

УДК 539.4: 621.81

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380414201670232>

**О. И. Ковч**<sup>1</sup>, инженер 1-й категории,

**В. В. Сатокин**<sup>2</sup>, ведущий специалист

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИТ-РАЗГРУЗОЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ-МЕТАЛЛ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РДТТ

**En**

Research of stress-strain state (SSS) and behavior systems consisting of compounds of composite and metallic materials is actual due to the interest of the industry in cheapening and simplifying manufacturing while maintaining specified strength structural parameters.

A virtual experiment considers a rocket engine solid fuel housing (RESF) with equipment for conducting static tests of strength and virtual testing operational loads in conditions full-scale hydraulic tests for evaluating impact of connection status composite-relieving element-metal for strength RESF.

Simulation of the housing condition of RESF to carrying-snap test was implemented on the basis of the developed computer technology realizing phased construction of finite element 3-D structural model, task real physical and mechanical properties of materials, actual loads, imitation fixing condition and conduct calculation of mechanical state. Special method of construction of a regular finite element mesh was used (Method Michelangelo) allowing considerable time reducing needed for calculations in ANSYS complex.

Basic finite-element models that match specified documentation geometrical and mechanical parameters of the structure are designed using three-dimensional elements type "SOLID".

Composite material RESF was simulated by isotropic material with properties

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», отдел нагрузок и прочностного анализа

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», отдел нагрузок и прочностного анализа

reflecting the winding of 45 degrees. Due to the use of composite materials calculation was performed in the elastic setting.

The results of the virtual experiments about functionality RESF design are concluded:

- not glued in the area of apex fitting member does not affect SSS RESF.
- not glued on verge of laying element reduces SSS RESF;
- reduction of Poisson ratio compensator on fitting member worsens SSS RESF;
- use compensator with a high elastic modulus improve SSS RESF. Partial tabs compensator with higher modulus of elasticity worsens SSS RESF.

Conducted research allows more extensive use of numerical simulation at designing to minimize expenses for manufacturing and working.

**Ua**

Розглянута задача моделювання експлуатаційного стану з'єднання композит-розвантажувальний елемент-метал застосоване при експлуатації ракетного двигуна на твердому паливі. Проведено чисельне модулювання різних варіантів зміни геометричних і фізичних властивостей компенсатору.

### **Введение**

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) и поведения систем, состоящих из соединения композитных и металлических материалов, является актуальным, ввиду заинтересованности промышленности в удешевлении и упрощении изготовления с сохранением заданных прочностных параметров конструкций. Анализ прочностного состояния достаточно длительный процесс, когда дело касается таких структурных объектов как композитный ракетный двигатель на твердом топливе (РДТТ).

Эффективным направлением снижения указанных затрат и анализа применимости является проведение виртуальных испытаний для моделирования эксплуатационного состояния конструкций и испытательной оснастки.

### **Постановка задачи**

Государственным предприятием «Конструкторское Бюро «Южное» были проведены гидравлические испытания (ГИ) корпуса РДТТ внутренним давлением до заданного уровня. Заданный уровень внутреннего давления при испытаниях был достигнут, корпус РДТТ не был разрушен.

В виртуальном эксперименте рассматривается конструкция корпуса РДТТ с оснасткой для проведения статических испытаний на прочность и проведение на этой основе виртуальных испытаний при эксплуатационных нагрузках в условиях натурных гидравлических испытаний для оценки влияния состояния соединения композит-разгрузочный элемент-металл на прочность РДТТ.

Задачами проводимых виртуальных статических испытаний были определены:

1. Проведение исследования НДС системы. Подтверждение прочности и работоспособности корпуса РДТТ.
2. Проведение анализа влияния различных вариантов непрямоугольного сечения в РДТТ на ее НДС.
3. Проведение анализа влияния свойств материалов на НДС РДТТ.

### **Методы и способы исследований**

При гидравлических испытаниях корпуса РДТТ система подвергается воздействию внутреннего давления, имитирующее воздействие внутрикамерного давления РДТТ.

