

УДК 629 7.036.54

**Использование метода подконструкций при проведении термopочностного расчета
сложных конструкций на примере сопловой части ЖРД**

О.В. Короткая

Студент, кафедра «Прикладная механика»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: С.С. Гаврюшин, д.т.н., заведующий кафедрой

«Компьютерные системы автоматизации производства»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана

korotkaya_olga@mail.ru

Ряд конструкций, геометрия которых является сложной настолько, что не позволяет проводить расчет в целом в трехмерной постановке в силу ограниченности мощности компьютера, требует применения специальных методов расчета, одним из которых является метод подконструкций. Суть его заключается в том, что вся конструкция считается элементом высшего уровня, отдельные узлы – элементами низших уровней. Элементы более высоких уровней состояются из уже сформированных элементов низших уровней. Это проиллюстрировано на рисунке 1.

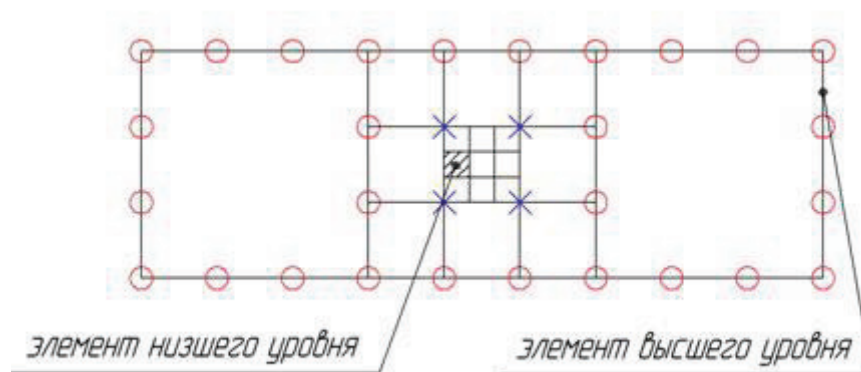


Рис. 1. Элементы высшего и низшего уровней

Метод подконструкций - это метод анализа конечных элементов, который уплотняет группу конечных элементов в один суперэлемент, представляемый матрицей. При правильном использовании данного метода с большими КЭ моделями, можно существенно сократить размер модели, используемой для расчета. При применении этого метода требования к оперативной памяти существенно уменьшаются, так как нет необходимости создавать и хранить в оперативной памяти компьютера полную матрицу жесткости для всей модели.

Метод подконструкций очень перспективен, так как может применяться для модификации сложных конструкций и не требует больших затрат. Пример сложной конструкции – кислородно-водородный ЖРД, в частности, его сопловая часть (рис. 2).

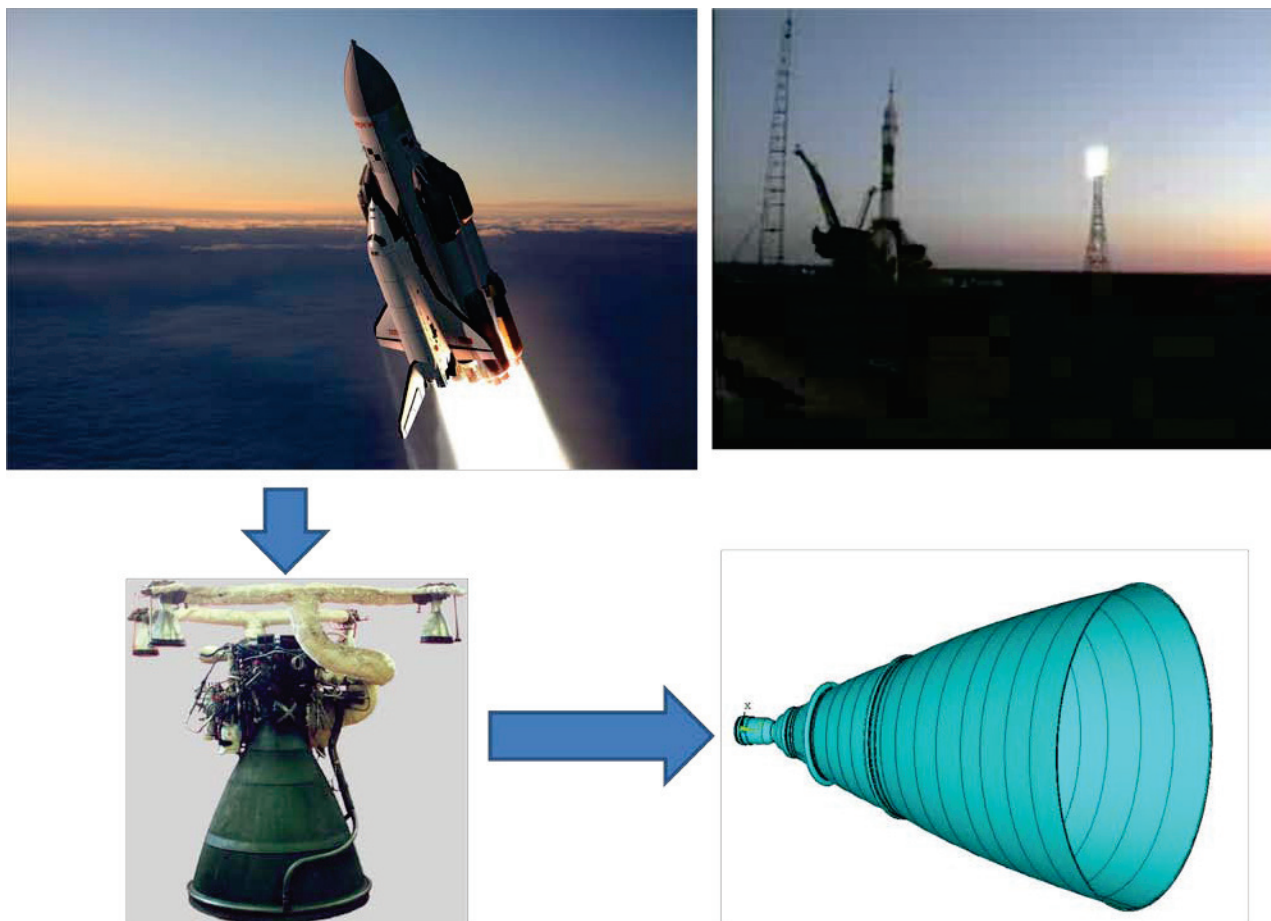


Рис. 2. ЖРД. Сопловая часть

Рассчитываемое изделие - это тонкостенная конструкция, основной частью которой является осесимметричная оболочка, охватывающая цилиндрическую камеру сгорания с форсуночной головкой и сопловую часть, на конце которой находится насадок радиационного охлаждения (НРО). В основе конструкции - связанные между собой силовая оболочка и огневая стенка, между ними протекает охладитель по охлаждающему тракту.

В результате анализа конструкции были выявлены следующие критические места:

1. область входных коллекторов в сверхзвуковой части сопла и стыка развальцованной оболочки камеры со сверхзвуковой частью сопла;
2. тракт охлаждения в районе критического сечения;
3. участок стыка медного и стального участков огневой стенки камеры в сверхзвуковой части сопла;
4. стык охлаждаемой части с насадком радиационного охлаждения

В данной статье рассматривается расчет одной из критических областей - стыка сопловой охлаждаемой части с насадком радиационного охлаждения. Расчетная схема и условия закрепления показаны на рисунке 3.

