

ВЛИЯНИЕ РАДИУСОВ СОПРЯЖЕНИЯ СТенок КОРОБЧАТЫХ КАНАЛОВ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ИХ НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ярослав Николаевич Хомовский, аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" (МАИ)

В прямооточных гиперзвуковых воздушно-реактивных двигателях поперечное сечение канала может изменяться от коробчатой формы до цилиндрической. Оценка напряжённо-деформированного состояния конструкции проводилась двумя способами: с помощью формул для расчёта неразрезных пластин и методом конечных элементов. Во втором случае учёт радиусов сопряжения стенок позволил выявить существенную погрешность по сравнению с первым.

In direct-flow hypersonic engines, the cross-section of the gas-air channel can vary from a rectangular to a cylindrical shape. Formulas for calculating continuous plates were used to calculate the stress-strain state of the construction. Calculations of the channel walls by finite element method and analytical method are carried out. On the basis of the obtained results the error of calculations was revealed.

Key words: combustion chamber, stresses.

Ключевые слова: тракт канала, радиусы сопряжения стенок, прямооточный двигатель, напряжённое состояние, метод конечных элементов.

Канал гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД), по которому воздух подводится в камеру сгорания, представляет собой оболочку прямоугольного или круглого поперечного сечения. Для изготовления такого коробчатого канала может быть использован углерод-углеродный композитный материал (УУКМ), обладающий нужными прочностными характеристиками [1]. Поперечное сечение газоздушного тракта может меняться от прямоугольного до круглого на входе в камеру сгорания. В некоторых случаях канал подкрепляется поперечными стенками, образуя тем самым многоканальную систему (рис. 1).



Рис. 1 Гиперзвуковой прямооточный воздушно-реактивный двигатель летящей лаборатории ГЛЛ-АП (макет) на МАКС-2009

По существу для оценки прочности такой системы достаточно рассмотреть один крайний канал. Для простоты расчётов будем считать нагружение симметричным. Рассмотрим прямоугольную пространственную коробку, образованную плоскими пластинами. Идея использования аппарата неразрезных пластин для расчёта коробок принадлежит К.К. Лихареву [2]. Общая картина напряжённо-деформированного состояния тонкостенного канала квадратного поперечного сечения на достаточном удалении от входа и выхода может быть представлена на рис.2 (а, б, в, г).

В первом приближении прочность канала оценим по формулам из источника [2].

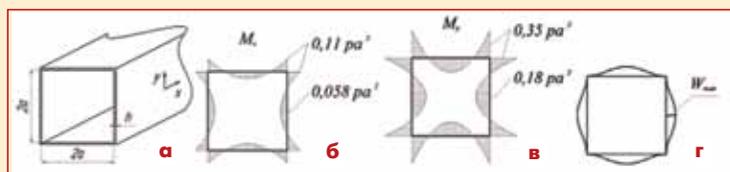


Рис. 2 Сечение канала (а); эпюры изгибающих моментов M_x (б), M_y (в); эпюра прогибов W (г)

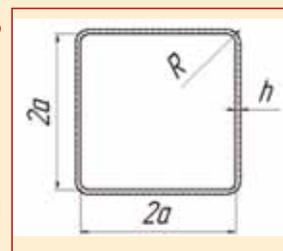
В нашем примере размеры канала были приняты следующими: $a=50\text{мм}$, $h=3\text{мм}$, а перепад давления на стенку $p=1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, тогда:

$$\begin{aligned} M_{y \max} &= 0,35 p a^2; \\ \sigma_{y \max} &= 6 M_{y \max} / h^2; \\ M_{y \max} &= 11,375 \cdot 10^7 \text{ Па} \cdot \text{мм}^2 \\ \sigma_{y \max} &= 7,58 \cdot 10^7 \text{ Па} \end{aligned} \quad (1)$$

В использованных формулах отсутствовало значение внутреннего радиуса R в углах коробчатого канала (рис.3).

Картину НДС можно уточнить расчётом с помощью программы Ansys [5].