Моделирование состояния корпуса РДТТ в транспортировочно-испытательной оснастке было реализовано на основе разработанной компьютерной технологии, реализующей поэтапно построение конечно-элементной 3-D модели конструкции, задание реальных физико-механических характеристик материалов, фактических нагрузок, имитацию условий закрепления и проведение расчета механического состояния. Был использован специальный метод построения регулярной сетки конечных элементов [1], позволяющий значительно сократить время необходимое для проведения расчетов в программном комплексе *ANSYS*.

Геометрия корпуса РДТТ представляет собой цилиндрическую конструкцию силовой оболочки, закладными элементами с компенсаторами напряжений, слоем наружно и внутреннего теплозащитного покрытия, защитно-крепящим слоем, шпилечным соединением для транспортировки и сборки, разгрузочным элементом для имитации сопла. Весь РДТТ закреплен в транспортировочно-испытательную оснастку. Геометрия представлена на рис. 1.

Композитный материал РДТТ имитировался изотропным материалом со свойствами, отражающими намотку 45 градусов.

Базовые конечно-элементные модели, соответствующие заданным в документации геометрическим и механическим параметрам конструкции создавались с использованием трёхмерных элементов типа "*SOLID*".

Ввиду применения композитных материалов расчет проводился в упругой постановке.

Для сокращения времени расчета и ввиду симметричности конструкции в виртуальном эксперименте использовалась  $\frac{1}{4}$  часть РДТТ.

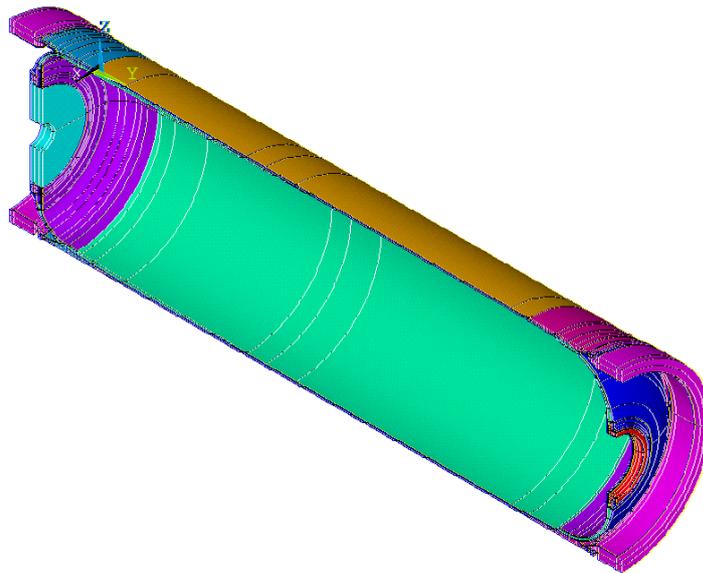


Рис. 1. Геометрическая модель РДТТ

### Результаты и их обсуждение

Конечно-элементная модель корпуса РДТТ в испытательной оснастке представлена на рис. 2.

ANSYS PLOT NO. 1  
ELEMENTS  
PowerGraphics  
EFACET=1  
MAT NUM

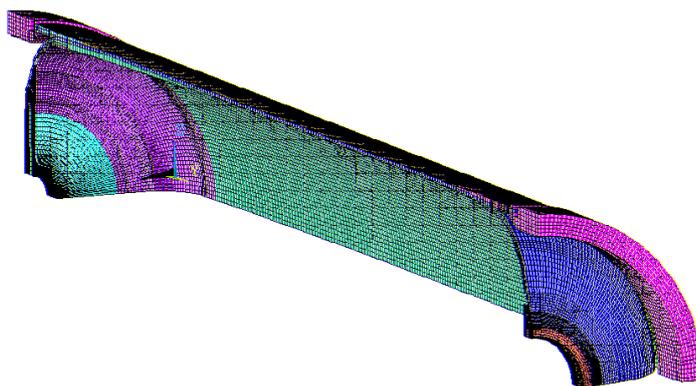


Рис. 2. Конечно-элементная модель системы

На этапе 1 практической реализации виртуальных испытаний были проведены исследования механического состояния всех элементов системы для основного расчетного случая. Картина НДС конструкции корпуса РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих испытаний, представлена на рис. 3, рис. 4.

По результатам проведенных расчетов прочность и работоспособность исследуемой системы РДТТ обеспечивается.

