

03, март 2016

УДК 629.7.036.54

Расчет напряженно-деформированного состояния заряда РДТТ методом конечного элемента

Зарипов Д.Х., специалист

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные и импульсные системы»*

*Научный руководитель: Баслык К.П., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

кафедра «Космические аппараты и ракеты-носители»

damirzarip@student.bmstu.ru

Введение

С момента изготовления до полного выгорания в полете твердотопливный заряд испытывает воздействие внешних факторов (изменения температуры, вибраций, внутрикамерного давления, инерционных нагрузок), вызывающих в заряде напряжения.

В техническом задании на разработку РДТТ особо оговариваются некоторые виды нагрузок, от воздействия которых должна быть проверена прочность двигателя (в том числе заряда, корпуса и других элементов) не только расчетами, но и экспериментально. Среди рассматриваемых расчетных задач особое место занимают случай нагружения двигателя внутренним давлением в момент запуска, а также изменение температурного режима при его изготовлении и эксплуатации [1].

В большинстве современных ракет, используются топливные заряды с внутренним каналом (чаще всего не тривиальной формы), что позволяет достигнуть более высоких значений тяги, а также получить закон изменения площади горения, близкий к постоянной величине. Форма внутреннего канала (примеры поперечных сечений зарядов представлены на рис. 1, примеры взяты из работы [6]) оказывает существенное влияние на величину напряжений, возникающих в заряде при эксплуатации. Но при этом сложная форма канала существенно сужает возможности аналитического расчета. Поэтому в большинстве случаев приходится использовать численные методы для оценки прочности заряда.

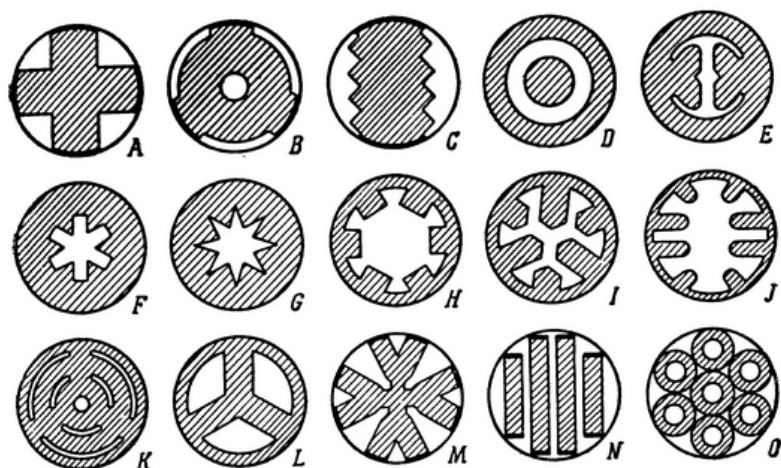


Рис. 1. Формы топливных зарядов РДТТ

Целью данной работы является исследование применимости метода конечных элементов, а именно программного комплекса «Nastran» для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) заряда РДТТ. Для того, чтобы оценить возможность применения данного комплекса, необходимо сравнить результаты его расчета с тестовыми задачами, решение которых уже получено и проверено с помощью испытаний.

Обычно задача расчета заряда на прочность решается в следующей постановке: заряд рассматривают как толстостенную трубу, заключенную в упругую обечайку. Топливный заряд представляют как линейно-упругое тело, выполненное из изотропного материала. Также при аналитическом решении подобных задач, часто пренебрегают концевыми эффектами, что позволяет применять решение задачи обобщенной плоской деформации (осевые деформации принимаются постоянными). Данный подход к решению задачи изложен в работе [2].

Постановка задачи

Методика решения задачи определения НДС заряда твердого топлива аналитическими методами приводится в работах [1] и [2].

В данной работе проведено сравнение результатов расчета численным (МКЭ) и аналитическим [1] способами для случая термосилового нагружения заряда.

Размеры заряда (рис. 2) соответствуют современным зенитным ракетам большого радиуса действия [4].

В качестве материала обечайки взят алюминиевый сплав В95. Характеристики материала обечайки [5] приведены в таблице 1, а характеристики смесового топлива [3] - в таблице 2.

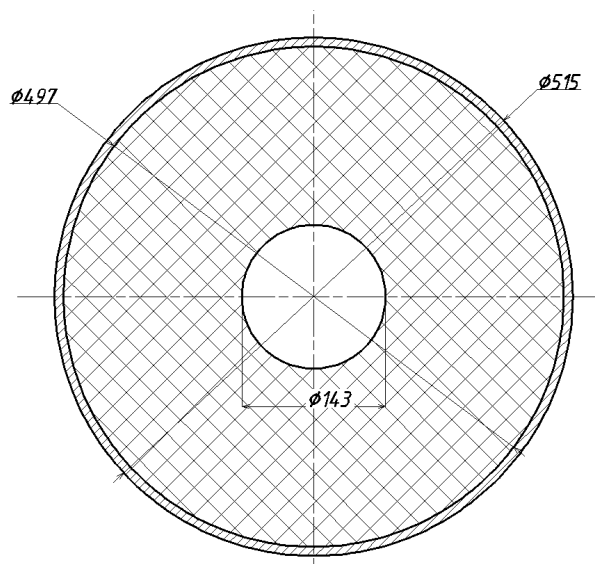


Рис. 2. Геометрия заряда

Таблица 1

Механические характеристики материала обечайки

Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Температурный коэффициент расширения, 1/К	Временное сопротивление при растяжении, Па	Временное сопротивление при сжатии, Па
$68 \cdot 10^9$ ⁽¹⁾	0,33 ⁽²⁾	$2,31 \cdot 10^{-5}$ ⁽³⁾	$560 \cdot 10^6$ ⁽⁴⁾	$560 \cdot 10^6$ ⁽⁴⁾

Примечание:

1. Модуль упругости взят средний между модулем на растяжение и сжатие (таблица 128 (стр. 115)).
2. Коэффициент Пуассона взят из таблицы 128 (стр. 115).
3. Коэффициент температурного расширения взят из таблицы 132 (стр. 116) для диапазона температур 20-100 °С.
4. Временное сопротивление на растяжение и сжатие взято из таблицы 127 (стр. 115) для состояния Т2. И на растяжение, и на сжатие, взяты идентичные пределы прочности.

Таблица 2

Механические характеристики топлива

Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Температурный коэффициент расширения, 1/К	Временное сопротивление при растяжении, Па	Временное сопротивление при сжатии, Па	Предельная относительная деформация, %
$15 \cdot 10^6$	0,48	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^6$	$13 \cdot 10^6$	36*

Примечание:

* - Предельная относительная деформация равна: $\varepsilon_{\text{пред}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{E} = \frac{4,5 \cdot 10^6}{15 \cdot 10^6} = 0,3$.

