модуль упругости материала дополнительного шпангоута $E_{доп.шпн}^{(K...)}$, равным модулю упругости для поперечного направления соответствующей эквивалентной ортотропной гладкой оболочки $E_{экр.2}^{(K...)}$, то численные значения высоты $H_{доп.шпн}^{(K...)}$ дополнительного шпангоута и смещения центра тяжести $z_{доп.шпн}^{(K...)}$ его сечения относительно нейтральной линии могут быть найдены согласно одной из двух систем уравнений. Причем выбор системы уравнений, которой должны удовлетворять искомые величины, будет зависеть от выполнения следующих соотношений:

если выполняется условие 1:

$$\frac{1}{3} (L_{фр.прод}^{(K...)} + 2B_{доп.шпн}^{(K...)}) (h_{экр}^{(K...)})^3 \geq \frac{\kappa_{изг2}^{(K...)}}{24E_{экр.2}^{(K...)}} \quad (22)$$

то величины $H_{доп.шпн}^{(K...)}$ и $z_{доп.шпн}^{(K...)}$ должны удовлетворять системе уравнений

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} + z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \\ & + \frac{1}{3} L_{фр.прод}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \frac{1}{3} L_{фр.прод}^{(K...)} \left[h_{экр}^{(K...)} - \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right) \right]^3 = \frac{\kappa_{изг2}^{(K...)}}{12E_{экр.2}^{(K...)}} \quad , \\ & \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} + z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \frac{1}{3} L_{фр.прод}^{(K...)} \left[h_{экр}^{(K...)} - \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right) \right]^3 = \\ & = \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \frac{1}{3} L_{фр.прод}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 \quad ; \end{aligned} \quad (23)$$

если выполняется условие 2:

$$\frac{1}{3} (L_{фр.прод}^{(K...)} + 2B_{доп.шпн}^{(K...)}) (h_{экр}^{(K...)})^3 < \frac{\kappa_{изг2}^{(K...)}}{24E_{экр.2}^{(K...)}} \quad (24)$$

то величины $H_{доп.шпн}^{(K...)}$ и $z_{доп.шпн}^{(K...)}$ должны удовлетворять системе уравнений

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} + z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \\ & + \frac{1}{12} L_{фр.прод}^{(K...)} (h_{экр}^{(K...)})^3 + L_{фр.прод}^{(K...)} h_{экр}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} - \frac{1}{2} h_{экр}^{(K...)} \right)^2 = \frac{\kappa_{изг2}^{(K...)}}{12E_{экр.2}^{(K...)}} \quad , \\ & \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} + z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 = \frac{2}{3} B_{доп.шпн}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} \right)^3 + \\ & + \frac{1}{12} L_{фр.прод}^{(K...)} (h_{экр}^{(K...)})^3 + L_{фр.прод}^{(K...)} h_{экр}^{(K...)} \left(\frac{1}{2} H_{доп.шпн}^{(K...)} - z_{доп.шпн}^{(K...)} - \frac{1}{2} h_{экр}^{(K...)} \right)^2 \quad . \end{aligned} \quad (25)$$

Согласно выражениям (22)-(25) определяли параметры дополнительных шпангоутов биконической секции ГО. Численные значения параметров дополнительных шпангоутов отсеков К2-К4 представлены в таблице 4.

Таблица 4

Численные значения параметров дополнительных шпангоутов отсеков К1-К4 биконической секции ГО

Наименование отсека	Удельная изгибная жесткость в поперечном направлении подкрепленной оболочки $\kappa_{изг2}^{(K...)}, H \cdot M^2$	Количество шпангоутов отсека	Толщина шпангоута $B_{доп.шпн}^{(K...)}, M$	Высота шпангоута $H_{доп.шпн}^{(K...)}, M$	Модуль упругости материала шпангоута $E_{доп.шпн}^{(K...)}, H/M^2$	Коэффициент Пуассона материала шпангоута $\mu_{доп.шпн}^{(K...)}$
К1	$4,523 \cdot 10^4$	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$48,72 \cdot 10^{-3}$	$2,720 \cdot 10^{10}$	0
К2	$3,331 \cdot 10^4$	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$33,42 \cdot 10^{-3}$	$2,044 \cdot 10^{10}$	0
К3	$2,597 \cdot 10^4$	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$24,00 \cdot 10^{-3}$	$1,497 \cdot 10^{10}$	0
К4	$2,292 \cdot 10^4$	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$27,71 \cdot 10^{-3}$	$1,566 \cdot 10^{10}$	0

Выводы

1. Для исследования динамики жидкостных ракет-носителей со сложным профилем тонкостенных подкрепленных оболочек создана адекватная модель конструктивно-ортотропной гладкооболочечной биконической секции створки головного обтекателя.
2. Методика вычисления жесткостных и инерционно-массовых характеристик гладкооболочечной модели подкрепленной оболочки вафельного типа биконических секций створки ГО использует эквивалентные параметры фрагментов исходного объекта с изотропным материалом и плоского прототипа-аналога с ортотропным материалом. В качестве аппарата исследования применяется метод конечных элементов.
3. Апробация разработанной методики проведена на примере исследования собственных частот и форм колебаний фрагмента подкрепленной оболочки вафельного типа ГО с применением динамической модели пространственно сопряженных элементов ее конструкции с расчетными параметрами гладкой оболочки и вспомогательных шпангоутов.
4. Полученные данные использовались в расчетах спектральных характеристик и динамики сброса обтекателя ракетносителя «Циклон-4».