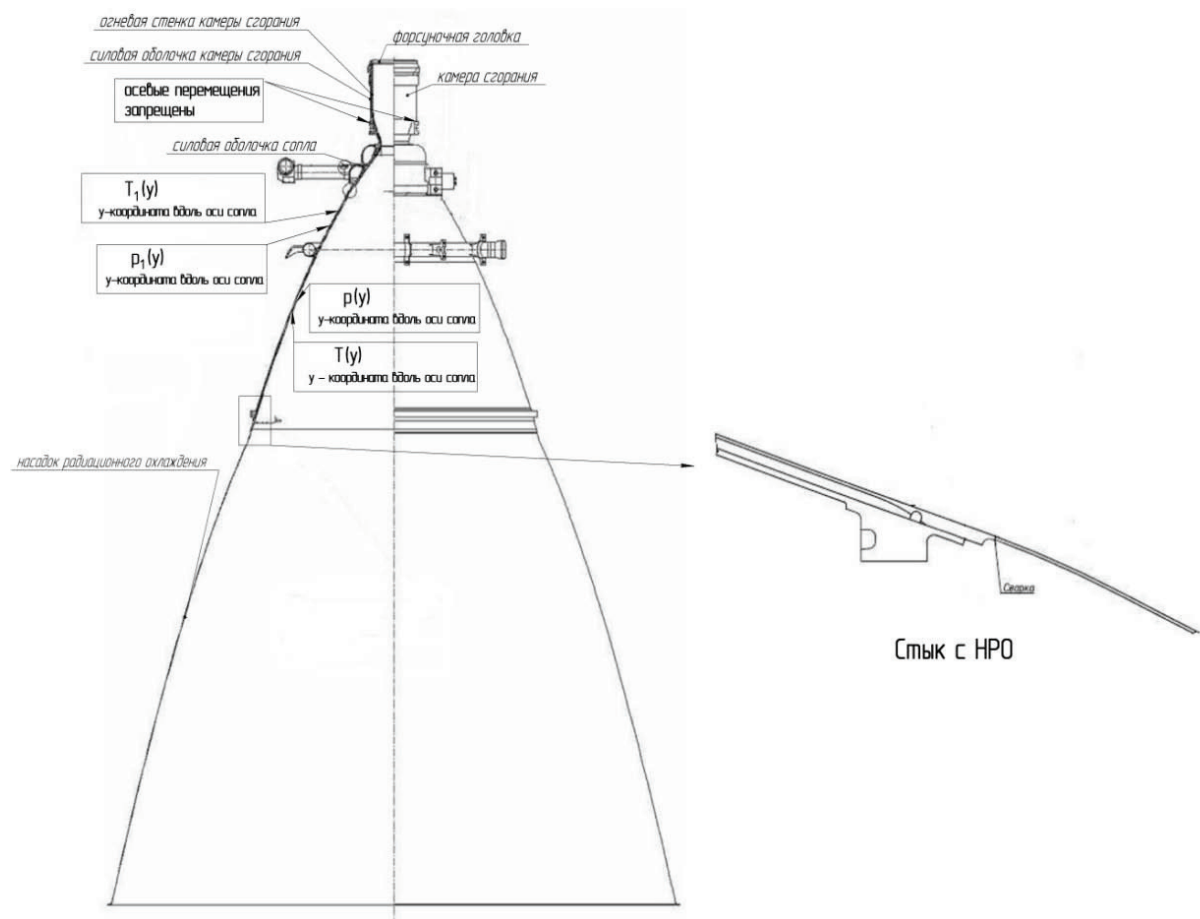


Рис. 3. Расчетная схема и условия закрепления

Геометрия опытного образца и материалы, из которых он изготовлен, представлены Заказчиком.

Расчет проводился для трех режимов: газогенераторного (захоленная камера), стационарного режима и состояния после цикла нагружения. Граничные условия – тепловая нагрузка и давление заданы из газодинамического расчета.

Специфика геометрии конструкции изделия обуславливает решение задачи только численным методом, а наиболее эффективным является метод конечных элементов (МКЭ). Для его реализации использовался программный комплекс ANSYS.

Блок-схема решения задачи приведена на рисунке 4.

Блок – схема решения задачи

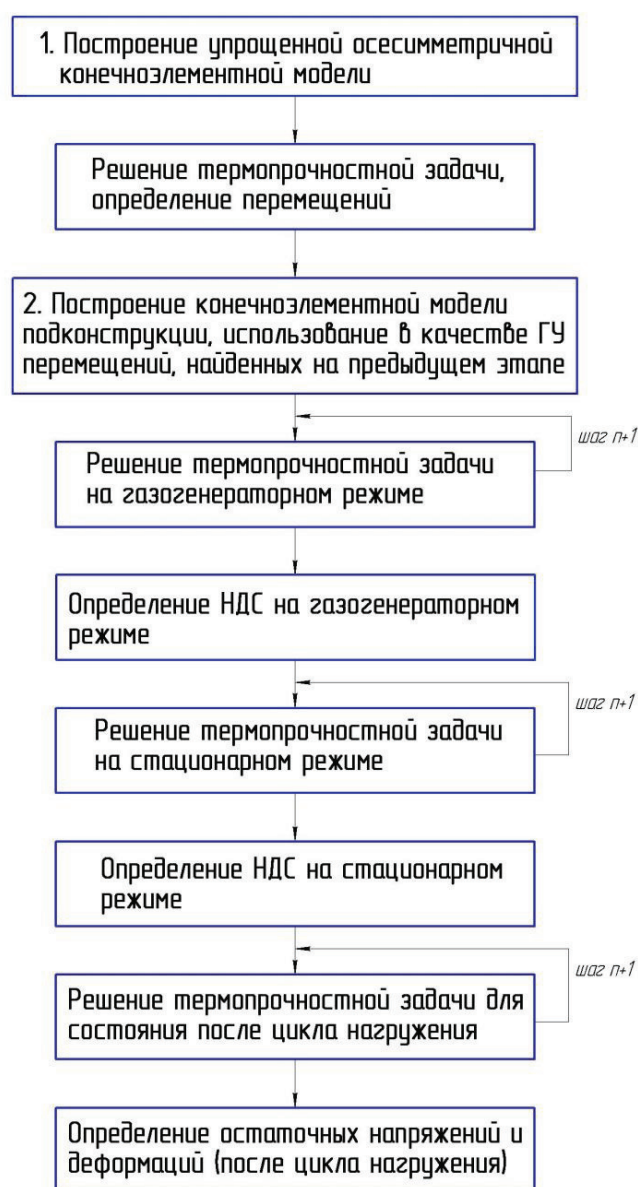


Рис. 4. Блок-схема решения задачи

Задача решалась поэтапно. На первом этапе по упрощенной схеме осесимметричной оболочки анализировалась конструкция в целом. Это дает возможность оценить величину перемещений с требуемой точностью.

На втором этапе рассчитывалась подконструкция стыка по трехмерной схеме. В качестве граничных условий использовались узловые перемещения, найденные по осесимметричной модели. Для описания материалов при анализе подконструкции использовалась билинейная модель изотропного материала. Рассмотрим подробнее каждый из этих этапов.

Осесимметричная модель

Охлаждающие каналы в стенке изделия не позволяют рассматривать конструкцию как осесимметричную. Поэтому использовался прием замены реальной конструкции на конструктивно-анизотропную сплошную модель, то есть неоднородная по толщине и окружному направлению реальная конструкция моделировалась как сплошная однородная анизотропная оболочка. Коэффициенты анизотропии рассчитывались из условия эквивалентной жесткости оболочки на растяжение – сжатие и изгиб в радиальном и окружном направлении.

Предположение о том, что стационарная задача теплопроводности и теплопрочностная задача не связаны, позволило проводить решение последовательно.

Для решения задачи теплопроводности применялся тепловой твердотельный элемент PLANE77. Этот четырехугольный восьмиузловой конечный элемент имеет в качестве степеней свободы узловые температуры.

Конечно-элементная модель оболочки камеры, состоящая из 101439 узлов и 30327 восьмиузловых конечных элементов, приведена на рисунке 5. Конструкция закреплена в точке, показанной на рисунке 5.