Это консервативный подход к определению предельной деформации (в виду нелинейности диаграммы растяжения), поэтому для дальнейших вычислений примем значение на 20% больше.

Расчет проводился при следующих допущениях:

- Влияние температуры заряда на его механические свойства не учитывается;
- Максимальное давление в камере: 10 МПа.
- Рабочий диапазон температур: от -50 °С до +50 °С.
- Нагрузки постоянны по времени – задача решается в статической постановке.

Поставленную задачу в программном комплексе «Nastran» возможно решить в двух- и трехмерной постановке. Ниже описаны достоинства и недостатки каждого подхода.

1. Двумерная постановка (с использованием 2D элементов):

Преимущества:

- Малое расчетное время.
- Простота построения модели.
- Небольшой объем файлов с результатами.
- Возможность получения более точного результата, за счет существенного сгущения сетки.
- Больше возможностей по контролю за качеством расчетной сетки.

Недостатки:

- Отсутствие возможности анализа области заряда ТРТ вблизи днищ.
- Отсутствие возможности наблюдения распределения напряжений по длине заряда.
- Невозможно оценить осевую составляющую напряжений (вдоль заряда).
- Невозможно моделировать граничные условия на торцах заряда.

2. Трехмерная (с использованием 3D элементов):

Преимущества:

- Позволяет рассчитывать НДС вблизи торцов заряда.
- Позволяет оценить распределение напряжений по длине заряда.
- Позволяет рассчитывать осевые составляющие напряжений и деформаций.
- Дает возможность моделировать граничные условия на торцах заряда.

Недостатки:

- Большое расчетное время.
- Сложность построения модели.
- Сложность работы с большой объемной моделью.
- Большой объем файлов с результатами.
- Ограниченная возможность контроля качества расчетной сетки.
- Даже незначительное сгущение расчетной сетки ведет к колоссальному росту расчетного времени.

Описание последовательности операций при формировании конечно-элементных моделей заряда твердого топлива

Далее приводится краткое описание действий при построении плоской и объемной модели в комплексе «Patran» (в данной работе программный комплекс «Patran» используется в качестве пре- и постпроцессора для решателя «Nastran»).

Поскольку решаемая здесь задача расчета цилиндра является осесимметричной, можно рассмотреть 1/4 его часть, задав на отсеченных плоскостях граничные условия симметрии.

Учет симметрии используется при построении как плоской, так и объемной модели. Это позволяет существенно сократить время анализа и объем файлов с результатами (*.f06 и *.xdb).

Построение плоской модели:

При создании плоской модели использовались Quad 4 элементы, построенные с помощью генератора IsoMesh (с параметром Global Edge Length = 0,001, Рис. 3). Всем элементам были присвоены свойства «2D Solid» с параметрами «Plan Strain» (Revised Formulation). Для связи элементов на границе обечайка-заряд используется функция Equivalence.

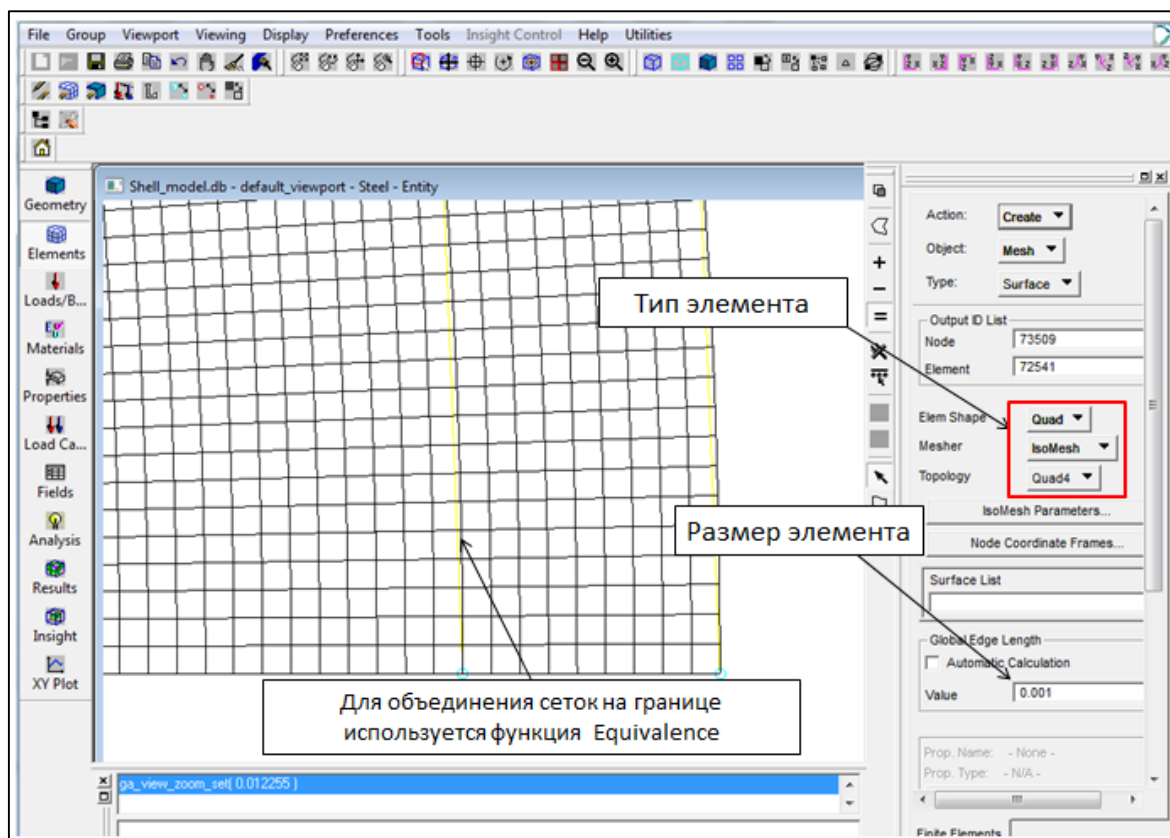


Рис. 3. Описание расчетной сетки для плоской модели

На рис. 4 показаны геометрические граничные условия для 2-D модели. На данном рисунке представлены только граничные условия для расчета напряжений от внутрикамерного давления. Для анализа температурных нагружений используется аналогичные граничные условия, но вместо давления прикладывается температура (отдельно случай на $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Условия симметрии представляют собой закрепление граней от поворота вокруг оси Z (в цилиндрической системе координат). Продольная фиксация модели (по оси Z) не нужна, ввиду использования 2D Solid элементов. Давление прикладывается ко внутренней грани цилиндра, как показано на рис. 4.