Анотація. Запропоновано універсальний чисельний метод гладкооболочечної апроксимації вафельної обшивки біконічної відсіку головного обтічника (ГО) ракетносіїв (РН). Техніка "згладжування" проілюстрована на прикладі визначення методом скінченних елементів жорсткісних і інерційно-масових характеристик ортотропної гладкооболонкової моделі типової біконічної секції ступки ГО. Представлення імітаційної моделі секції ГО даного типу орієнтовано на використання двовимірних оболонкових і балочних скінченних елементів. Розроблений метод розрахунку забезпечує ефективний алгоритм визначення числових даних при створенні імітаційних динамічних моделей тонкостінних біконічних оболонок вафельного типу, що підкріплені масивними шпангоутами, для відсіків головного обтічника РН. Практичне застосування розробленого методу здійснювалося для проведення амплітудно-частотного аналізу ракетносія «Циклон-4». **Ключові слова:** ракетносіїв, головний обтічник, динамічний аналіз, біконічна тонкостінна оболонка, шпангоут, метод скінченних елементів, жорсткість, інерційно-масові характеристики, ортотропна гладкооболонкова модель біконічної секції ступки головного обтічника, пружні властивості ортотропних матеріалів

Abstract. The description of the universal numerical method as the approximation of smooth membrane compartments for biconical head fairing rocket launchers. The "smoothing" technique is illustrated by the determination through the method of finite element of stiffness and inertial mass characteristics of an orthotropic smooth shell model of typical biconical section. The procedure for calculating the stiffness and inertial mass properties model smooth skin wafer supported by frames biconical section flap fairing uses the equivalent parameters of the fragments of the original object with an isotropic material and flat prototype analog with orthotropic material. resentation of the simulation model section head fairing rocket launchers of this type is focused on the use of two-dimensional shell and beam finite elements. The developed calculation method provides an efficient algorithm for the numerical data determination whilst creating a simulation of dynamic modeling of a thin-walled shell biconical wafer supported by massive frames for sections fairing rocket launchers. The material of construction of shells biconical sections flaps nosecone aluminum alloy AMr6M with known elastic and mass characteristics. The practical application of the developed method was carried out for the amplitude-frequency analysis of the "Cyclone-4" rocket.

Keywords: rocket launcher, head fairing, dynamic analysis, biconical thin-walled shell, bulkhead, finite element method, stiffness, inertial-mass characteristics, calculation methodology, orthotropic elastic properties

Библиографический список использованной литературы

1. Микишев Г.Н. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. / – М.: Машиностроение, 1971, - 564 с
2. Конюхов А.С. Собственные колебания жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки. / Конюхов А.С., Легеца В.С., Цыбенко А.С., Кришук Н.Г. // - Проблемы прочности, – 2001. – №3. – с .93-99
3. Цыбенко А.С. Розробка адекватної математичної моделі дослідження динаміки ступок головного обтічника ракетносія у процесі польоту і відділення. / Цыбенко А.С., Кришук Н.Г., Конюхов А.С., Коваль В.П., Аксьоненко А.В., Трубин А.В. // - Наукові вісті НТУУ «КПІ», №6, 2006, с.139-148
4. Батэ Н. Численные методы анализа и метод конечных элементов. / Батэ Н., Вилсон Е. // –М.: Стройиздат, 1982.– 447 с
5. Конюхов О.С. Розрахункова методика приведення циліндрових секцій рідинних ракет-носіїв до гладкооболонкових аналогів // Наукові вісті НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2014, № 60
6. MSC/NASTRAN Advanced Dynamic Analysis, User's guide, v70.

References

1. Mikishev G.N., Rabinovich B.I. Dinamika tonkostennykh konstrukcij s otkekami, soderzhashhimi zhidkost [Dynamics of thin-walled structures with compartments containing liquid] Moscow: Mashinostroenie, 1971, 564 p.
2. Konjuhov A.S., Legeza V.S., Cybenko A.S., Krishchuk N.G. Sobstvennye kolebanija zhidkostnyh raket-nositelej paketnoj komponovki. / [Problemy prochnosti], 2001, no 3, pp. 93-99.
3. Tsybenko A.S., Krishchuk N.G., Konjuhov A.S., Koval' V.P., Aks'onenکو A.V., Trubin A.V. Rozrobka adekvatnoi matematichnoi modeli doslidzhennja dinamiki stulok golovnoho obtichnika raketni-nosija u procesi pol'otu i viddilennja. [Naukovi visti NTUU «KPI»], no 6, 2006, pp.139-148.
4. Bate N., Wilson E. Chislennye metody analiza i metod konechnyh jelementov [Numerical methods of analysis and finite element method] Moscow: Strojizdat, 1982, 447 p.
5. Konjuhov O.S. Rozrahunkova metodyka pryvedennja cylindrovych sekcij ridynnyh raket-nosii'v do gladkoobolonkovykh analogiv Naukovi visti NTUU «KPI», serija Mashynobuduvannja, 2014, No 60
6. MSC/NASTRAN Advanced Dynamic Analysis, User's guide, v70.

Подана до редакції 02.10.2014