Конечно-элементная модель оболочки камеры

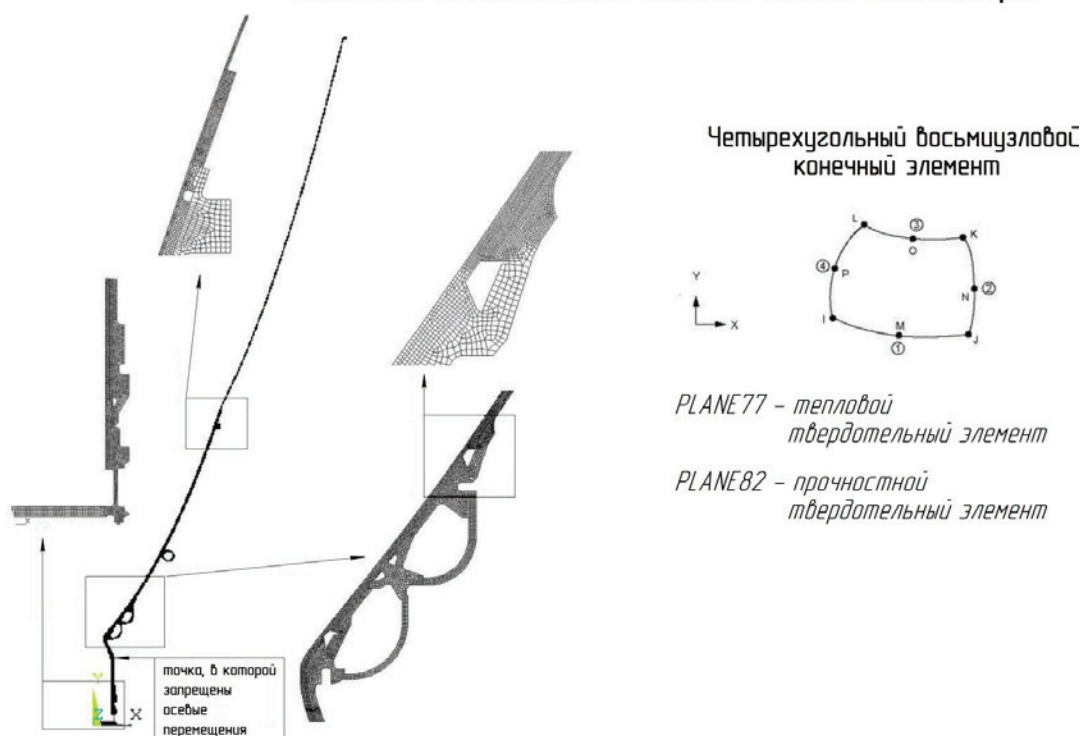


Рис. 5. Конечно-элементная модель оболочки камеры сгорания

В результате расчета получено распределение температур по всей конструкции. Далее оно использовалось при решении прочностной задачи.

Температурное состояние конструкции на газогенераторном режиме (захоленная камера) приведено на рисунке 6, а температурное состояние камеры на стационарном режиме представлено на рисунке 7.

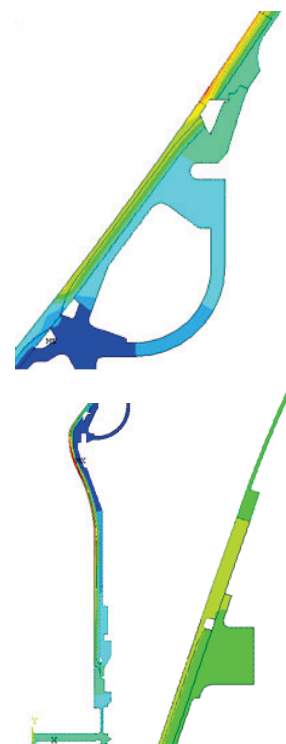
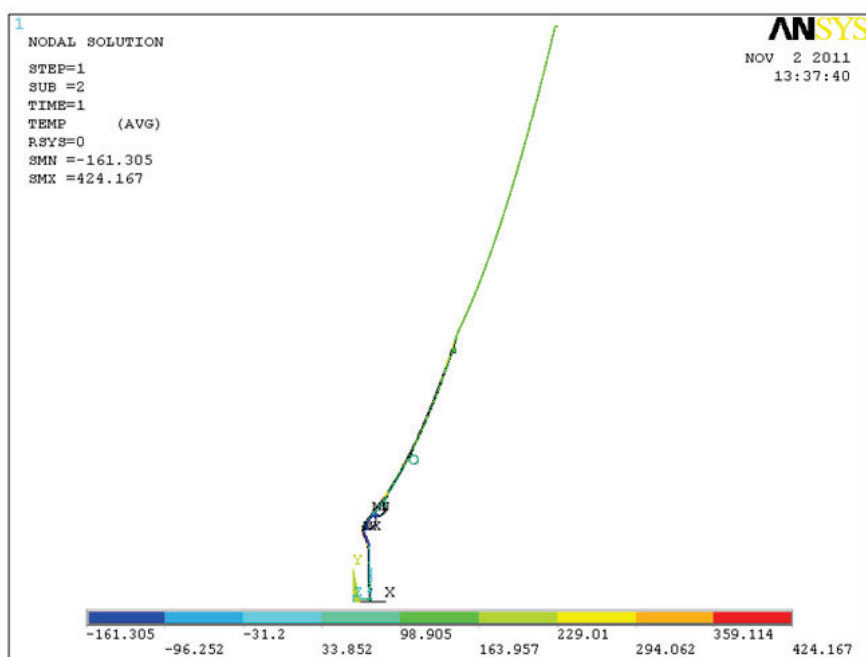


Рис. 6. Температурное состояние конструкции на газогенераторном режиме (захоленная камера), °C

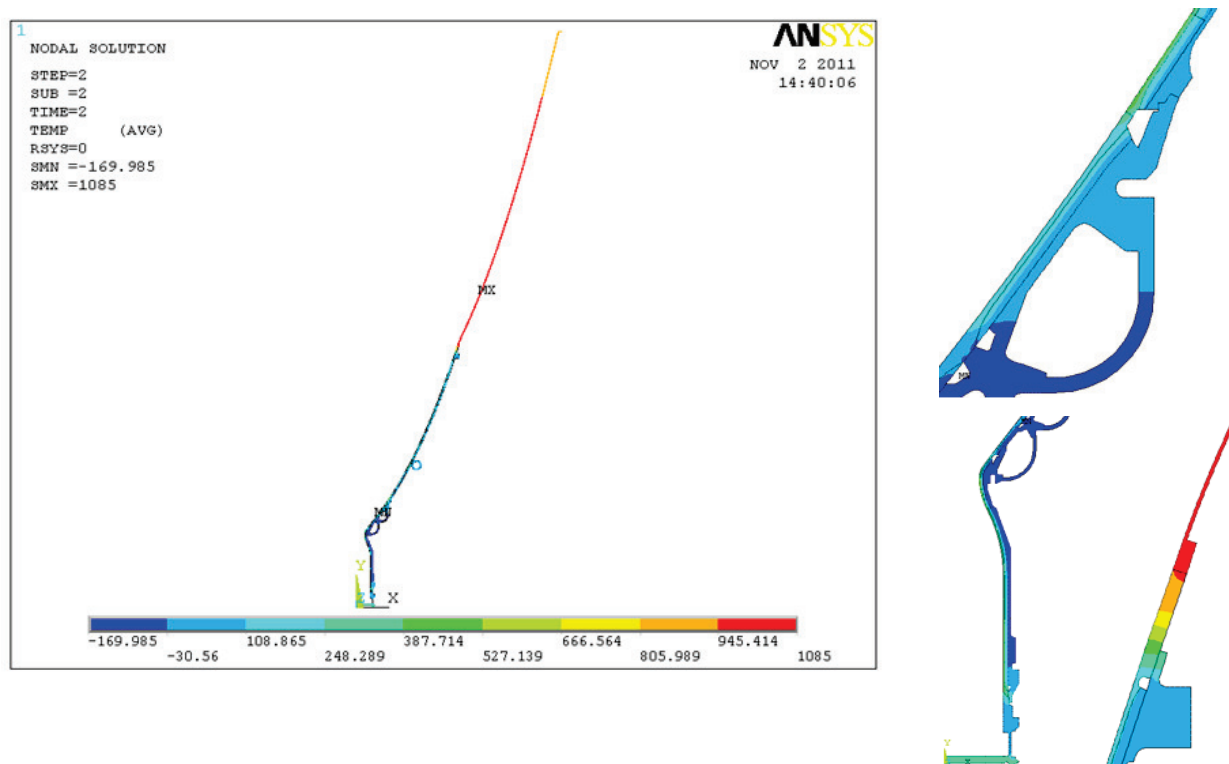
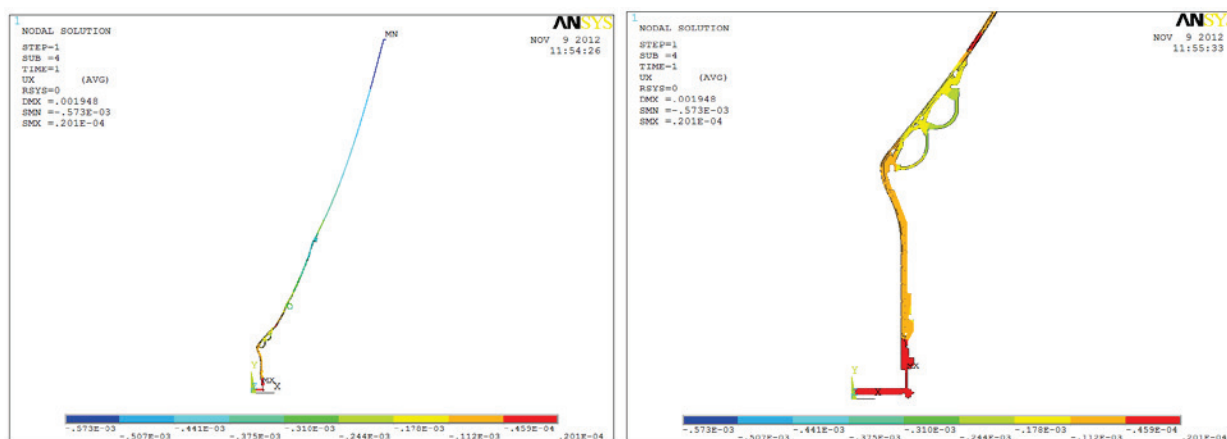