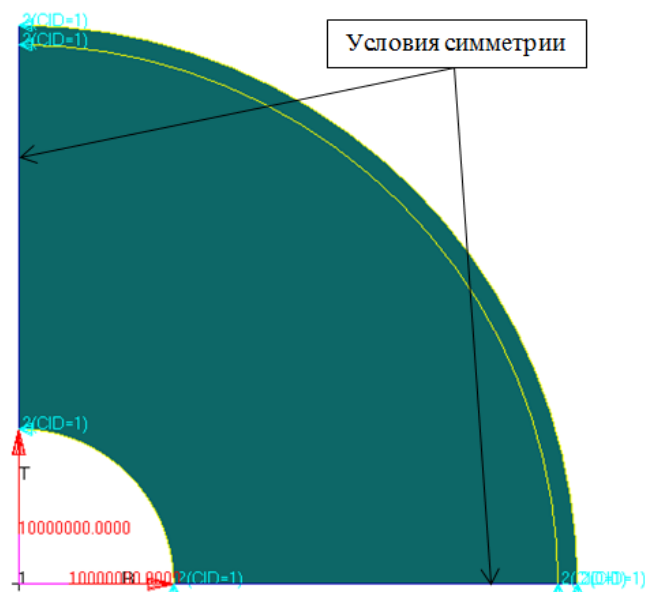


Рис. 4. Граничные условия для плоской модели

Построение объемной модели:

В объемной модели используются Hex 8 элементы, построенные с помощью генератора IsoMesh (с параметром Global Edge Length = 0,005, Рис.5). Всем элементам были присвоены свойства «Solid» с параметрами «Homogeneous» (Standard Formulation). Для связи элементов на границе обечайка-заряд используется функция Equivalence.

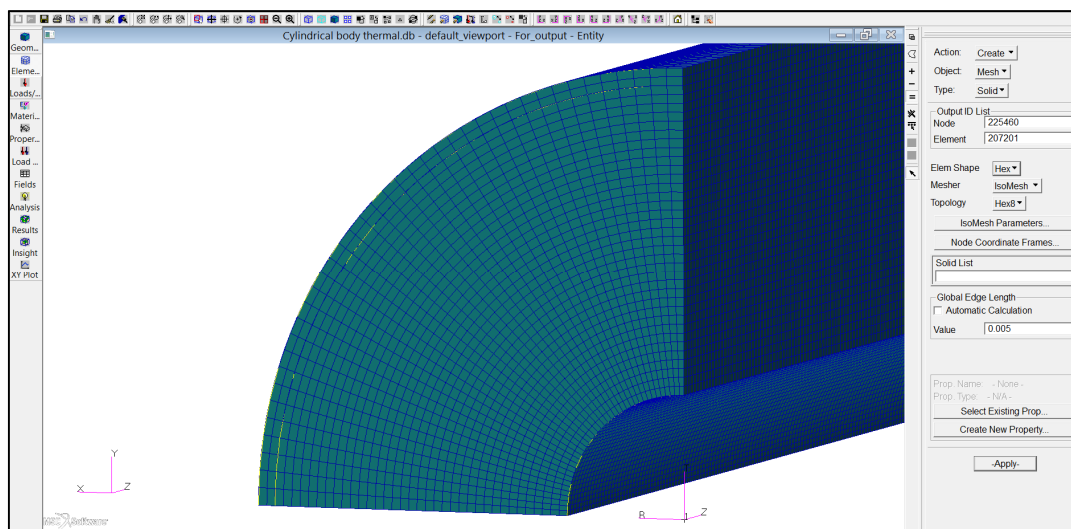


Рис. 5. Расчетная сетка для объемной модели

На рис. 6 показаны геометрические граничные условия для 3-D модели. На данном рисунке представлены только граничные условия для расчета напряжений от внутрикамерного давления. Для анализа температурных нагружений используется

аналогичные граничные условия, но вместо давления прикладывается температура (отдельно случай на +50 °С и -50 °С).

Условия симметрии представляют собой закрепление граней от поворота вокруг оси Z (в цилиндрической системе координат). Давление прикладывается по внутренней поверхности цилиндра, как показано на рис. 6.

Для того, чтобы исключить осевые перемещения, модель закрепляется по торцам. Общая длина модели составляет 0,7 м. Размер модели в осевом направлении выбирается, исходя из минимизации расчетного времени и минимизации влияния напряжений в зоне торцов модели.

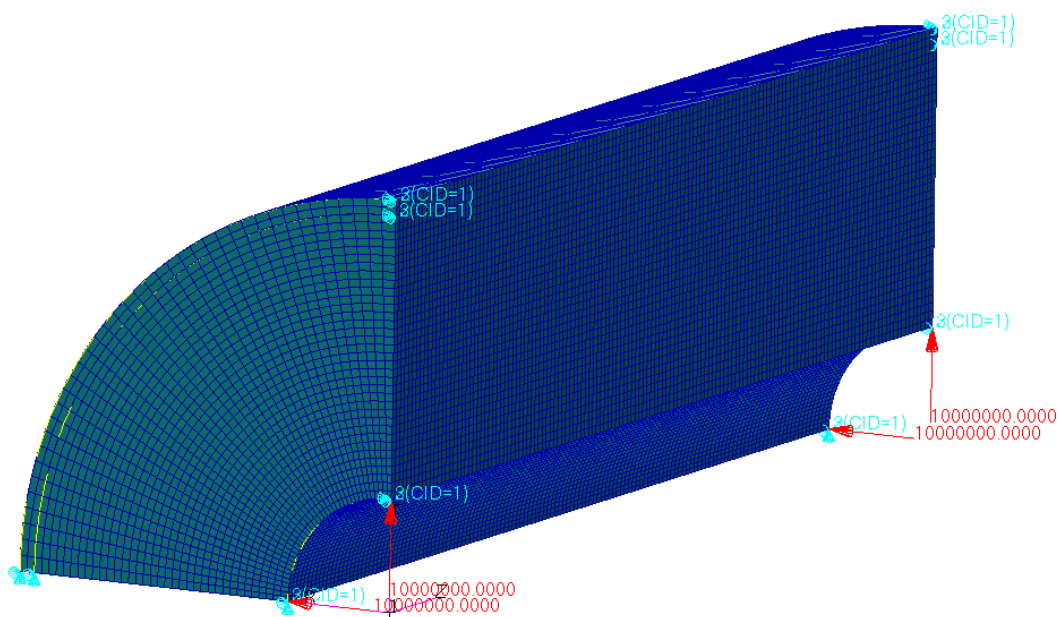


Рис. 6. Граничные условия для объемной модели

Результаты расчетов

Ниже представлены графики напряжений для аналитического и численного решения. Так же приводится сравнение результатов и вычисление погрешности. На всех графиках по оси абсцисс откладывается радиальная координата точки заряда (в метрах), а по оси ординат - напряжение (в Паскалях).

