

УДК 621.452.225

## **Исследование особенностей напряженного состояния канала коробчатой формы прямогочного двигателя**

**Хомовский Я.Н.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: yariksp@mail.ru*

### **Аннотация**

В прямогочных гиперзвуковых двигателях поперечное сечение газоздушного канала может изменяться от прямоугольной формы до цилиндрической. Особое внимание было уделено определению напряжения в углах коробчатого сечения. Проведены расчёты концентрации напряжения в зависимости от изменяющегося внутреннего радиуса. На основании полученных результатов предложены рекомендации по раздельному рассмотрению влияния градиентов температур и силовых факторов.

**Ключевые слова:** камера сгорания, концентрация напряжения.

### **Введение**

В гиперзвуковых прямогочных воздушно-реактивных двигателях подфюзеляжного типа конструктивные формы воздухозаборных устройств (ВЗУ), переходных участков (так называемых изоляторов), по которым воздух подводится

к камере сгорания, и самих камер сгорания (КС) представляют собой тонкостенные каналы прямоугольного или круглого поперечного сечения [1].

Проточный тракт двигателя американской гиперзвуковой ракеты Х-51 и, в частности, его изолятор представляет собой последовательную комбинацию каналов именно такой формы (рис. 1).

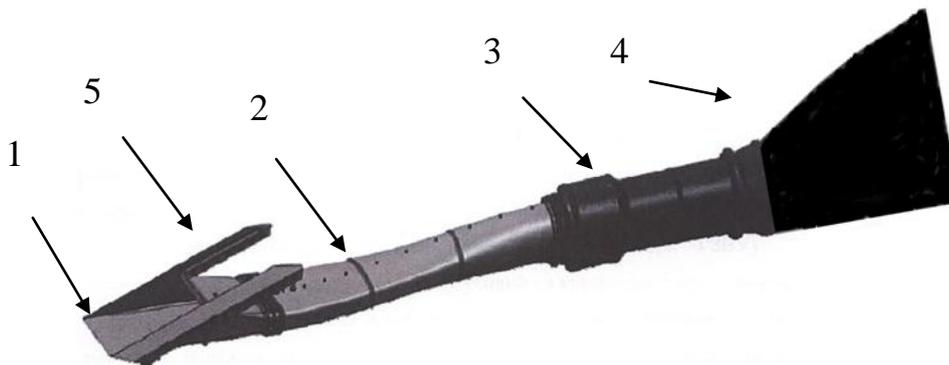


Рисунок 1. Общий вид проточного тракта ракеты Х-51 с изолятором переменного по форме сечения: 1 – ВЗУ; 2 – трехсекционный изолятор; 3 – КС; 4 – сопло; 5 – крепление к летательному аппарату

В некоторых случаях каналы прямоугольного сечения подкрепляются промежуточными стенками (рис.2).

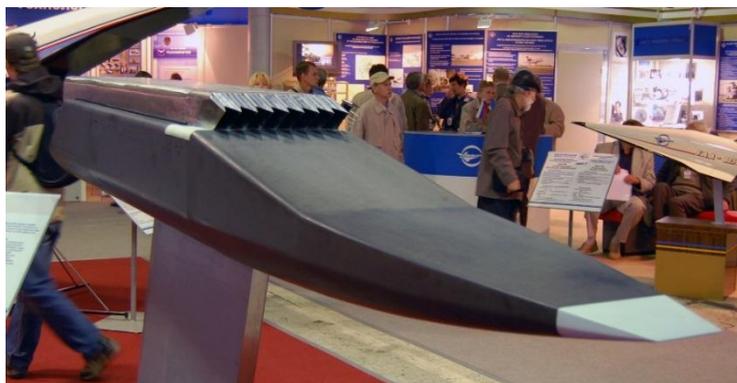


Рисунок 2. Гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель летающей лаборатории ГЛЛ-АП (макет) на МАКС-2009

Тонкостенные конструктивные элементы коробчатой, овальной и цилиндрической формы, из которых состоят секции изолятора, в основном подвержены воздействию перепадов давления и градиентов температур [2].