Рис. 7. Температурное состояние конструкции на стационарном режиме, °C

При расчете напряженно-деформированного состояния применялся прочностной твердотельный элемент PLANE82 (см. рис. 5). Этот четырехугольный восьмиузловой конечный элемент имеет две степени свободы в каждом узле.

Результатом расчета по осесимметричной модели являются перемещения в конструкции. На втором этапе они были использованы в качестве граничных условий при проведении трёхмерных расчётов напряжённо-деформированного состояния стыка охлаждаемой части с НПО

Радиальные и осевые перемещения на газогенераторном режиме приведены на рисунке 8.



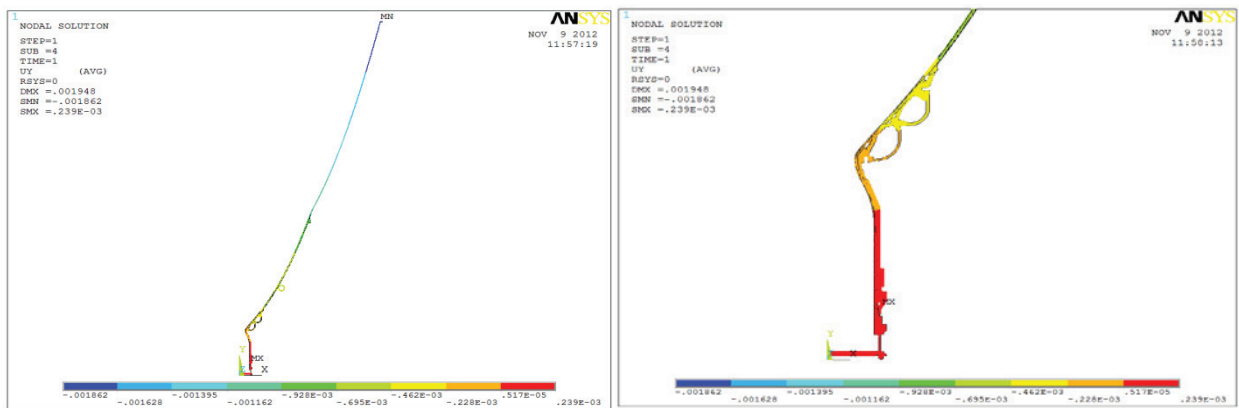
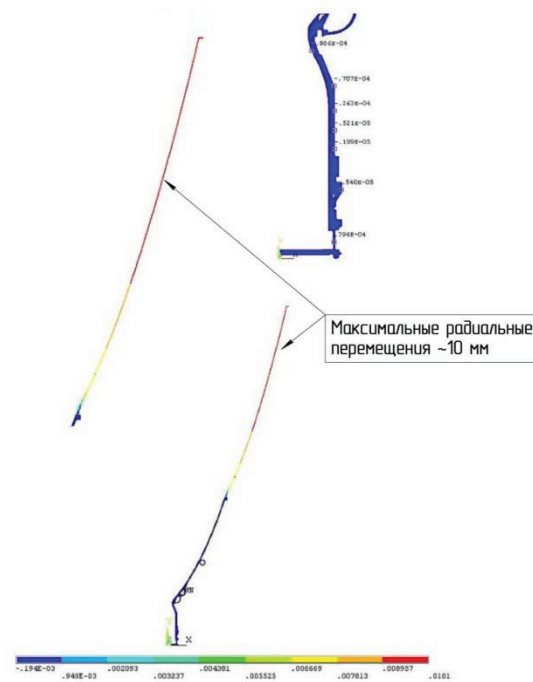


Рис. 8. Радиальные и осевые перемещения на газогенераторном режиме (захоленная камера), м

Радиальные и осевые перемещения на стационарном режиме приведены на рисунке 9.

Радиальные перемещения



Осевые перемещения

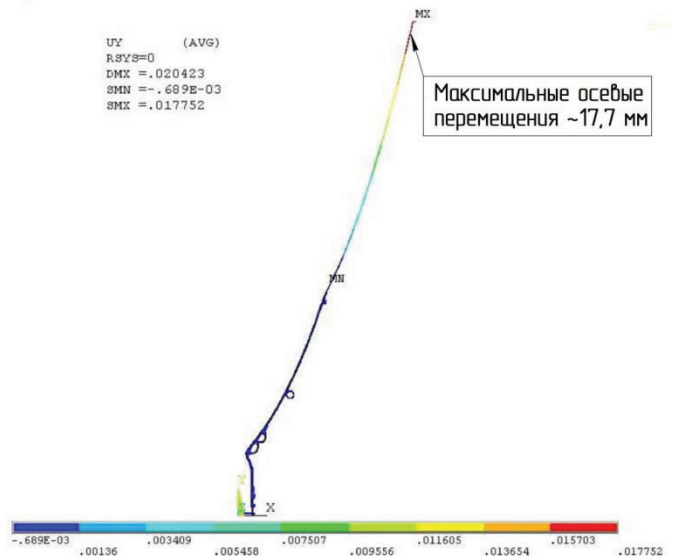


Рис. 9. Радиальные и осевые перемещения на стационарном режиме, м

Остаточные радиальные и осевые перемещения приведены на рисунке 10.

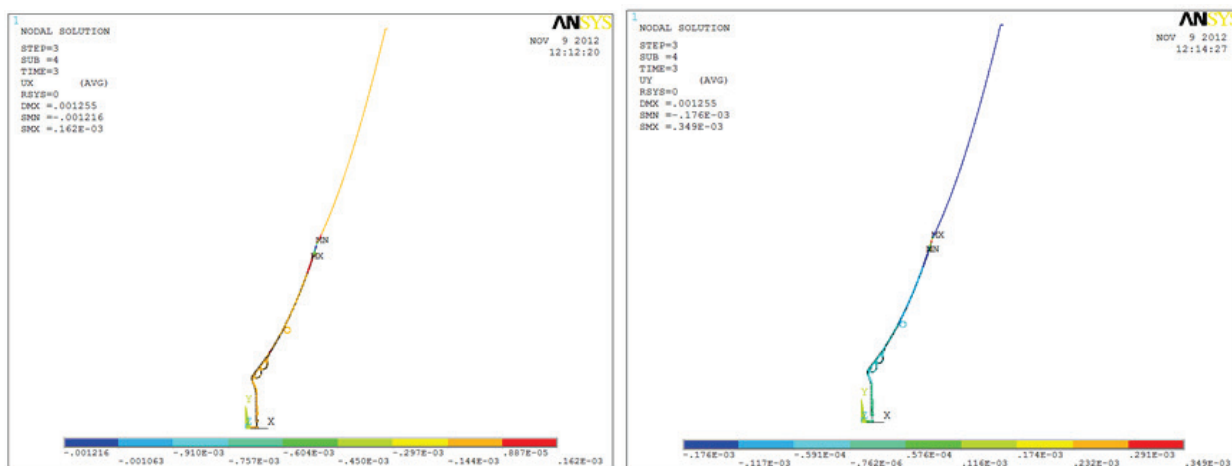


Рис. 10. Остаточные радиальные и осевые перемещения, м

Расчет подконструкции (стык с НРО)

Следующий этап – расчет подконструкции. Использовалось условие циклической симметрии, что позволило создать трехмерную модель (сектор), полностью отражающую реальную геометрию изделия.