На рис. 7 и 8 представлены напряжения в заряде и обечайке от действия внутреннего давления.

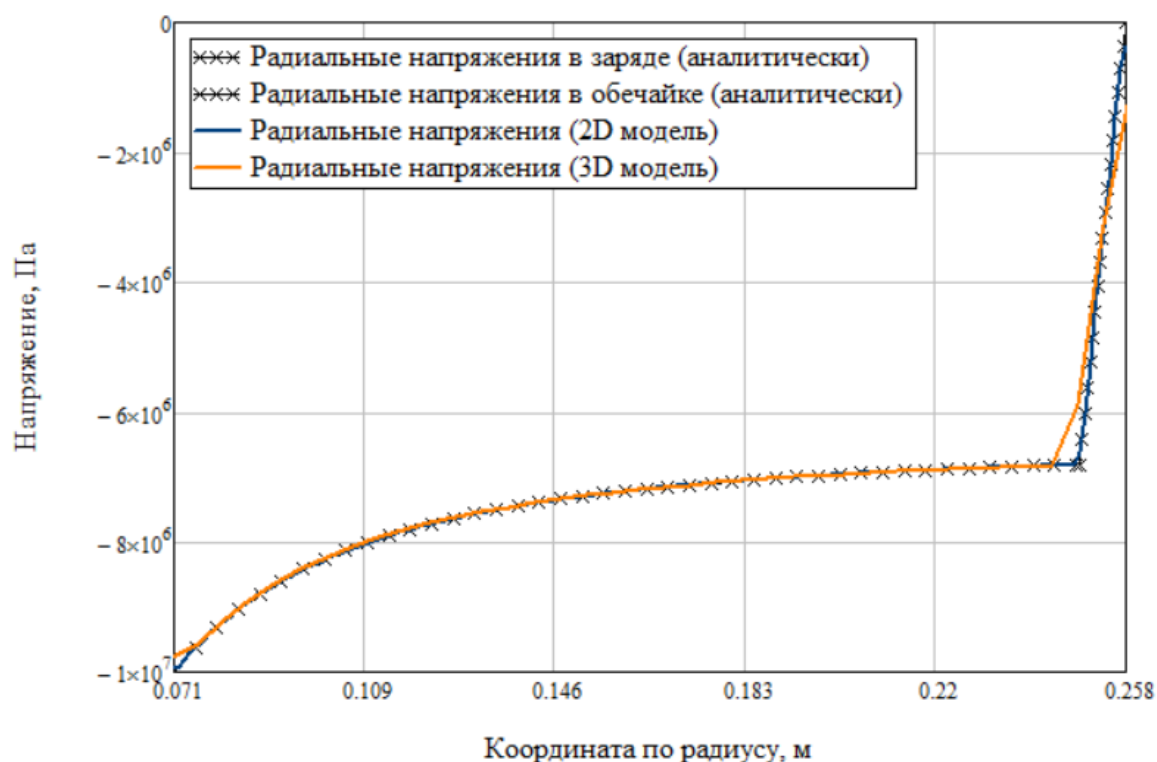


Рис. 7. Радиальные напряжения в заряде и обечайке от действия внутреннего давления

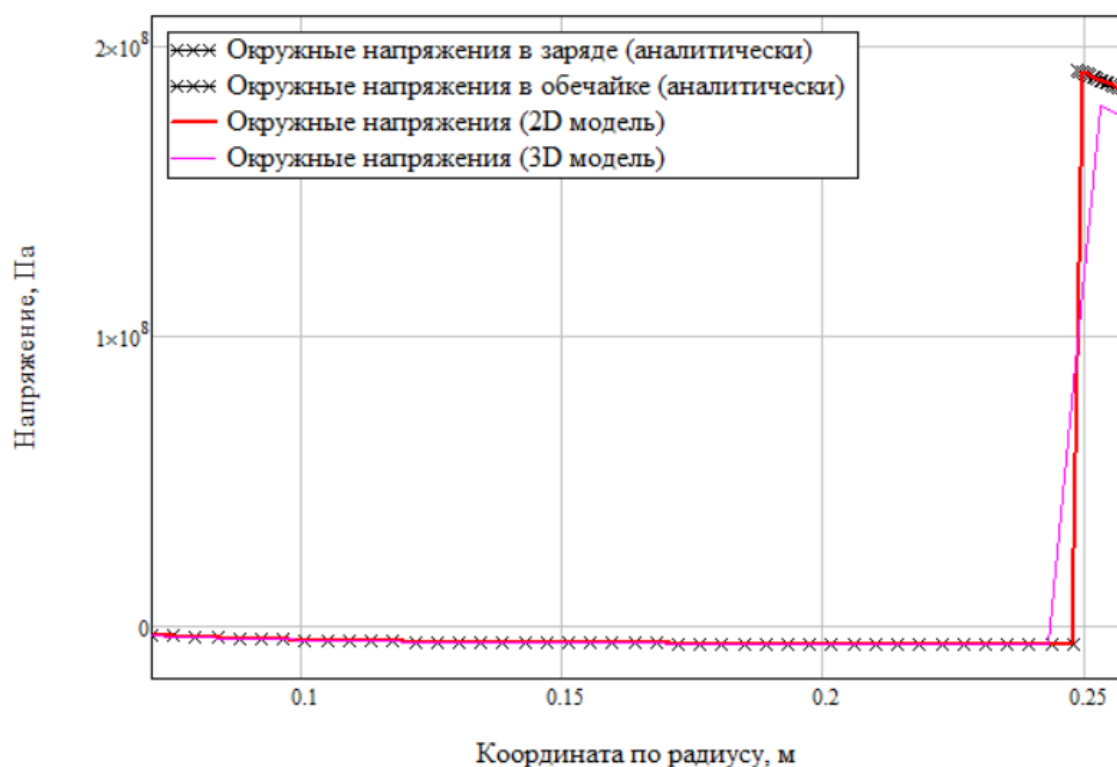


Рис. 8. Окружные напряжения в заряде и обечайке от действия внутреннего давления

На рис. 9 и 10 представлены напряжения в заряде и обечайке при нагреве системы до 50 °С. Отдельно напряжения от охлаждения до -50 °С в данной работе не приводятся.