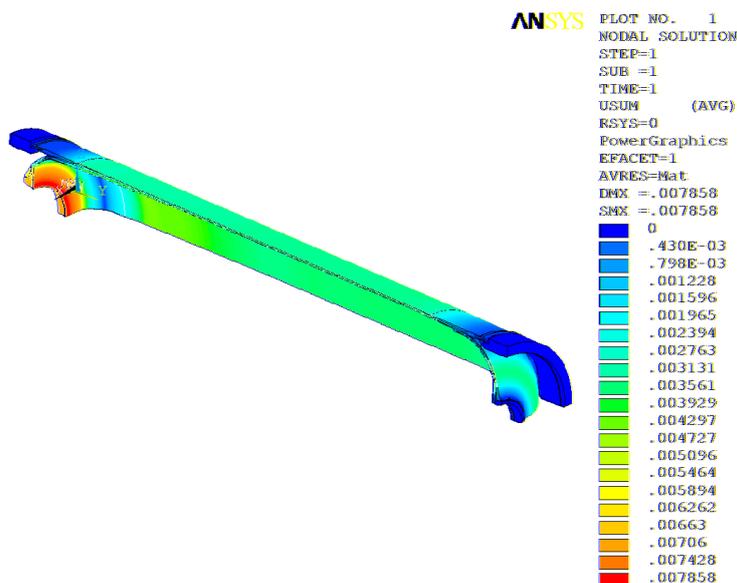


Рис. 3. Суммарные перемещения системы, м

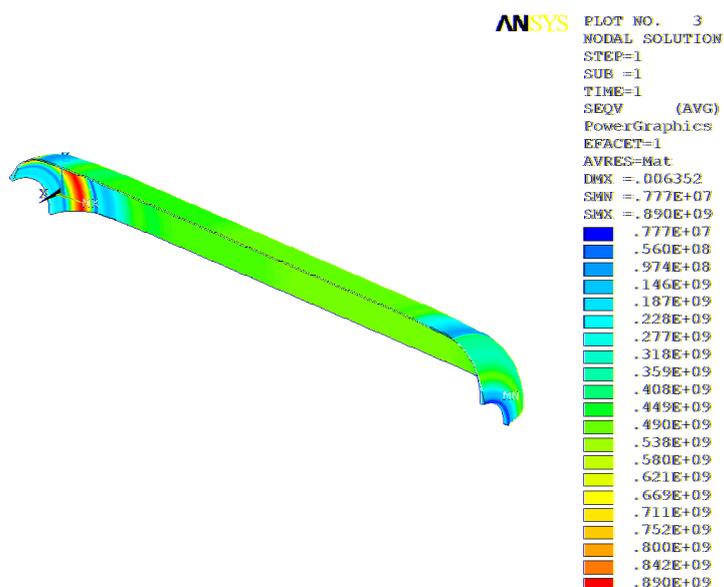


Рис. 4. Эквивалентные напряжения, Па

На этапе 2 виртуальных испытаний был проведен анализ НДС РДТТ при различных вариантах непрочности в соединении композит-разгрузочный элемент-металл и его влияние на прочность системы.

На этапе 2а рассмотрен вариант непрочности в вершине закладного элемента.

Картина НДС конструкции корпуса РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих испытаний с учетом указанного непрочности, представлена на рис. 5 - рис. 7.

Анализ НДС РДТТ при непоклее в вершине закладного элемента показал, что данный вид непоклея не влияет на прочность РДТТ.