Реализация метода подконструкций проводилась следующим образом. По результатам осесимметричного расчёта определена общая картина деформирования конструкции. Далее полученные значения перемещений прикладывались к границам подконструкции. Поскольку узлов в трехмерной модели больше, чем в осесимметричной, то для промежуточных узлов значения перемещений получены интерполяцией. Вид подконструкции и граничные условия для стыка приведены на рисунке 11.

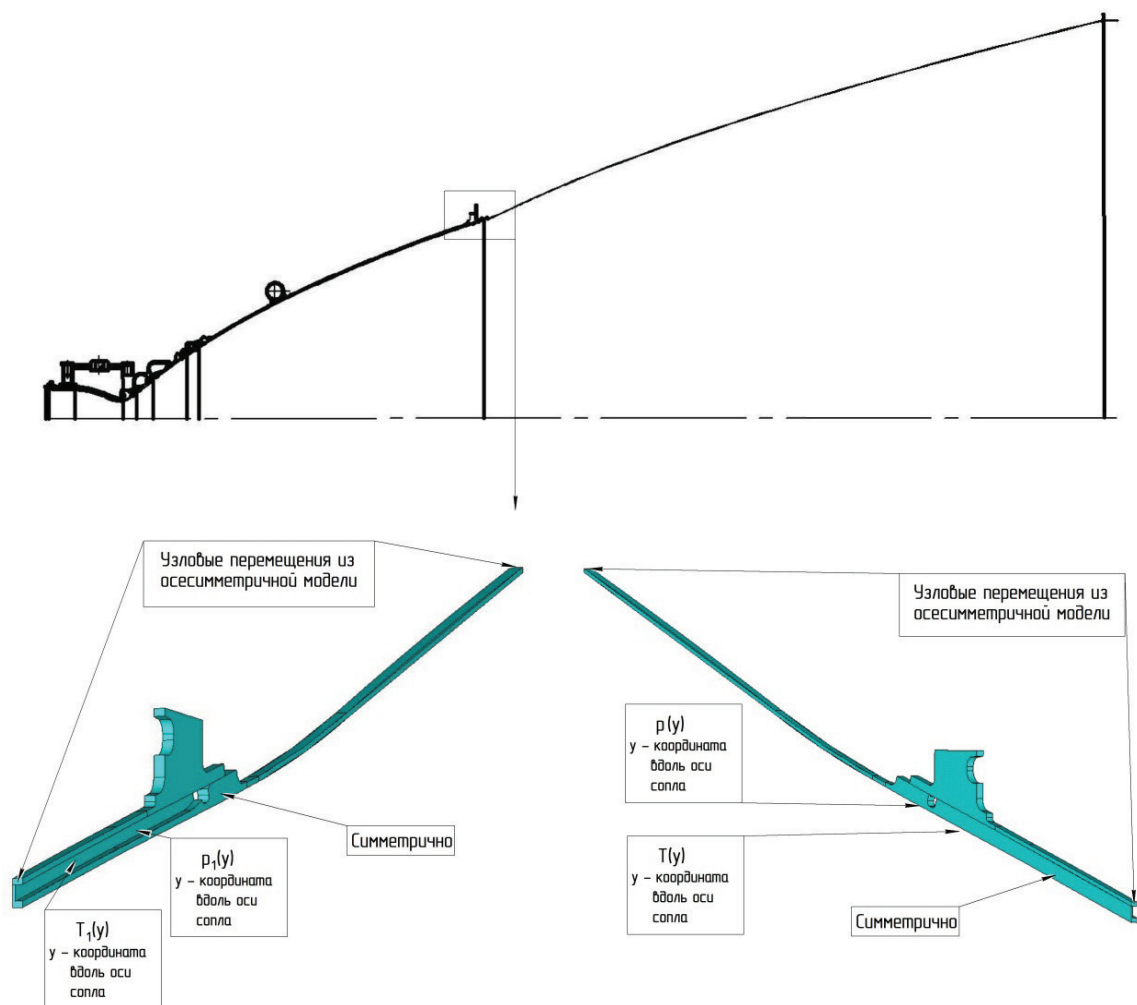


Рис. 11. Стык с НПО. Граничные условия.

Для стыка сопловой охлаждаемой части с НПО также решались две задачи: стационарная задача теплопроводности и расчет напряженно-деформированного состояния. Для решения задачи теплопроводности применялся десятиузловой тетраэдральный конечный элемент SOLID87 с одной степенью свободы в каждом узле – температурой.

Конечно-элементная модель состоит из 68495 узлов и 36704 элементов - тетраэдров второго порядка. Сетка и вид конечного элемента приведены рисунке 12.

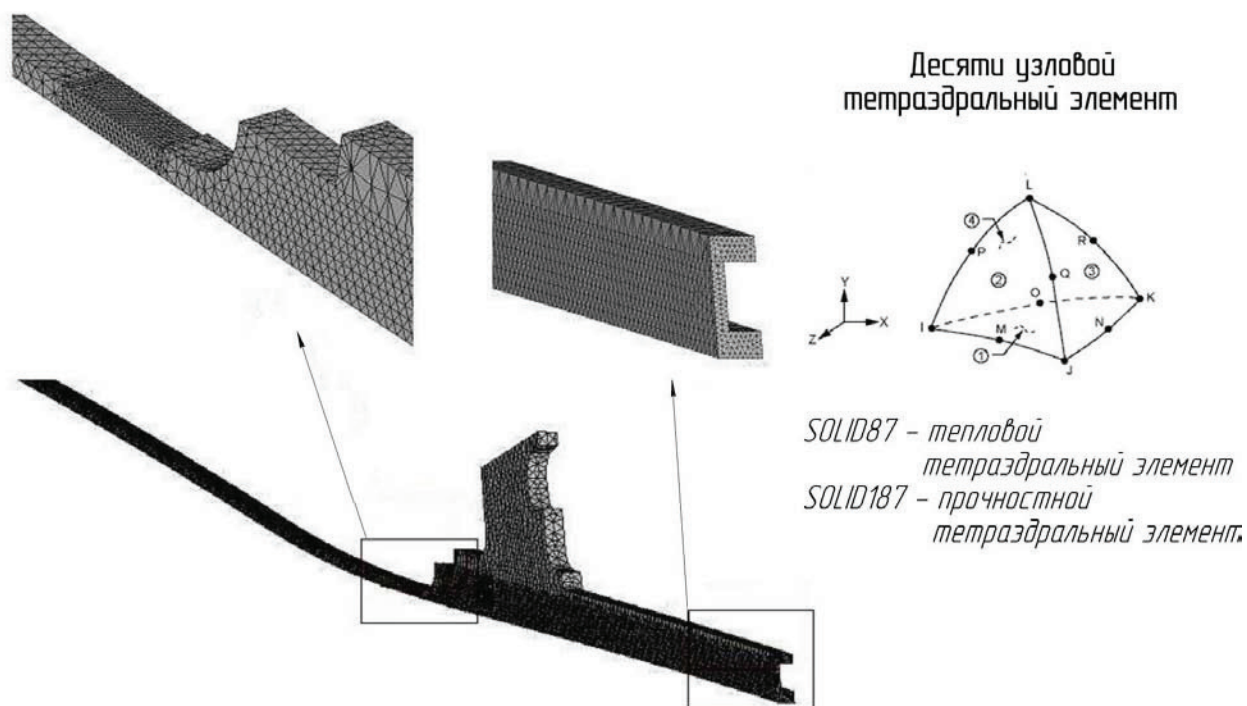


Рис. 12. Конечно-элементная модель стыка с НРО и вид конечного элемента

Температурное состояние конструкции на газогенераторном режиме (захоленная камера) приведено на рисунке 13.