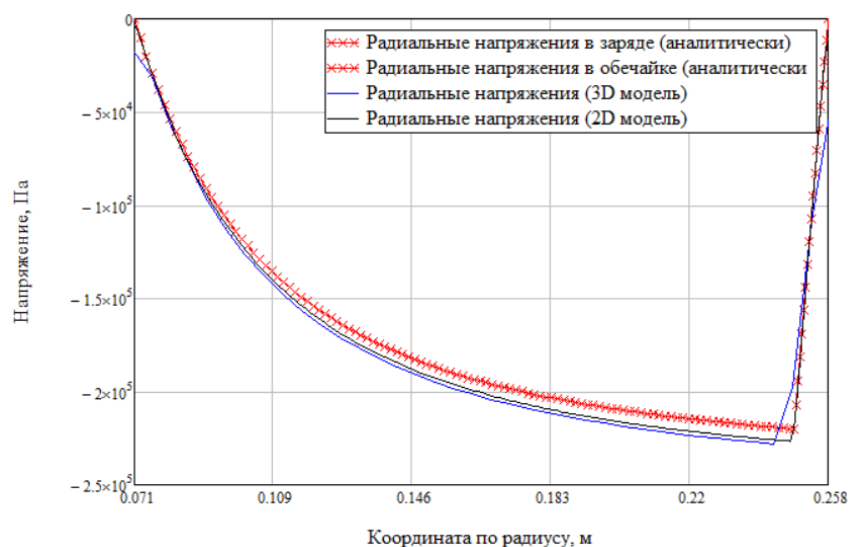


Рис. 9. Радиальные напряжения в заряде и обечайке при действии нагрева

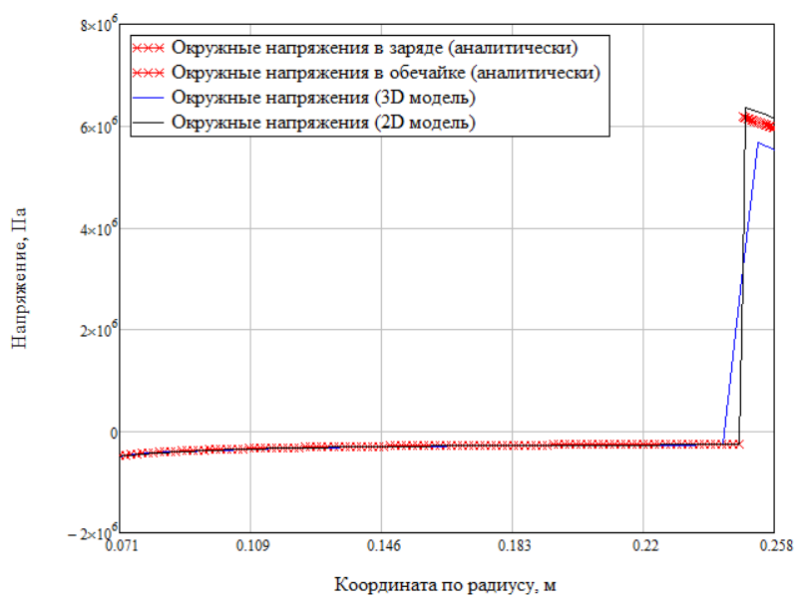


Рис. 10. Окружные напряжения в заряде и обечайке при действии нагрева

Как можно видеть из графиков напряжений (рис. 7 - 10), численный и аналитический расчеты дают идентичную картину распределения радиальных и окружных напряжений. За исключением отклонений результатов на границах модели. Эти отклонения связаны с размером элементов. При измельчении расчетной сетки эти отклонения будут уменьшаться.

В таблице 3 представлены результаты аналитического расчета для наиболее характерных точек заряда и обечайки. В таблицах 4 и 5 представлены результаты численных расчетов для плоской и пространственной модели, а так же приведены погрешности вычислений по отношению к аналитическому решению.

Таблица 3

Результаты аналитического решения

Тип нагружения	a		b		c	
	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	σ_r , МПа	σ_θ , МПа
Давление	-10	-3,05	-6,81	-6,24	0	184,70
Температура +50	0	-0,48	-0,22	-0,26	0	5,97
Температура -50	0	1,12	0,51	0,61	0	-13,92

Примечание: a = 0,071 м, b = 0,248 м, c = 0,258 м - границы заряда и обечайки.

Таблица 4

Результаты численного решения для 2D модели

Тип нагружения	a			b			c		
	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %
Давление	-9,95	-3,01	0,5	-6,82	-6,24	0,1	-0,36	184,60	0,1
Температура +50	$-3,34 \cdot 10^{-3}$	-0,50	4,2	-0,23	-0,27	4,5	-0,01	6,15	3,0
Температура -50	$8,04 \cdot 10^{-3}$	1,16	3,6	0,53	0,63	3,9	0,03	-14,34	3,0

Примечание: a = 0,071 м, b = 0,248 м, c = 0,258 м - границы заряда и обечайки.

Таблица 5

Результаты численного решения для 3D модели

Тип нагружения	a			b			c		
	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %	σ_r , МПа	σ_θ , МПа	δ , %
Давление	-9,76	-2,86	6,2	-6,82	-6,23	0,2	-1,25	174,70	5,4
Температура +50	-0,02	-0,51	6,3	-0,23	-0,27	4,5	-0,05	5,53	7,4
Температура -50	0,04	1,20	7,1	0,53	0,63	3,9	0,12	-12,9	7,3

Примечание: a = 0,071 м, b = 0,248 м, c = 0,258 м - границы заряда и обечайки.

В результате численного расчета, радиальные напряжения на свободных поверхностях получились отличными от нуля. Этот эффект связан с экстраполяцией напряжений из точек интегрирования в крайние узлы.

Как можно видеть из таблиц 4 и 5, погрешности численного расчета в программном комплексе «Nastran» не превышают 8 %, что позволяет использовать его для оценки напряженно-деформированного состояния топливных зарядов РДТТ.