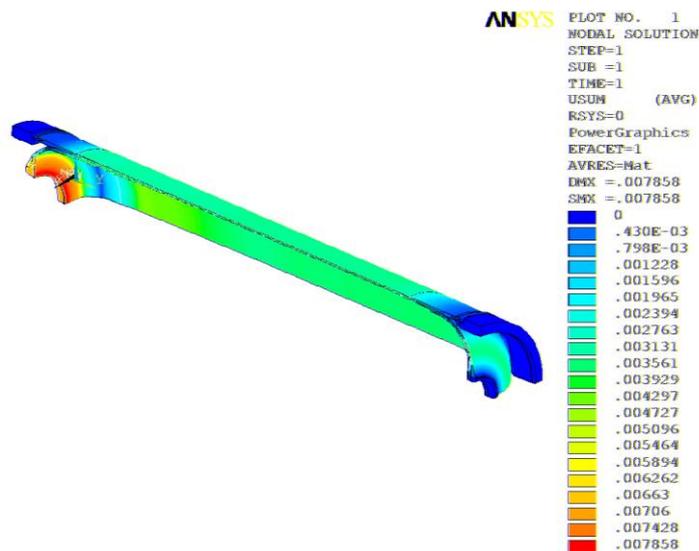


Рис. 5. Суммарные перемещения системы, м

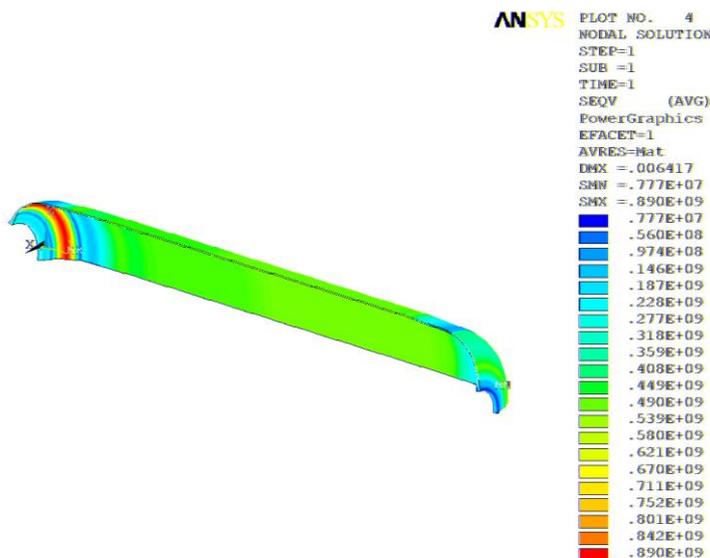


Рис. 6. Эквивалентные напряжения, Па

На этапе 2а рассмотрен вариант непоклея по грани закладного элемента. Картина НДС конструкции корпуса РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих испытаний с учетом указанного непоклея, представлена на рис. 8 - рис. 10.

Анализ НДС РДТТ при непоклее по грани закладного элемента показал, что данный вид непоклея недопустим, ввиду ухудшения состояния РДТТ и приводит к неработоспособности РДТТ при заданных нагрузках.

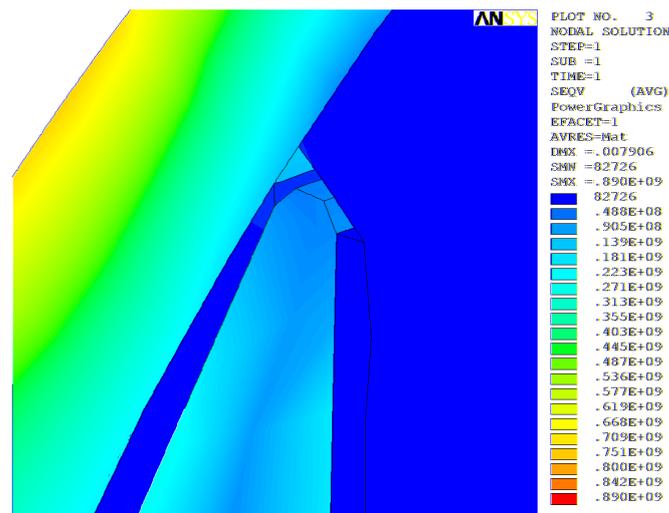


Рис. 7. Эквивалентные напряжения, Па

На этапе 3 виртуальных испытаний был проведен анализ НДС РДТТ при различных вариантах изменения свойств материалов в соединении композит-разгрузочный элемент-металл и его влияние на прочность системы.

На этапе 3а рассмотрен вариант, когда фрагменты компенсатора на закладном элементе имеют коэффициент Пуассона 0.2 а не 0.48, и вариант когда весь компенсатор обладает такими свойствами.

Картина НДС конструкции корпуса РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих испытаний, с учетом изменения свойств части компенсатора представлена на рис. 11, а с учетом изменения свойств всего компенсатора на рис. 12.