Рис. 3 Размеры поперечного сечения канала



Результаты расчётов для различных соотношений радиусов R/h приведены в Таблице 1.

Расхождение максимальных напряжений, полученных двумя разными способами, во всех случаях является значительным. Заметим, что количество конечных элементов на четверти окружности в местах сопряжения плоских стенок было достаточным (10) для того, чтобы это не создавало дополнительной погрешности в результатах. Дальнейшее уменьшение шага сетки практически не влияло на конечный результат расчёта.

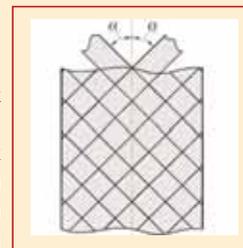
Таблица 1

R, мм	1	2	3	4	5	8
R/h	0,33	0,67	1	1,33	1,67	2,67
$\sigma_{y \max} \cdot 10^7 \text{ Па (Ansys)}$	9,08	6,64	5,89	5,36	5,02	4,14
$\sigma_{y \max} \cdot 10^7 \text{ Па (по формуле 1)}$	7,58					
Разница в напряжениях	19,7%	12,4%	22,2%	29,2%	33,7%	45,3%

Прочность оболочки зависит, в частности, от технологии намотки. При расположении углеродных нитей под углом $\alpha=45^\circ$ к оси коробчатой оболочки (рис. 4) её прочность вдоль оси и в поперечном направлении оказывается примерно одинаковой, а соответствующие напряжения отличаются (рис. 2).

Изменяя угол α , можно изменять и прочность в упомянутых на-

Рис. 4 Схема расположения углеродных нитей



правлениях и добиваться тем самым близких по значениям величин запасов прочности. Сказанное относится в первую очередь к напряжениям в удалённых от углов сечений местах, но также в определённой степени и в местах, где имеет место концентрация напряжений. В последнем случае выполнить количественную оценку достаточно трудно.

Заключение:

1. При исследовании НДС коробчатого канала ГПВРД из углерод-углеродного композитного материала рассматривалось нагружение только перепадом давления.
2. Применение метода конечных элементов позволяет учесть реальные геометрические размеры оболочки коробчатого сечения на стыке пластин и уточнить максимальные напряжения этих мест.
3. Показано, что для рассмотренного интервала радиусов от $R=0,1\text{мм}$ до $R=8\text{мм}$ на стыке пластин разница в напряжениях составляет от 39% до 76%. Разница в значениях напряжений, полученных с

помощью формулы 1 и методом конечных элементов в программе Ansys является существенной.

4. Результаты проверочных расчётов могут способствовать разработке оптимальной в отношении прочности технологии изготовления оболочек различных форм из УУКМ. **А**

Литература

1. Кувшинов С.В. Концептуальные основания нового российского проекта Digital Education // Образовательные технологии. № 3. - 2013. С. 58-62.
2. Кувшинов С.В. Проблемы внедрения новейших технологий в образовательные процессы школ и вузов // Образование, наука и искусство: цифровые производственные процессы и технологическая поддержка: XIV Международный форум образовательных технологий "Образование, наука и искусство: цифровые производственные процессы и технологическая поддержка". РГТУ, МГТУ "СТАНКИН", 19-20 июня 2013 года. Сборник тезисов. - МО: Щёлково. С. 21-25.
3. Карбанов В.Н. Виртуальные студии // 625PlusHD. № 1 (195). -2014. С. 18-21.
4. Чаррука М. EasySet 3D/eStudio-Brainstorm // 625PlusHD. №1 (195). - 2014. С. 22.
5. Кувшинов С.В., Харин К.В. Центры технологической поддержки образования на порта-

