УДК 629.7.023 EDN VWGKLM

Конечно-элементное моделирование двухслойного криогенного бака под жидкий водород

© Ф.Ал. Васильев[1], А.В. Егоров[1, 2]

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация
[2] Московский авиационный институт (МАИ), Москва, 125993, Российская Федерация

Для исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрической обечайки с теплозащитным покрытием в процессе захолаживания бака, предназначенного для жидкого водорода, проведено конечно-элементное моделирование части цилиндрической обечайки такого бака в программном комплексе ANSYS. Исследование выполнено на трансверсально-составном кольцевом элементе, представляющем собой аналог цилиндрической обечайки. Построенная конечно-элементная модель такого кольца состоит из двух твердотельных колец — несущего металлического кольца и кольца из пенопласта, между которыми существует идеальный контакт с односторонней связью без трения, задаваемый в программном комплексе как Frictionless. При построении сетки твердотельных колец использованы восьмиузловые конечные элементы типа SOLID225 в форме параллелепипеда. Конечные элементы данного типа позволяют проводить расчет одновременно для двух различных физических процессов. Вначале определялось поле температур и тепловых потоков, а затем по полученным результатам находили термические деформации в соответствии с механическим нагружением и кинематическими граничными условиями. Схема закрепления трансверсально-составного кольца имитировала деформирование части цилиндрической обечайки бака, поэтому оба слоя одного торца были жестко закреплены, чтобы исключить осевое перемещение и поворот. На другом торце каждый слой составной конструкции оставался плоским и перпендикулярным оси кольца. Внутренняя поверхность составного кольца охлаждалась с 293K до 20K, на внешней поверхности происходил конвективный теплообмен с окружающей средой; учитывалось постоянное внутреннее давление 0,1 МПа. По результатам проведенного расчета установлено, что расслоение трансверсально-составной конструкции происходит вследствие больших термических деформаций, превышающих деформации от воздействия внутреннего давления.

Ключевые слова: *криогенный ракетный бак, захолаживание, напряженно-деформированное состояние, контактная задача, контакт с односторонней связью, метод конечных элементов*

Введение. В инженерной практике все чаще стали использовать конечно-элементные программные комплексы для решения проектных задач. Это связано с тем, что метод конечных элементов (МКЭ) позволяет, в том числе, проводить расчеты для решения задач, в которых исследуются физические процессы различной природы. При этом рассматриваемые объекты исследования могут быть любой геометрической формы, а приложенные нагрузки и характеристики материалов можно задавать изменяющимися в ходе решения. Однако несмотря на обширные возможности использования МКЭ, существует ряд ограничений, которые необходимо учитывать для обеспечения

хорошей сходимости и получения верных результатов решения при минимальных затрачиваемых ресурсах.

Цель данной работы — провести моделирование цилиндрической обечайки двухслойного криогенного бака для жидкого водорода с выбором схемы и шага интегрирования, настройкой параметров контакта, выбором схемы закрепления, заданием нагрузок для решения контактной нестационарной задачи термоупругости методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Задача — исследовать нестационарное напряженно-деформированное состояние криогенного цилиндрического бака, возникающее в процессе захолаживания, а также процесс расслоения трансверсально-составной конструкции.

Расчетная схема конструкции строится на основе следующих допущений:

– характеристики применяемых материалов подчиняются закону Дюамеля — Неймана с коэффициентами линейного температурного расширения, не зависящими от температуры;

– тела изотропные, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости при постоянном давлении и плотности всех материалов, применяемых в конструкции, не зависят от значений температуры;

– клеевым взаимодействием между слоями металла и пенопласта пренебрегается, используется идеальный контакт с односторонней связью без трения;

– наддув захолаживающими газами проводится при постоянном значении давления 0,1 МПа в течение всего времени захолаживания бака;

– зависимость температуры внутренней стенки криогенного бака от времени захолаживания приведена на рис. 1;

– задача осесимметричная.

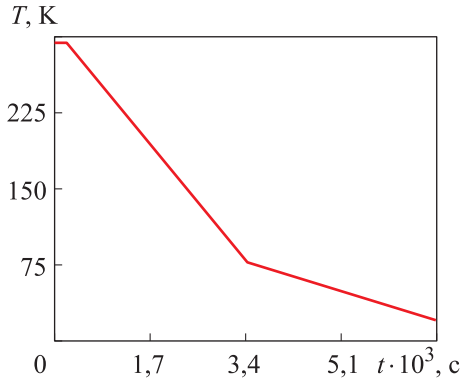


Рис. 1. Температура внутренней поверхности металлической оболочки криогенного бака в зависимости от времени захолаживания

Поскольку в поставленной задаче совмещаются два зависимых между собой расчета — термический расчет и последующий анализ напряженно-деформированного состояния, решение искалось в модуле Coupled Field Transient программного комплекса ANSYS.

Объект исследования. Рассмотрим цилиндрический бак диаметром 4 м и длиной около 5 м со сферическими днищами [1]. Конструкция бака представляет собой несущую металлическую конструкцию, на которую поверх клея напылен слой пенопласта в качестве тепловой защиты [2]. Цилиндрическая обечайка имеет вафельную структуру, что увеличивает жесткость конструкции и минимизирует массу.