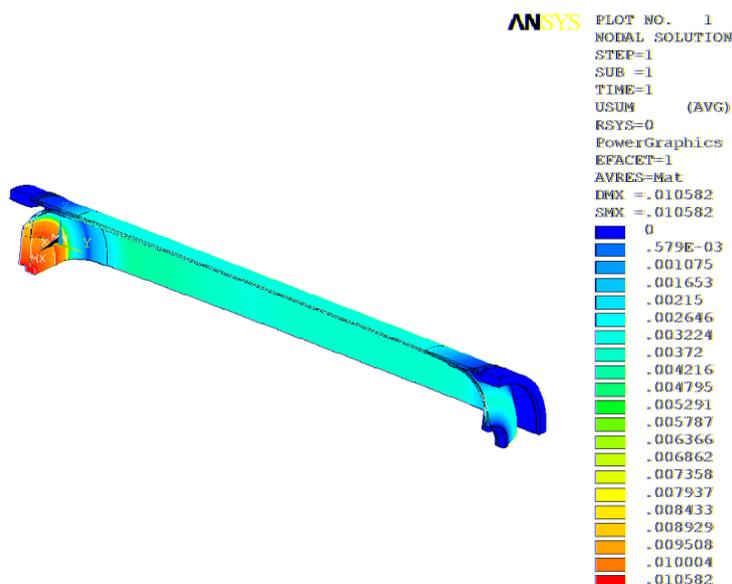


Рис. 8. Суммарные перемещения системы, м

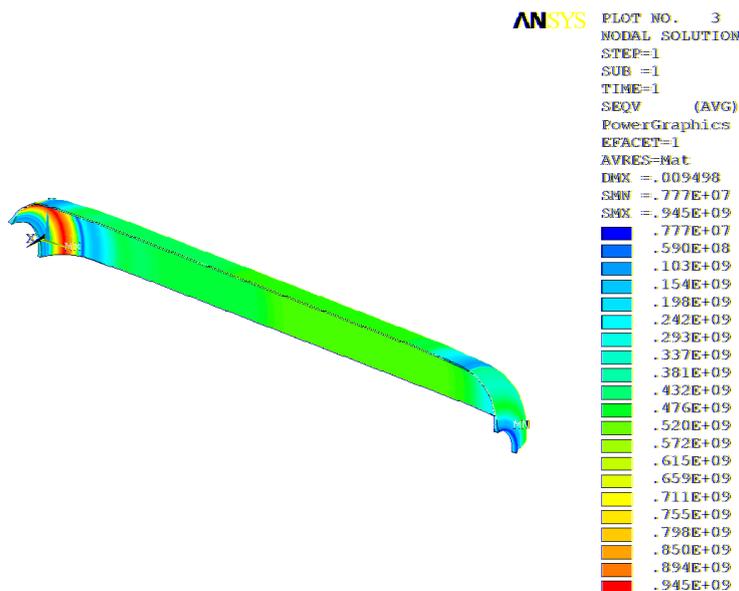


Рис. 9. Эквивалентные напряжения, Па

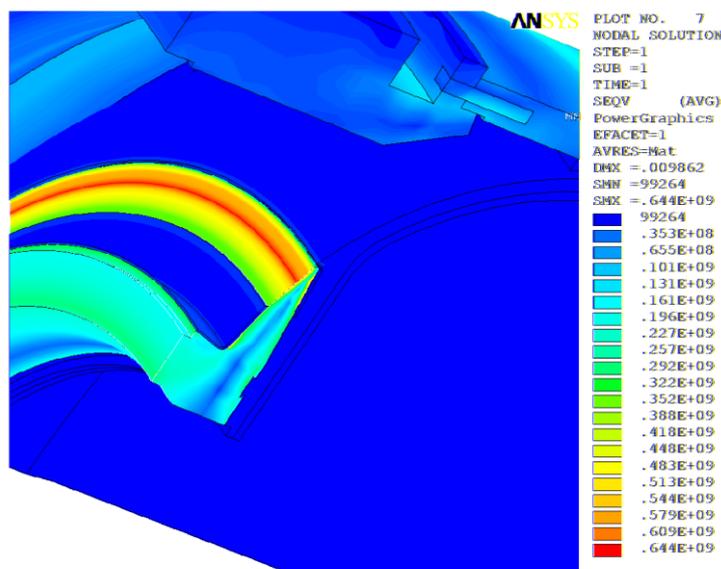


Рис. 10. Эквивалентные напряжения, Па

Анализ НДС РДТТ когда фрагменты компенсатора на закладном элементе имеют коэффициент Пуассона 0.2 а не 0.48, и вариант когда весь компенсатор обладает такими свойствами показывает, что такое изменение свойств в обоих случаях приводит к увеличению напряжения в РДТТ и приводит к неработоспособности РДТТ при заданных нагрузках.