Напряжённое состояние таких элементов имеет свои особенности и в технической литературе сведений о нём недостаточно. В первую очередь это относится к внутренним углам. Можно полагать, что в этих местах имеет место существенная концентрация напряжений и исследованию этого вопроса по отношению к элементам конструкции из углерод-углеродных материалов посвящена данная статья. В известных источниках этой актуальной проблеме уделялось недостаточно внимания [3-5, 6-9], но она требует решения.

### Постановка задачи

Вместо реального изолятора рассмотрим напряженное состояние канала коробчатой формы на примере шести его сечений (рис. 3) с одинаковой проходной площадью.

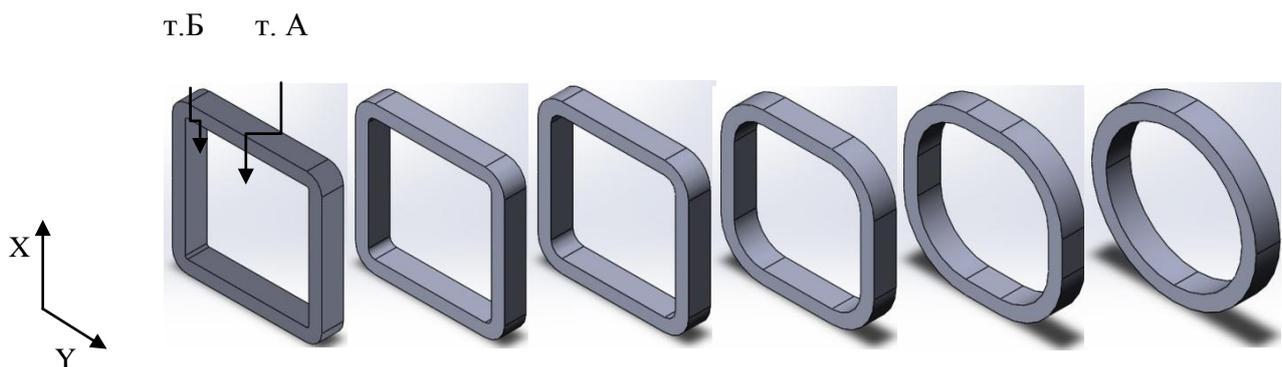


Рисунок 3. Виды расчётных моделей

Для определения характера нагружения моделей сначала были выполнены расчёты цилиндрической оболочки, нагруженной по радиусу градиентом температур. Рассматривались два варианта: температура внутренней поверхности

выше температуры наружной (рис. 4а) и наоборот (рис. 4б). В первом случае присутствуют сжимающие радиальные напряжения. Стоит заметить, что на участках, близких к торцам происходит изгиб оболочки, а дальнейший участок подвержен только сжатию. Сжатие происходит в сторону наибольшей температуры, что подтверждается вторым расчётом (рис. 3б). Соответственно имеем дело с плоско-напряжённым состоянием.

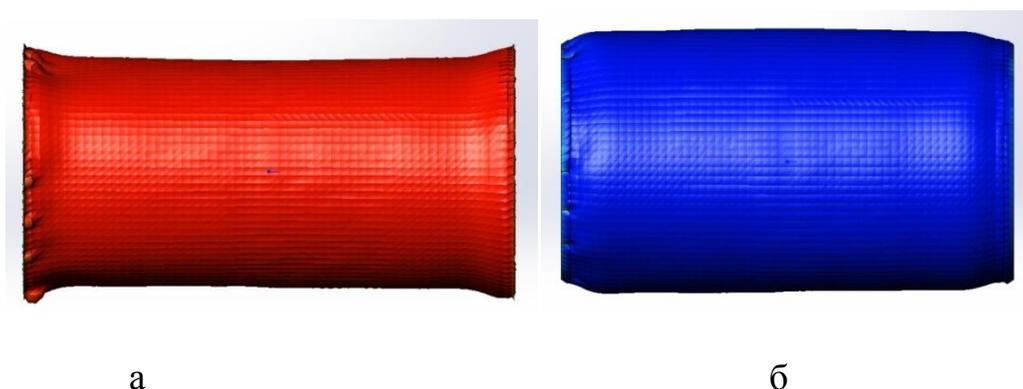


Рисунок 4. Цилиндрические оболочки, нагруженные градиентом температур

В расчеты на прочность были заложены свойства оптически активного материала ЭД-6М, т.к. в дальнейшем планируется проведение экспериментов на поляризационно-проеционной установке ППУ-7 [10] на моделях, выполненных из этого материала [11-13].