Особенности расчета заряда твердого топлива со звездообразным каналом

Далее будет представлен пример расчета заряда со звездообразным каналом. В качестве нагрузочного случая применяется внутрикамерное давление, равное 10 МПа (порядка 100 атмосфер). Для современных ракет максимальное давление в камере при запуске, обычно превышает значение 10 МПа, однако, для расчета работоспособности заряда при запуске необходимо учитывать зависимость механических свойств топлива, от скорости нагружения. Эксперименты показывают, что при нагружении заряда за короткое время (порядка 0,1 с), деформационные характеристики заряда повышаются на 30...100 %, а прочностные характеристики – в несколько раз [8].

В данной работе, используется статическое нагружение заряда давлением, поэтому зависимостью механических характеристик от скорости нагружения пренебрегаем.

Как видно из таблицы 4 и 5, плоская расчетная модель дает более точные результаты, в отличие от объемной. К тому же в данной статье не ставится задача об исследовании напряжений вблизи торцов заряда, поэтому в дальнейших расчетах будет использоваться плоская конечно-элементная модель.

Для того чтобы утверждать, что топливный заряд удовлетворяет условиям прочности, необходимо ввести критерии разрушения. То есть такие величины, при превышении которых, можно было бы сделать вывод, что данная конфигурация заряда непригодна для эксплуатации в заданных условиях нагружения.

В данной статье применяются критерии разрушения, описанные в работе [7]:

1. Разрушение материала заряда наступает при достижении интенсивности деформации ϵ_i предельного значения $\epsilon_{пред}$ в каком-либо месте заряда (за предельную деформацию принимается максимально допустимая деформация на растяжение, для материала заряда).

2. Определяющее значение на прочность топливного заряда оказывают окружающие напряжения σ_θ . При достижении σ_θ предельного значения для данного материала, заряд разрушается.

Формула для определения интенсивности деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} \cdot (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)},$$

μ – коэффициент Пуассона для материала топлива.

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – линейные деформации в заряде (в критическом месте).

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – угловые деформации в заряде (в критическом месте).

Геометрия топливного заряда представлена на рис. 11. Необходимо сразу же отметить параметры, оказывающие наибольшее влияние на величины ε_i и σ_θ :

- толщина горящего свода e_1 .
- радиус скругления в вершинах лучей R_{filet} .
- угол раствора и число лучей звезды.
- коэффициент Пуассона μ .

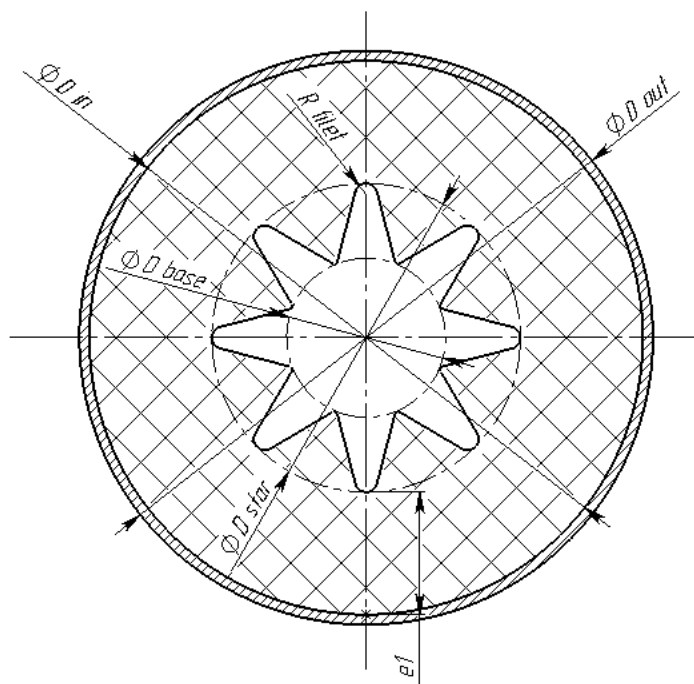


Рис. 11. Геометрия заряда со звездообразным каналом

Размеры заряда и обечайки:

$D_{\text{base}} = 0,1428$ м - Диаметр оснований звезды.

$D_{\text{in}} = 0,497$ м - Внутренний диаметр обечайки.

$D_{\text{out}} = 0,515$ м - Внешний диаметр обечайки.

$e_1 = 0,11$ м - Толщина горящего свода.

$R_{\text{filet}} = 0,01$ м - Радиус скругления в вершинах лучей.

Поскольку при анализе заряда со звездообразным каналом необходимо учитывать концентраторы напряжений в вершинах звезды, то при построении конечно элементной модели, использовалось более мелкое разбиение, чем при верификации (параметр Global Edge Length = 0,00075).

Ниже представлено распределение окружных напряжений в заряде от давления в 10 МПа (Рис. 12). Так же показан тензор напряжений (Рис. 13 и Рис. 14) в критических узлах (критические узлы указаны на рис. 12).

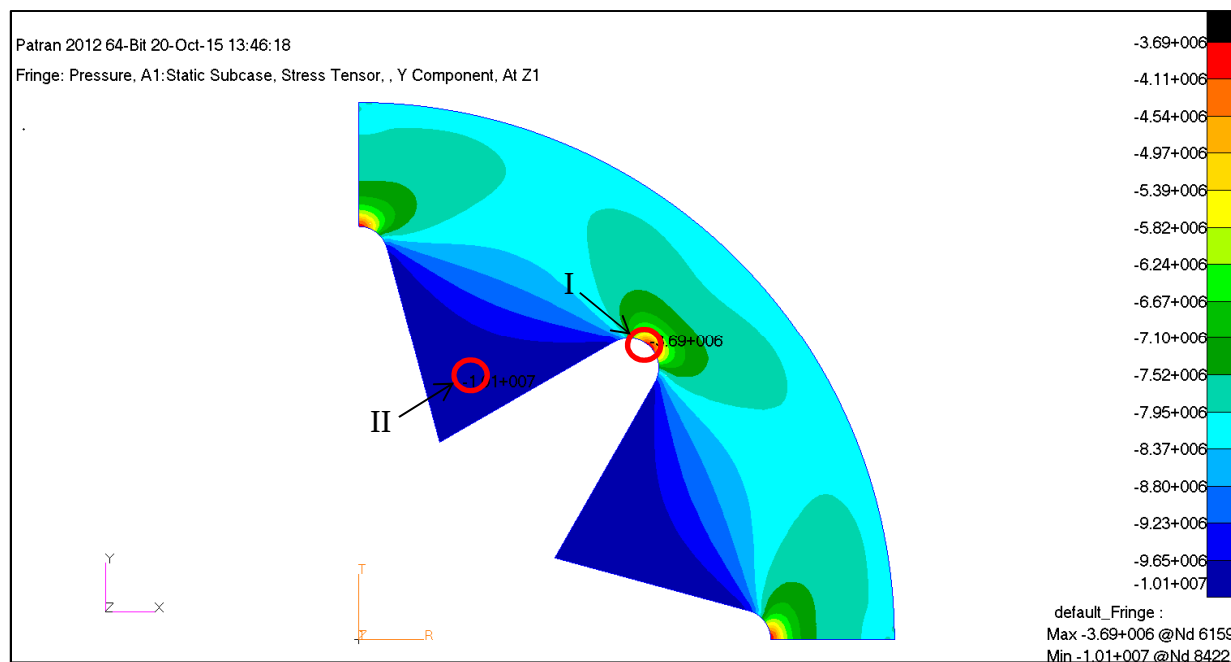


Рис. 12. Окружные напряжения в заряде

Примечание:

Результаты расчета отображаются только для заряда, чтобы более наглядно представить распределение напряжений.