На этапе 3а рассмотрен вариант, когда фрагменты компенсатора на закладном элементе имеют модуль упругости  $10^8$  Па, а не  $10^7$  Па, и вариант когда весь компенсатор обладает такими свойствами.

Картина НДС конструкции корпуса РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих

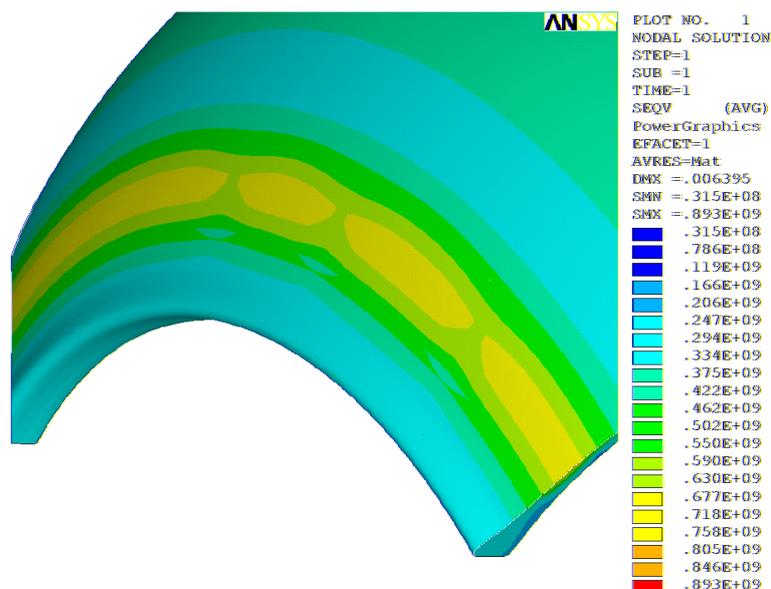


Рис. 11. Эквивалентные напряжения, Па

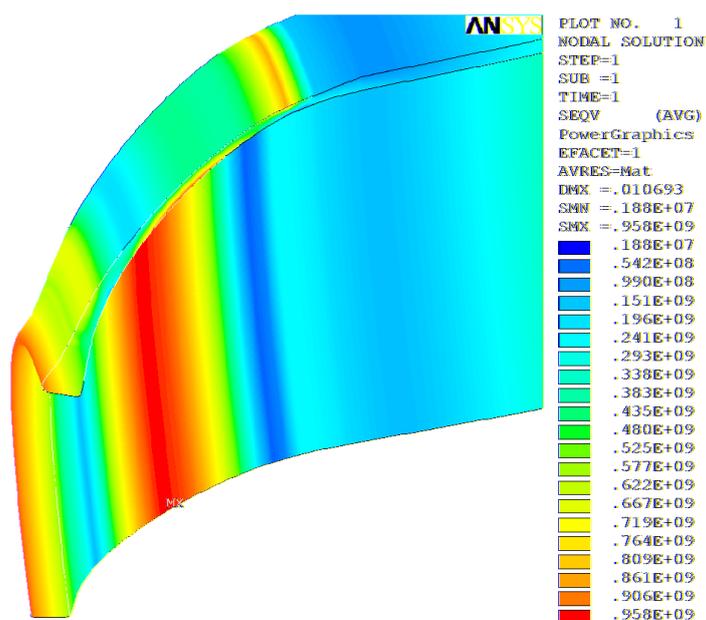


Рис. 12. Эквивалентные напряжения, Па

испытаний, с учетом изменения свойств части компенсатора представлена на рис. 13, а с учетом изменения свойств всего компенсатора на рис. 14.