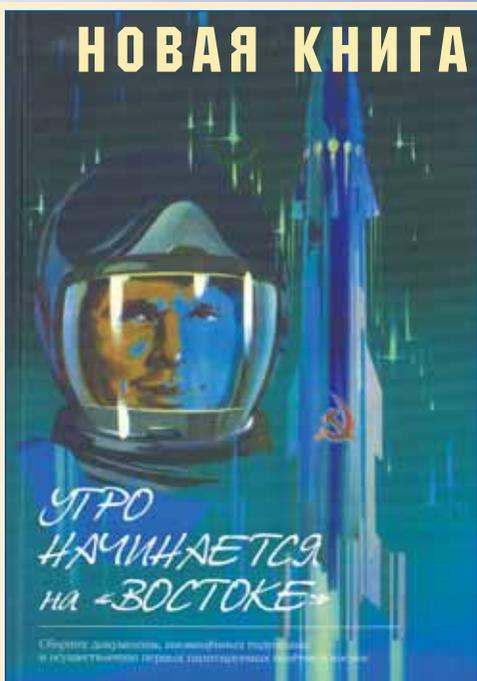
ле массовых открытых онлайн-курсов "Универсарииум": первые итоги и перспективы // Техническое творчество молодёжи. № 6 (94), 2015. С. 15-18.

6. Кувшинов С.В., Харин К.В. Образование XXI века: от трёхмерного восприятия к трёхмерному мышлению // Мир техники кино. №2016-2 (10). С. 15-21.
7. Прянничников В.Е., Ксензенко А.Я., Кувшинов С.В. и др. Разработка сети роботариумов и мобильных роботов для инновационного обучения интеллектуальной робототронике. М.: ИПМ им. Келдыша, 2016.
8. Andreev V., Karbanov V., Kharin K., Kuvshinov S., Poduraev Y., Pryanichnikov V. Training Situation Center Based on Three-Dimensional Virtual Studio for Distributed Mobile Robotics Laboratory // Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium., B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN: 978-1- 5108-1839-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. 2015. Curran Proceedings, New York, 2016. - pp. 0483-0487
9. Карбанов В.Н., Технологии 3D Виртуальных Студий, Мир Техники Кино 2017 2(11) С 3-7
10. Карбанов В.Н., Кувшинов С.В., Харин К.В. Распределённая виртуальная студия трёхмерной визуализации для сетевой структуры образовательных организаций, Мир Техники Кино 2017 2(11) С 13-17

Связь с автором yariksp@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ

НОВАЯ КНИГА ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО МУЗЕЯ



дей рассказывают о том, "как это было на самом деле". Все это позволяет нам перенестись в атмосферу 60-х годов прошлого века - "золотых" лет советской науки и космонавтики.

Почти пятьдесят лет эти документы хранились в режиме секретности в архиве РКК "Энергия", пока не были рассекречены в 2010 году. В основу сборника легли документы ОКБ-1 и завода №88 о работе по созданию космического корабля "Восток", подготовке и осуществлению первых пилотируемых полетов.

Книга иллюстрирована плакатами, открытками, газетами, посвящёнными полётам кораблей серии "Восток": все они собраны в три цветные вкладки. Кроме того, более 100 уникальных чёрно-белых снимков (почти все из личных архивов) размещено в тексте книги. **А**

Книгу можно приобрести налоговым платёжом через Почту России. E-mail: amnit2015@bk.ru



С.П. Королев
Фото Игоря Снегирева Архив Г.С. Ветрова

В свет вышел сборник воспоминаний о подготовке полета Юрия Гагарина и других первых пилотируемых полётов в космос. Эта уникальная книга авторов-составителей Л.П. Вершининой и Е.К. Бабичева, изданная Ассоциацией содействия развитию научно-технических музеев "АМНИТ", содержит личные свидетельства участников тех событий, подготовленные в 1961-1962 годах по секретному приказу С.П. Королева № 26 от 30 июля 1961 г. С самого начала задумывалось, что собранные воспоминания должны были донести до следующих поколений подробную картину уникального исторического события, написанную разными людьми, используя всю палитру человеческих чувств, знаний и практического опыта участников работ. Для нас, их потомков, очень важно то, что личные свидетельства этих лю-

Первые лётчики-космонавты СССР из "Группы ВВС №1" - отряда космонавтов, сформированного в феврале-апреле 1960 г.