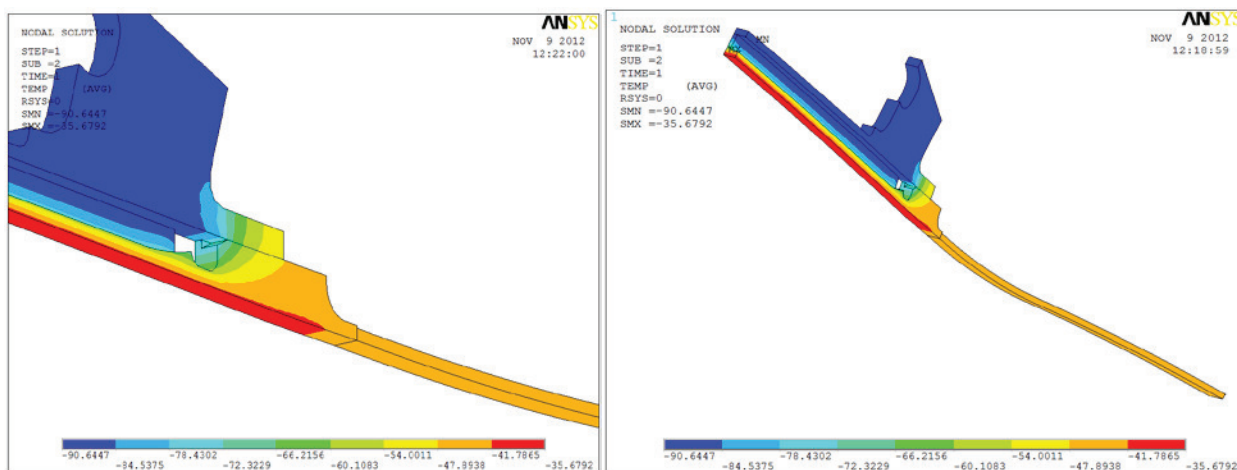


Рис. 13. Температурное состояние конструкции на газогенераторном режиме (захоленная камера), °C

Температурное состояние конструкции на стационарном режиме приведено на рисунке 14.

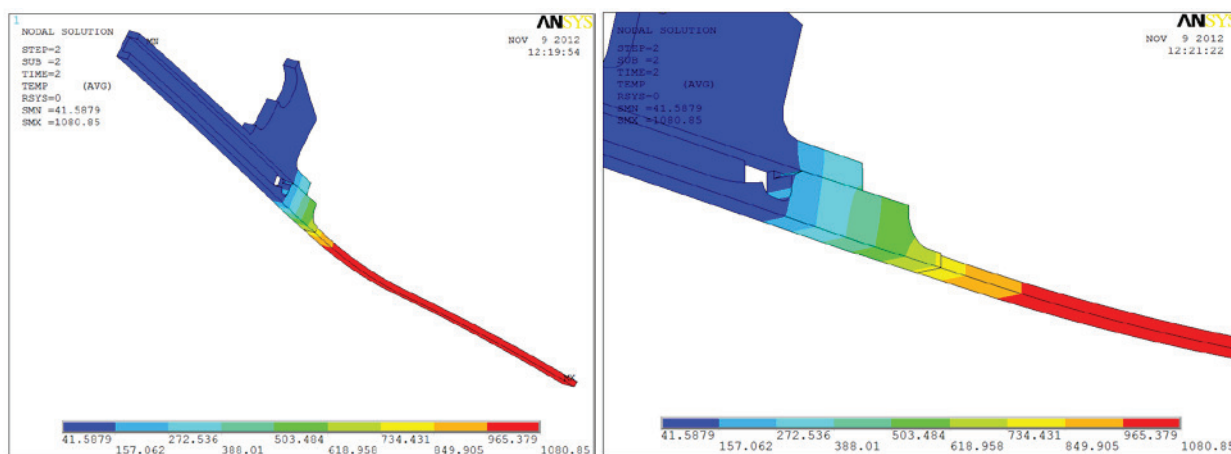


Рис. 14. Температурное состояние конструкции на стационарном режиме, °C

Для решения прочностной задачи применялся SOLID187 – десятиузловой объемный элемент с тремя степенями свободы в каждом узле (см. рис.12). В итоге получено распределение перемещений, пластических деформаций и напряжений на каждом из трех режимов. Радиальные и осевые перемещения конструкции для заохоложенной камеры показаны на рисунке 15, а для стационарного режима приведены на рисунке 16.

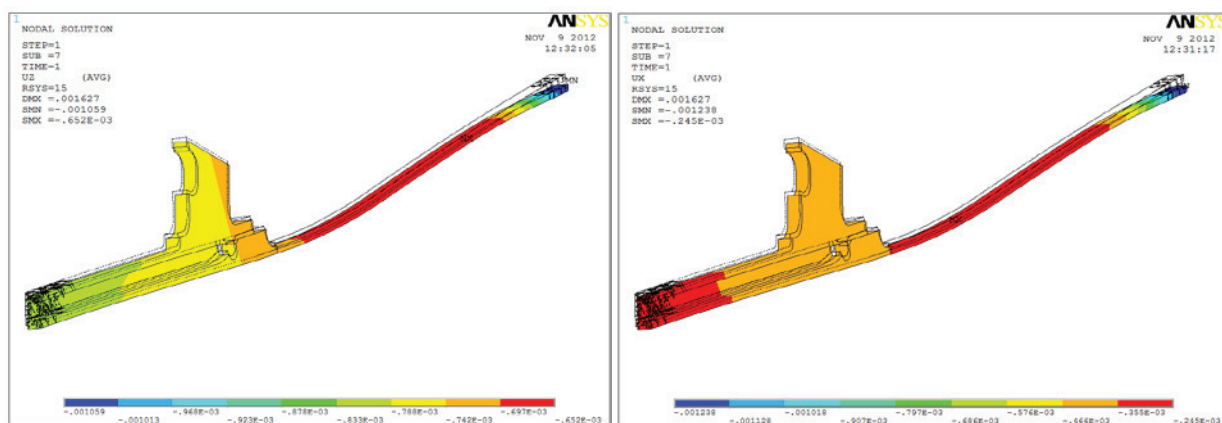


Рис. 15. Радиальные и осевые перемещения на газогенераторном режиме (заохоложенная камера), м

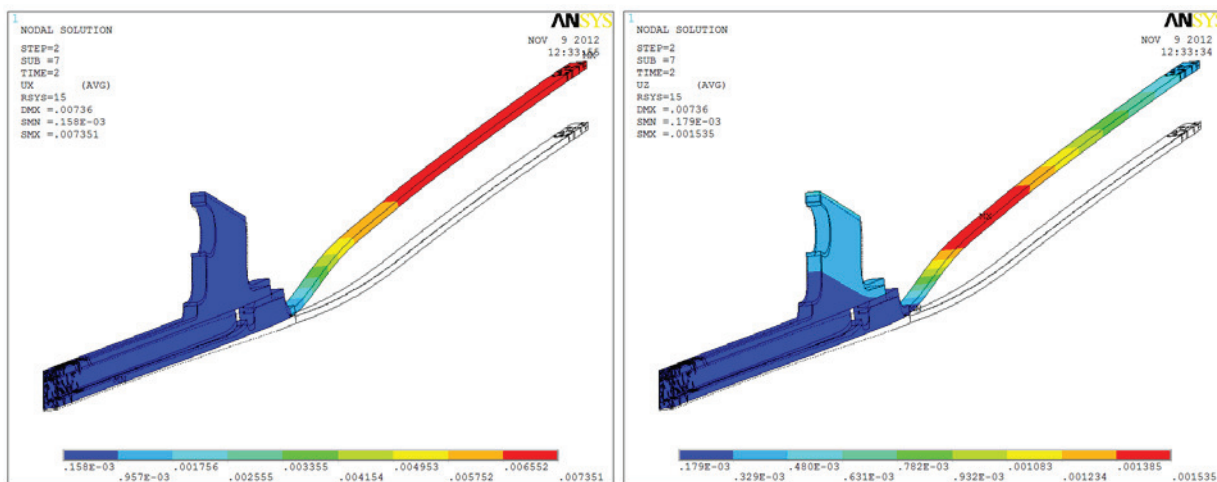


Рис. 16. Радиальные и осевые перемещения на стационарном режиме, м

Остаточные радиальные и осевые перемещения приведены на рисунке 17.