Анализ НДС РДТТ когда фрагменты компенсатора на закладном элементе имеют модуль упругости  $10^8$  Па, а не  $10^7$  Па, и вариант когда весь компенсатор обладает такими свойствами показывает, что такое локальное изменение свойств к увеличивает напряжения в РДТТ и приводит к неработоспособности РДТТ при заданных нагрузках, а полное изменение свойств компенсатора снижает напряжения в РДТТ.

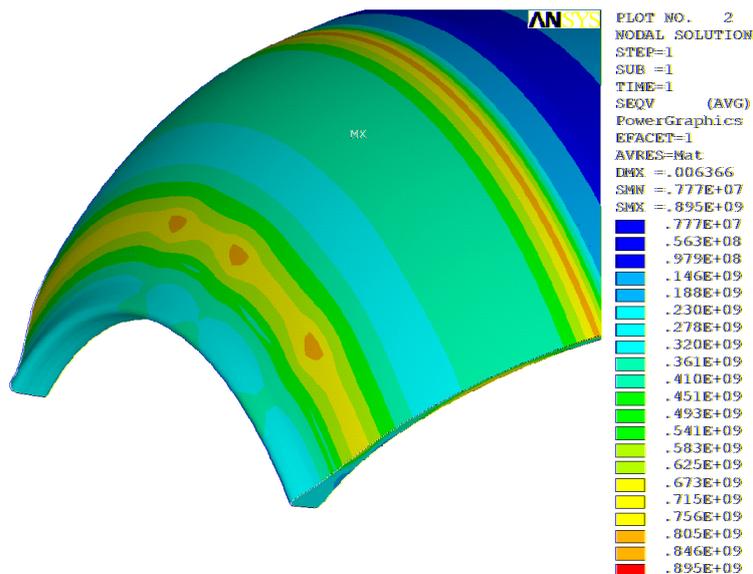


Рис. 13. Эквивалентные напряжения, Па

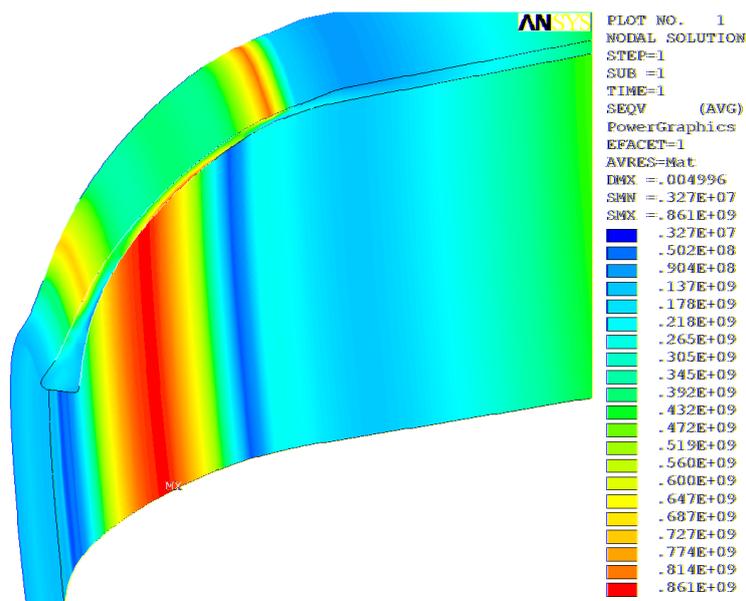


Рис. 14. Эквивалентные напряжения, Па

## Выводы

По результатам проведенных виртуальных экспериментов сделаны выводы о работоспособности конструкции РДТТ.

- Непроклей в зоне вершины закладного элемента не ухудшает НДС РДТТ.
- Непроклей по грани закладного элемента ухудшает НДС РДТТ.
- Уменьшение коэффициента Пуассона компенсатора на закладном элементе ухудшает НДС РДТТ.

- Использование компенсатора с более высоким модулем упругости улучшает НДС РДТТ. Частичные вклады компенсатора с более высоким модулем упругости ухудшают НДС РДТТ.

Проведенное исследование дает возможность при проектировании более широко использовать численное моделирование для минимизации затрат на производство и натурную отработку.

#### **Список использованной литературы**

1. *Сатокин, В. В.* Разработка и апробация «Метода Микеланджело». Журнал САПР и Графика, №7, М. ООО КомпьютерПресс.– 2013 г.