Для всех шести моделей были заданы идентичные условия нагружения: перепад температур  $\Delta t = 50^\circ\text{C}$  (повышенная температура внутри моделей) и перепад давлений  $\Delta p = 10^5$  Па на внутреннюю стенку при наружном давлении, равном нулю. Свойства оптически активного материала ЭД-6М при комнатной температуре были приняты следующими: модуль Юнга  $E = 4.5 \cdot 10^9$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,29$ .

Расчеты выполнялись отдельно для случаев нагружения градиентом температур, перепадом давлений и этими нагрузками совместно. Для каждой из моделей рассматривалось влияние радиуса R (при значениях R = 1; 3; 5; 13; 21; 28,5 мм) во внутренних углах моделей на коэффициент концентрации напряжения. Величина последнего определялась как отношение напряжения в точке А по отношению к напряжению в точке Б (рис. 3).

Результаты определения напряжений ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) по программе SolidWorks Simulation [14] приведены в таблице 1. По этим данным были подсчитаны коэффициенты концентрации  $K_k$  (отдельно по осям x и y). В графическом виде соответствующие результаты представлены на рис. 5, 6, 7. Размерность напряжений в таблице указана в Па.

Таблица 1

R = 1 мм				
	$\sigma_x$ (т.А)	$\sigma_x$ (т.Б)	$\sigma_y$ (т.А)	$\sigma_y$ (т.Б)
$\Delta t$	$-7 \cdot 10^6$	$-2.5 \cdot 10^6$	$-13 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$9 \cdot 10^6$	$-0.1 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-2 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	$-4,5 \cdot 10^6$	$-13 \cdot 10^6$
R = 3 мм				
	$\sigma_x$ (т.А)	$\sigma_x$ (т.Б)	$\sigma_y$ (т.А)	$\sigma_y$ (т.Б)
$\Delta t$	$-5 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	$-8 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$5,9 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-2,5 \cdot 10^6$	$-2,3 \cdot 10^6$	$-4 \cdot 10^6$	$-12 \cdot 10^6$

R = 5 мм				
	$\sigma_x$ (Т.А)	$\sigma_x$ (Т.Б)	$\sigma_y$ (Т.А)	$\sigma_y$ (Т.Б)
$\Delta t$	$-6 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-7 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$4,2 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-3 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-3,7 \cdot 10^6$	$-12 \cdot 10^6$
R = 13 мм				
	$\sigma_x$ (Т.А)	$\sigma_x$ (Т.Б)	$\sigma_y$ (Т.А)	$\sigma_y$ (Т.Б)
$\Delta t$	$-6 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-6 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$1,8 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	$-1,2 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-4 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-4,5 \cdot 10^6$	$-12 \cdot 10^6$
R = 21 мм				
	$\sigma_x$ (Т.А)	$\sigma_x$ (Т.Б)	$\sigma_y$ (Т.А)	$\sigma_y$ (Т.Б)
$\Delta t$	$-6 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-6 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$0,9 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$0,9 \cdot 10^6$	$-0,6 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-4 \cdot 10^6$	$-1,6 \cdot 10^6$	$-4,5 \cdot 10^6$	$-12 \cdot 10^6$
R = 28,5 мм				
	$\sigma_x$ (Т.А)	$\sigma_x$ (Т.Б)	$\sigma_y$ (Т.А)	$\sigma_y$ (Т.Б)
$\Delta t$	$-6 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^6$	$-6 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$
$\Delta p$	$0,2 \cdot 10^6$	$-0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$
$\Delta t + \Delta p$	$-5 \cdot 10^6$	$-1,6 \cdot 10^6$	$-4 \cdot 10^6$	$-11 \cdot 10^6$