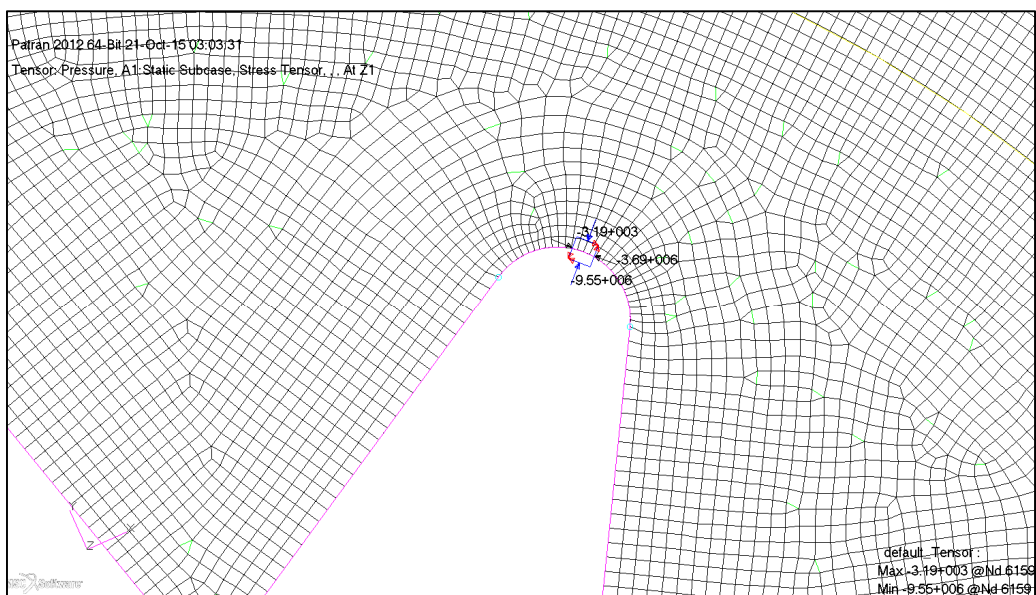


Рис. 13. Тензор напряжений в точке I (Node 6159)

Примечание:

Окружные напряжения $\sigma_\theta = -3,69 \cdot 10^6$ Па.

Радиальные напряжения $\sigma_r = -9,55 \cdot 10^6$ Па.

Касательные напряжения $\tau_{r\theta} = -3,19 \cdot 10^3$ Па.

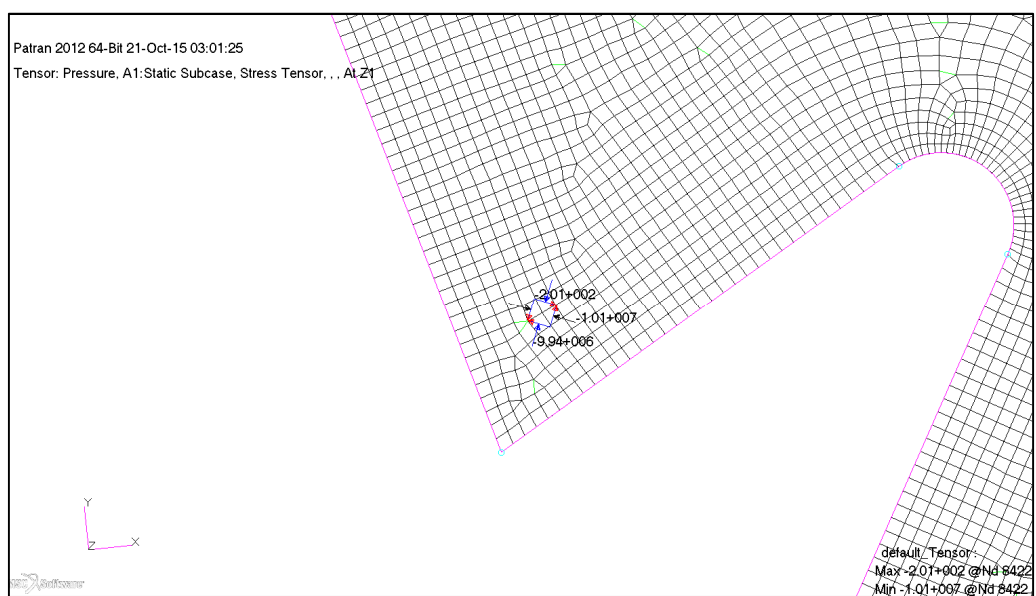


Рис. 14. Тензор напряжений в точке II (Node 8422)

Примечание:

Окружные напряжения $\sigma_\theta = -1,01 \cdot 10^7$ Па.

Радиальные напряжения $\sigma_r = -9,94 \cdot 10^6$ Па.

Касательные напряжения $\tau_{r\theta} = -201$ Па.

Запас прочности по напряжениям:

$$n_{\sigma} = \left| \frac{\sigma_{сж_пред}}{\sigma_{\theta_max}} \right| = \left| \frac{1,3 \cdot 10^7}{-1,01 \cdot 10^7} \right| = 1,29.$$

Предельное значение напряжения ($\sigma_{сж_пред}$) взято из таблицы 2.

Ниже показано распределение интенсивности деформаций (Strain Tensor) по заряду (Рис. 15). Как видно из этого распределения, наиболее критическая точка находится в вершине звезды (Node 6159). На рис. 16 показан тензор деформаций для этой точки.