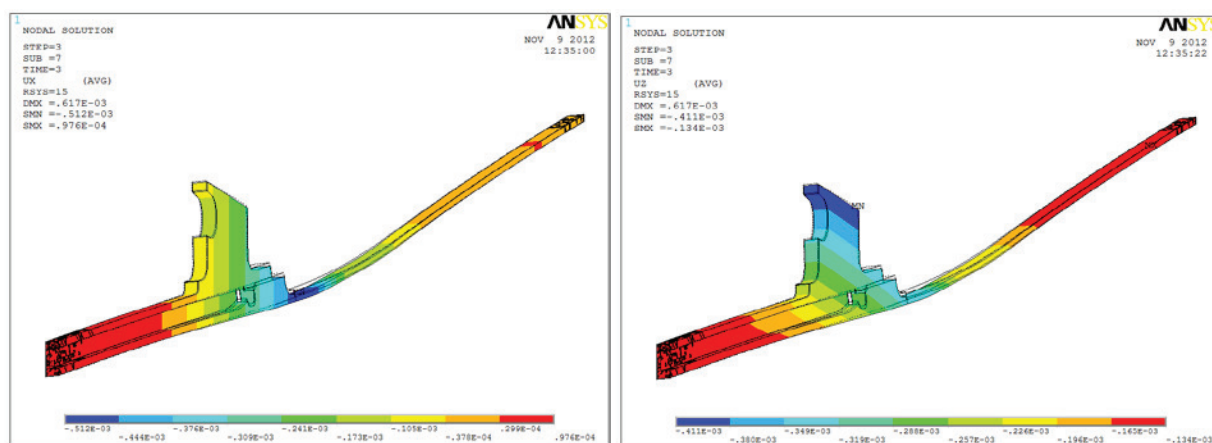


Рис. 17. Остаточные радиальные и осевые перемещения, м

Эквивалентные пластические деформации по Мизесу на газогенераторном режиме приведены на рисунке 18.

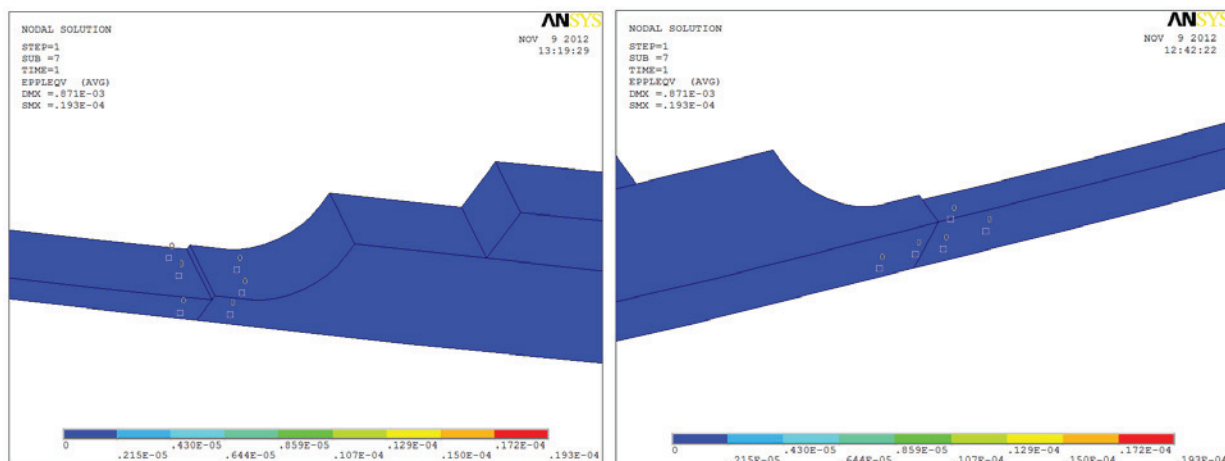


Рис. 18. Эквивалентные пластические деформации по Мизесу на газогенераторном режиме

Эквивалентные напряжения по Мизесу на газогенераторном режиме показаны на рисунке 19.

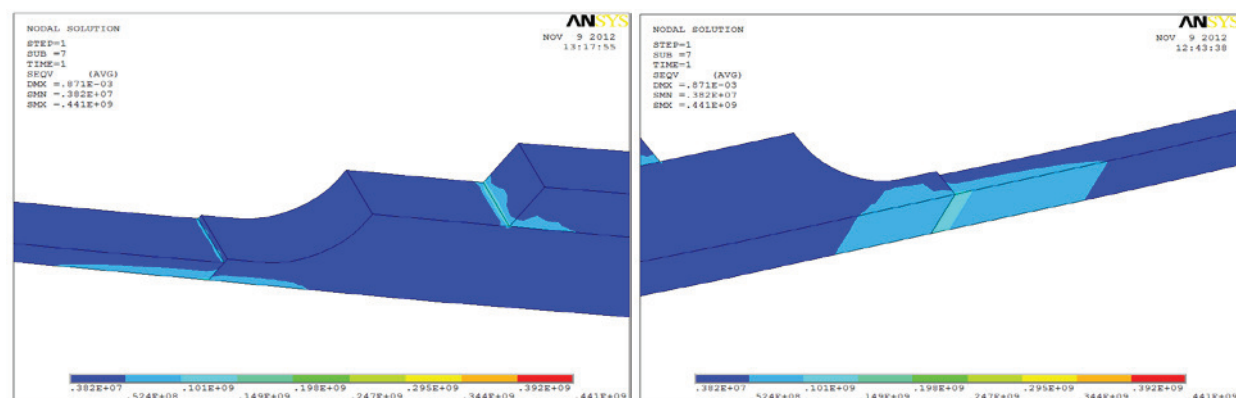


Рис. 19. Эквивалентные напряжения по Мизесу на газогенераторном режиме (захоженная камера), Па

На стационарном режиме эквивалентные пластические деформации по Мизесу приведены на рисунке 20.

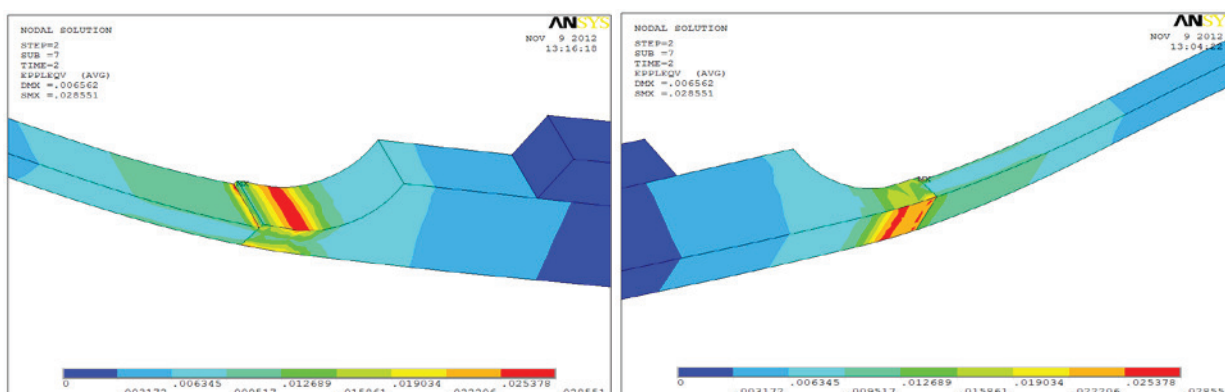


Рис. 20. Эквивалентные пластические деформации по Мизесу на стационарном режиме

Эквивалентные напряжения по Мизесу на стационарном режиме приведены на рисунке 21.

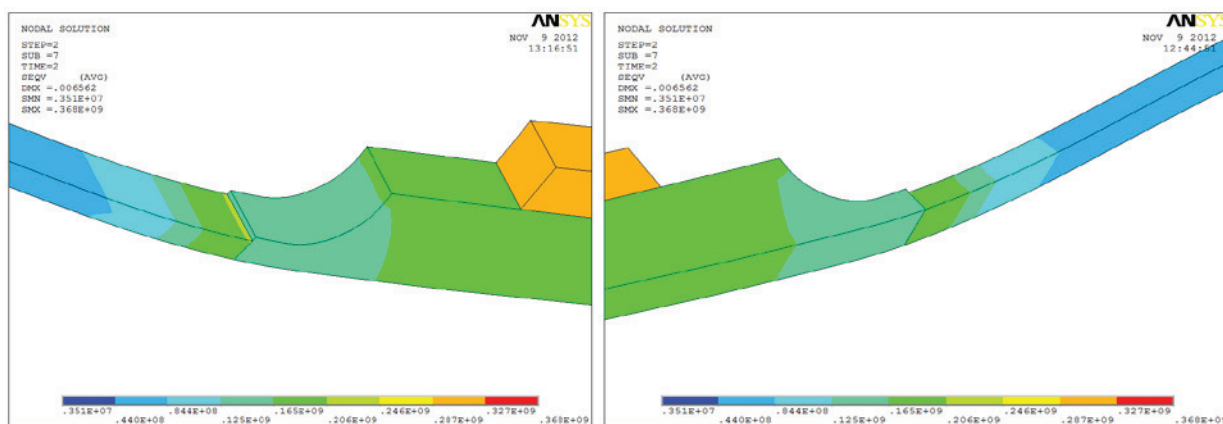


Рис. 21. Эквивалентные напряжения по Мизесу на стационарном режиме, Па

На рисунке 22 приведены остаточные пластические деформации по Мизесу, а на рисунке 23 показаны остаточные эквивалентные напряжения по Мизесу.