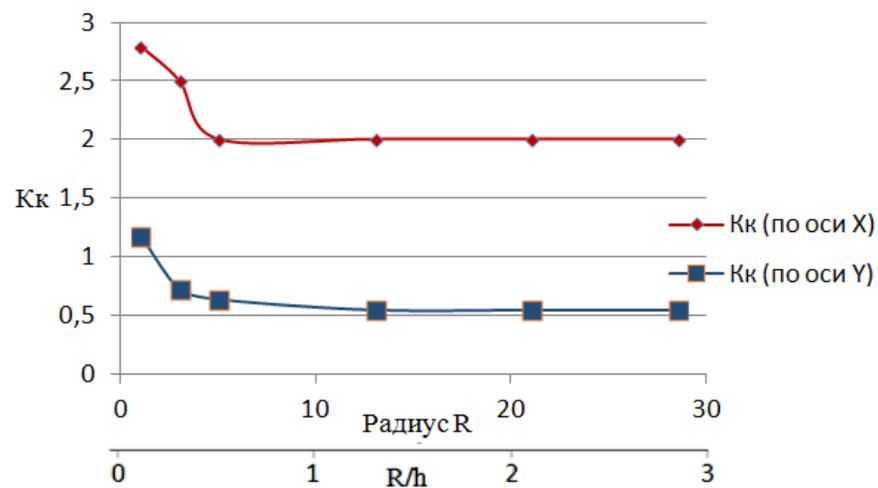


Рисунок 5. Зависимость коэффициентов  $K_k$  от радиуса  $R$  и соотношения  $R/h$  при нагружении градиентом температур ( $h$  – толщина оболочки)

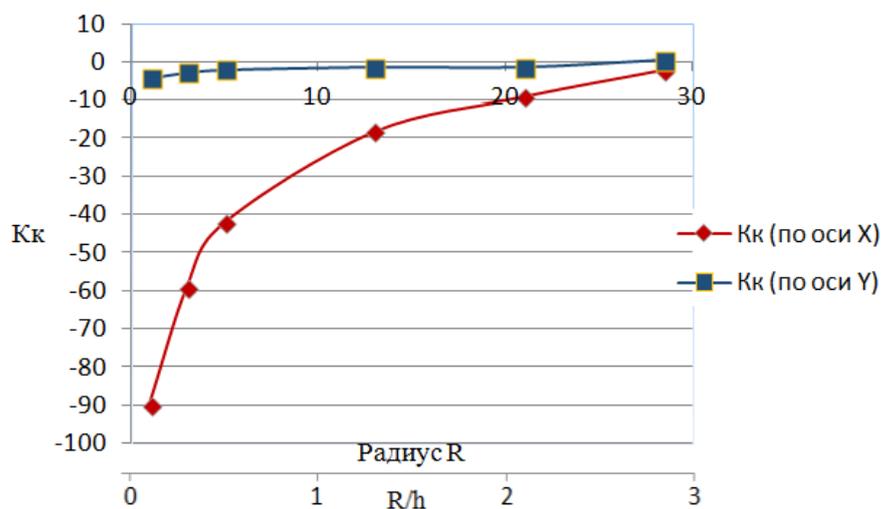


Рисунок 6. Зависимость коэффициентов  $K_k$  от радиуса  $R$  и соотношения  $R/h$  при нагружении перепадом давлений ( $h$  – толщина оболочки)

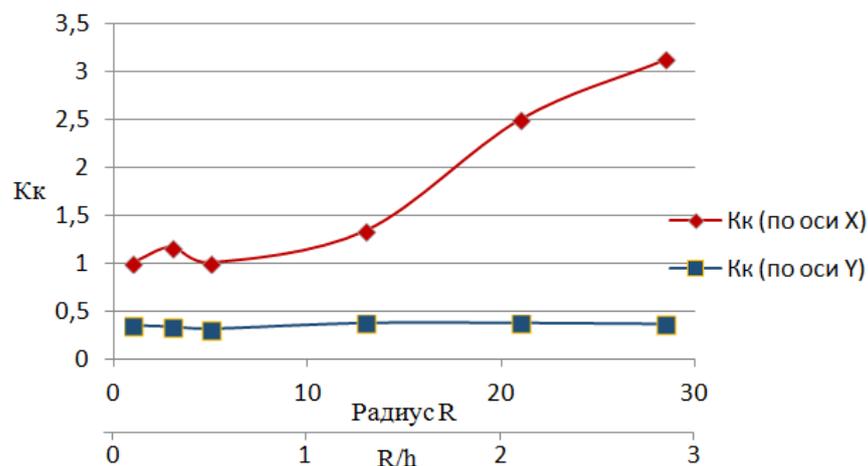


Рисунок 7. Зависимость коэффициентов  $K_k$  от радиуса  $R$  и соотношения  $R/h$  при нагружении градиентом температур и перепадом давлений ( $h$  – толщина оболочки)