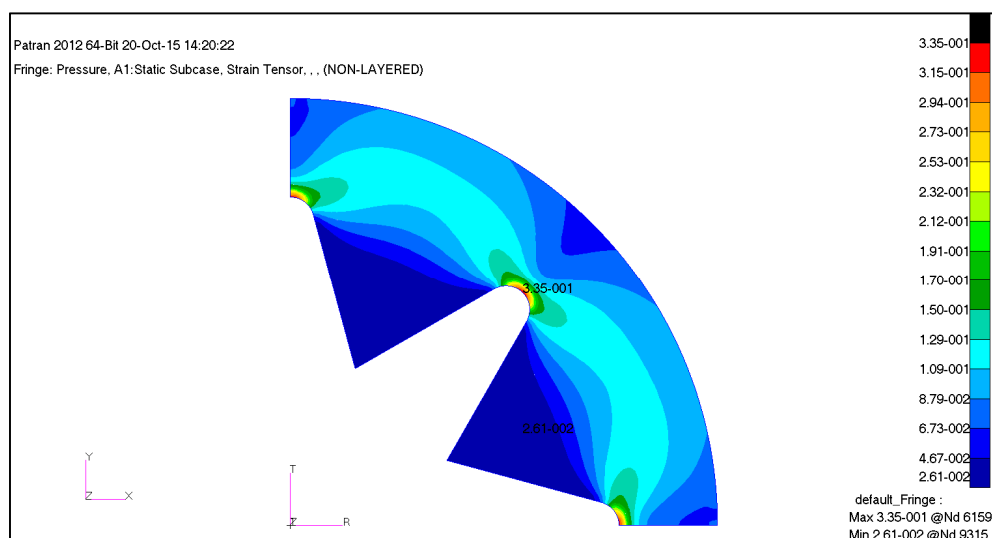


Рис. 15. Интенсивность деформаций в заряде

Примечание:

Результаты расчета отображаются только для заряда, что бы более наглядно представить распределение деформаций.

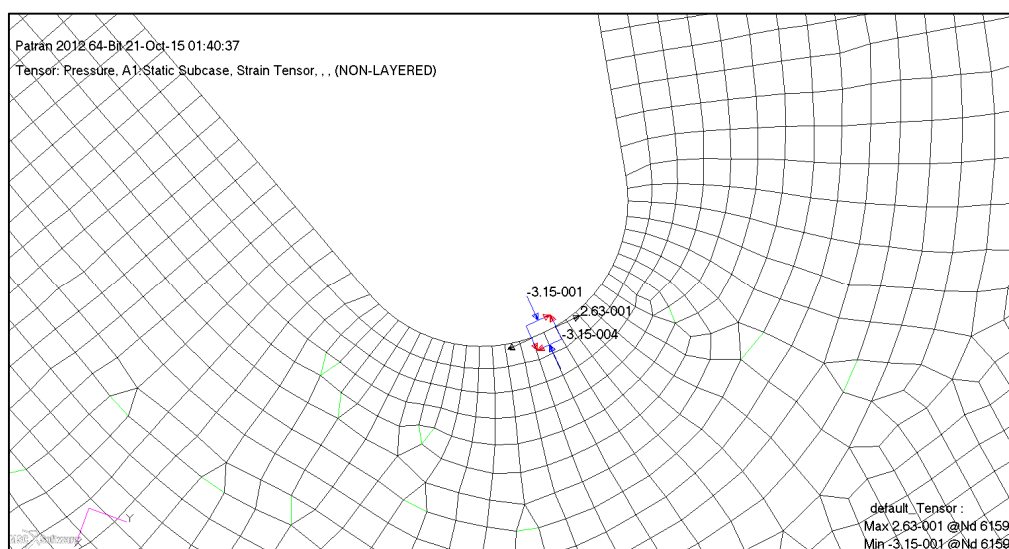


Рис. 16. Тензор деформаций в вершине звезды (Node 6159)

Окружная деформация: $\varepsilon_{\theta} = 0,263$.

Радиальная деформация: $\varepsilon_r = -0,315$.

Угловая деформация: $2\gamma_{r\theta} \sim 0$.

Интенсивность деформаций в вершине звезды:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \cdot (\gamma_{r\theta}^2 + \gamma_{\theta z}^2 + \gamma_{rz}^2)} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot (1 + 0,48)} \cdot \sqrt{(-0,315 - 0,263)^2 + (0,263 - 0)^2 + (0 + 0,315)^2} = 0,339.\end{aligned}$$

Запас прочности по деформациям:

$$n_\sigma = \frac{\varepsilon_{\text{пред}}}{\varepsilon_i} = \frac{0,36}{0,339} = 1,06.$$

Предельное значение деформации ($\varepsilon_{\text{пред}}$) взято из таблицы 2.

Строго говоря, в соответствии с работой [1], для определения прочности заряда не достаточно, просто, сравнить критические напряжения и деформации с допустимыми для данного материала значениями. Необходимо знать коэффициенты безопасности для каждого расчетного случая. С помощью этих коэффициентов учитывается: разброс физико-механических характеристик топлива, разброс условий нагрузки, погрешность выбора расчетной схемы и.т.д. Эти коэффициенты определяются экспериментально, для каждого вида нагрузки. В виду недостатка экспериментальных данных в данной работе все эти коэффициенты предполагаются равными единице.

Выводы

Как следует из анализа полученных результатов, рассчитанный заряд со звездообразным каналом удовлетворяет условиям прочности и является пригодным для использования в РДТТ с рабочим давлением в камере до 10 МПа.

Так же, на основании расчетов можно сделать вывод о применимости конечно-элементного подхода, в данном случае программного комплекса «Nastran», для анализа напряженно-деформированного состояния заряда РДТТ.

Список литературы

- [1]. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2]. Печников В.П. Напряженно-деформированное состояние заряда РДТТ, скрепленного с ортотропным корпусом // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/855.html> (дата обращения 03.10.2015).

- [3]. Ягодников Д.А., Андреев Е.А., Эйхенвальд В.Н., Козлов В.А. Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 106 с.
- [4]. Голубев И.С., Светлов В.Г. Проектирование зенитных управляемых ракет. М.: Изд-во МАИ, 2001. 732 с.
- [5]. Белецкий Б.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Киев: КОМИНТЕХ., 2005. 365 с.
- [6]. Ерохин Б.Т. Теория внутикамерных процессов и проектирование РДТТ. М.: Машиностроение, 1991. 560 с.
- [7]. Синюков А. М. Баллистическая ракета на твердом топливе. М.: Воениздат, 1972. 512 с.
- [8]. Цуцуран В. И., Петрухин Н. В., Гусев С. А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив: учебник. М.: МО РФ, 1999. 332 с.