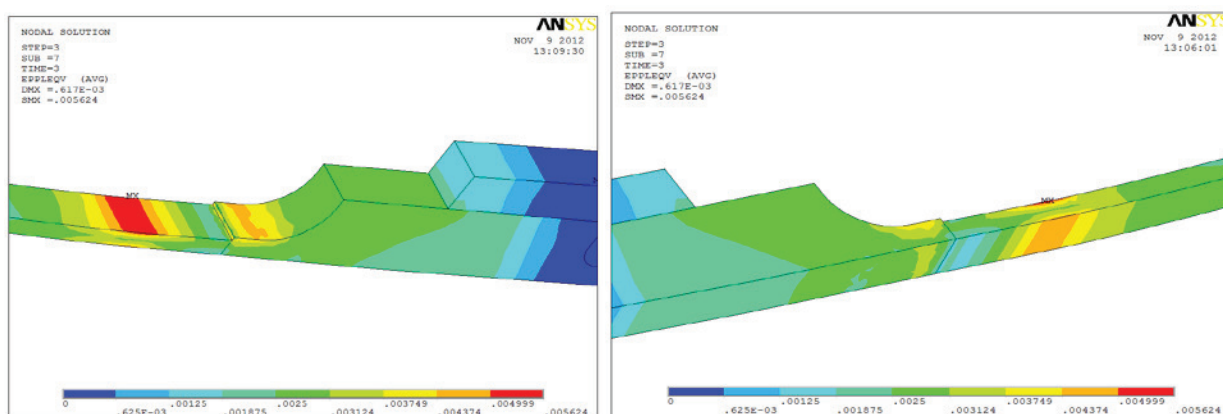


Рис. 22. Остаточные пластические деформации по Мизесу

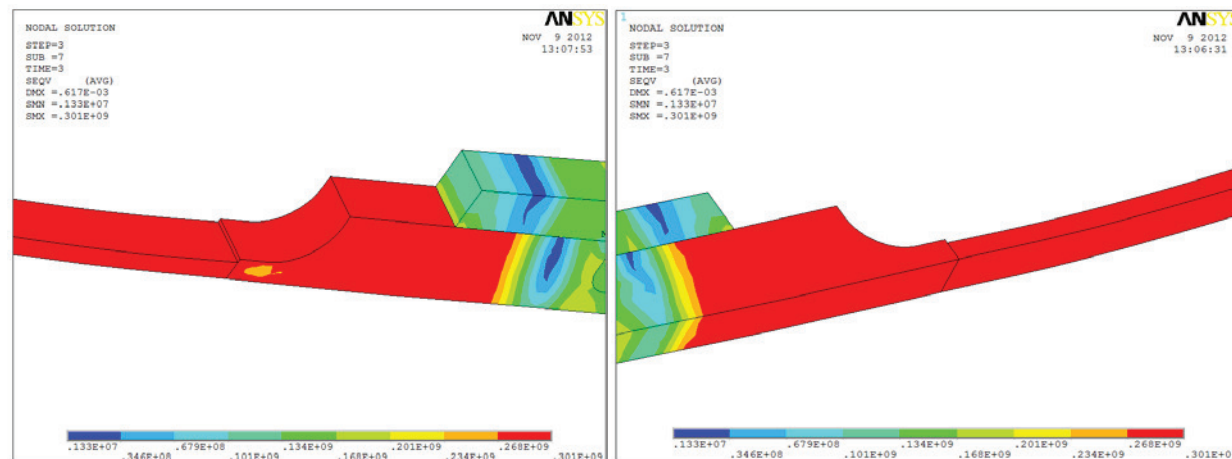


Рис. 23. Остаточные эквивалентные напряжения по Мизесу, Па

График зависимости интенсивности пластической деформации от параметра нагружения (квазивремени) для трех состояний конструкции приведен на рисунке 24 для характерной точки на наружной поверхности на сварном шве. Данный график может быть использован для оценки прочности конструкции при циклическом нагружении.

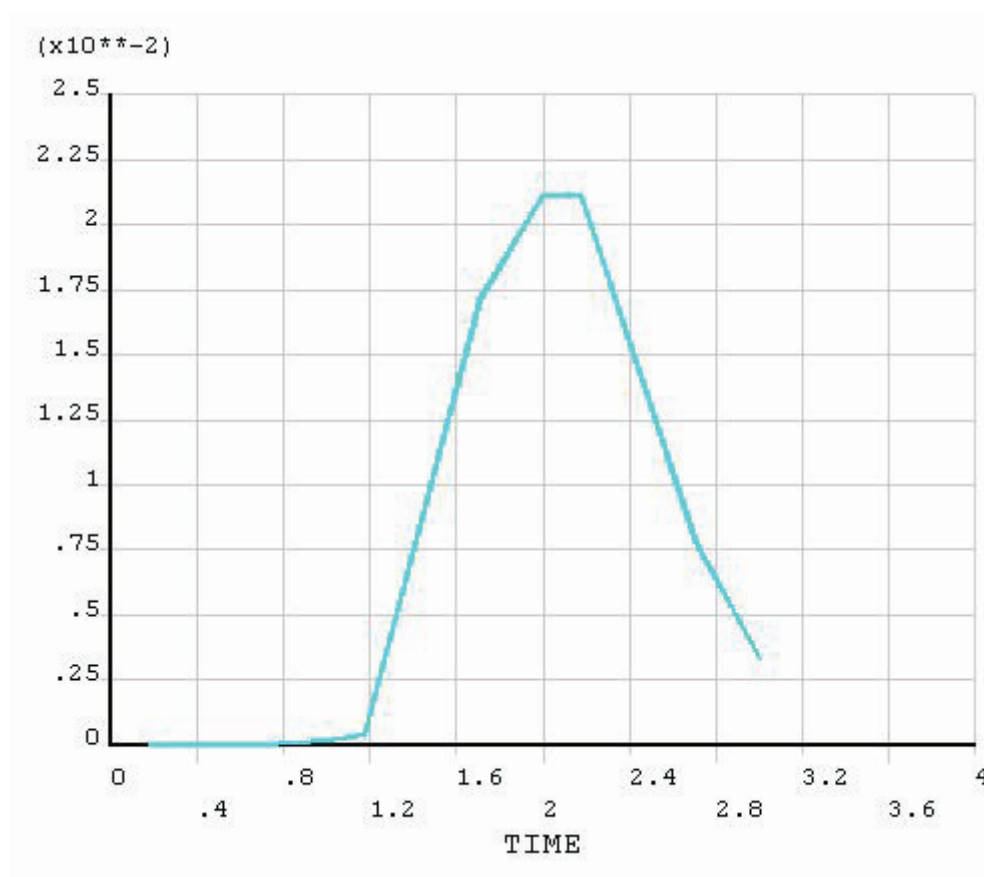


Рис. 24. График зависимости интенсивности пластической деформации от параметра нагружения (квазивремени) для трех состояний камеры, Па

Результаты расчета, выводы и рекомендации представлены в РКК «Энергия».

Предложенная методология применения метода подконструкций показала свою высокую эффективность и может быть использована для решения достаточно широкого круга прочностных задач в различных отраслях техники.

Список литературы

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541с.
2. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. Х.: Основа, 1991. 272с.
3. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212с.
4. Феодосьев В.И.. Прочность камеры жидкостного ракетного двигателя. М., Государственное предприятие оборонной промышленности. 1957

5. Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS. www.ans.ru, 399с.
6. Белкин А.Е., Гаврюшин С.С. Расчет пластин методом конечных элементов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 232с.
7. Короткая О.В., Термопрочностной расчет сопловой части ЖРД с использованием метода подконструкций. // Международный конкурс научных работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Сборник трудов. М.: НИИ электроники и лазерной техники, 2012. С. 263-269.
8. Короткая О.В., Поверочный расчет сопловой части ЖРД с использованием метода подконструкций. // Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», 20-21 апр. 2012 г. Материалы и доклады. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. С. 86-87.