### Выводы

Анализируя таблицу 1 и графики (рис. 5–7), можно сделать выводы, что напряжения в углах моделей, возникающие от воздействия давления, очень чувствительны к внутреннему радиусу (в отличие от температурных напряжений). Это может говорить о целесообразности отдельного рассмотрения этих факторов при расчётах напряжённо-деформированного состояния. Раздельная оценка коэффициентов концентрации напряжений по осям  $x$  и  $y$  может быть полезной при оценке прочности оболочек из углерод-углеродных композитных материалов со структурой из волокон.

Методика расчета на прочность сосудов коробчатого сечения, нагруженных давлением, приведена в книге [15], но без учета концентрации напряжений во внутренних углах и величин радиусов сопряжения в них. Численный эксперимент, выполненный путем применения метода конечных элементов, позволил

непосредственным образом получить значения коэффициентов концентрации напряжений для случаев нагружения моделей градиентами температуры и перепадом давлений. При таком подходе можно обойтись без объективно затруднительной, а иногда просто невыполнимой процедуры подбора нужных коэффициентов концентрации напряжений в соответствующей справочной литературе [16].

### Библиографический список

1. Бауржанулы И. Приближенный расчет сверхзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя // XLVII Международная научно-практическая конференция «Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ». (Новосибирск, 28 ноября 2016): Сборник статей. - Новосибирск: 2016, № 10(46). URL: [https://sibac.info/archive/technic/10\(46\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/10(46).pdf)
2. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А. Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 317 с.
3. Притыкин А.И., Мисник А.В. Распределение и концентрация напряжений в балках с синусоидальной перфорацией стенки // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 876 - 884.
4. Виноградов Ю.И., Гусев Ю.А., Золотухин В.С. Методы исследования концентрации напряжений в оболочках // Вестник Московского авиационного института. 2005. Т. 12. № 3. С. 61 - 65.

5. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Напряженное состояние композиционной панели в зоне отверстия // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36558>
6. Фриштер Л.Ю. Анализ методов исследования локального напряженно-деформированного состояния конструкций в зонах концентрации напряжений // Вестник МГСУ. 2008. № 3. С. 38 - 44.
7. Williams M.L. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension // Journal Applied Mechanics, 1952, vol. 19, no. 4, pp. 526 - 528.
8. Durif S., Bouchair A. Behaviour of cellular beams with sinusoidal openings // Steel Structures and Bridges, 2012, vol. 40, pp. 108 - 112.
9. Helsing J., Jonsson A. On the computation of stress fields on polygonal domains with V-notches // International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, no. 53, pp. 433 - 453.
10. Демидов А.С. Метод фотоупругости и его применение в лабораториях МАИ // Двигатель. 2018. № 3 (117). С. 10 – 11.
11. Албаут Г.Н., Харинова Н.В. Поляризационно-оптический анализ геометрически нелинейных задач концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 11-12 (575-576). С. 79 - 84.
12. Албаут Г.Н., Табанюхова М.В. Модельное определение концентрации напряжений в элементах строительных конструкций с угловыми вырезами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 10 (574). С. 107 - 112.

13. Албаут Г.Н., Барышников В.Н., Пангаев В.В., Табанюхова М.В., Харинова Н.В. Определение коэффициентов концентрации напряжений в нестандартных задачах поляризационно-оптическими методами // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 6. С. 91 - 95.
14. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
15. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении.– М.: МАШГИЗ, 1958. Т. 2. – 974 с.
16. Савин Г.Н., Тульчий В.И. Справочник по концентрации напряжений. – Киев: Вища школа, 1976. – 410 с.