В результате расчета бака на прочность и устойчивость были определены следующие параметры вафельной конструкции:

– толщина обечайки 1,2 мм;

– размер клетки 77×77 мм;

– толщина ребра вафельной конструкции, включая обечайку, 8 мм;

– ширина ребра вафельной конструкции 2,6 мм.

Поскольку отношение радиуса к толщине металлической оболочки большое, а также имеется вафельная конструкция, при построении конечно-элементной сетки потребуется большое число конечных элементов. Для того чтобы уменьшить продолжительность вычисления, был рассмотрен не бак целиком, а только часть его цилиндрической обечайки — трансверсально-составной кольцевой элемент, представляющий собой двухслойное кольцо — вафельное металлическое кольцо, поверх которого расположено кольцо из слоя пенопласта (рис. 2, *а*). Однако в качестве математической модели рассматривается все кольцо, а не его часть, в силу возникающих сложностей в схеме закрепления и образования краевых эффектов. Осевая длина модели составляет 470 мм. В рассматриваемой модели вафельной конструкции также пренебрегается галтелями (скруглениями) между гладкой оболочкой толщиной 1,2 мм и ребрами вафли (толщина ребра 8 мм). Схема трансверсально-составного кольца представлена на рис. 2, *б*.

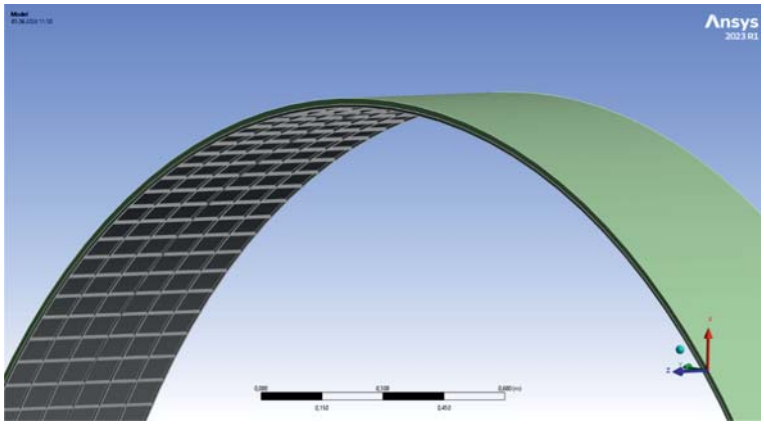
Металлическое кольцо выполнено из термоупрочняемого алюминиевого сплава 1201, характеристики которого зависят от температуры. Механические характеристики сплава 1201 приведены в табл. 1 [3]. Для задания свойств материала были построены диаграммы деформирования [4] для трех значений температур (293K, 77K, 20K), затем полученные по графику числовые значения были заданы в программном комплексе.

Материал теплоизоляционного покрытия — пенополиуретановый пенопласт «Изолан-123», механические характеристики которого были приняты постоянными, не зависящими от температуры:

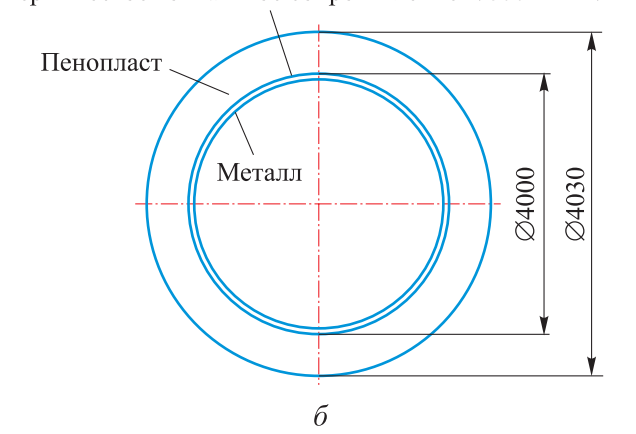
Модуль упругости первого рода E, МПа 50

Напряжения на разрыв σ, МПа 0,25

Коэффициент Пуассона 0,3



а



б

Рис. 2. Модель (*а*) и схема (*б*) трансверсально-составного представительного элемента криогенного бака (двухслойного кольца)

Таблица 1

Механические характеристики алюминиевого сплава 1201 при различных значениях температуры

Характеристика	Температура *T*, К		
	20	77	293
Модуль упругости *E*, ГПа	78,8	77,8	72
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	460	400	350
Предел прочности $\sigma_в$, МПа	650	550	440
Предельное удлинения δ, %	11,5	10	8,5

Для проведения конечно-элементного расчета физические характеристики для алюминия и пенопласта были приняты постоянными, не зависящими от температуры (табл. 2) [4–7].

Таблица 2

Физические характеристики пенопласта типа «Изолан» и алюминиевого сплава 1201

Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость c_p, Дж/(кг·К)	Коэффициент термического расширения α, К$^{-1}$
Пенопласт	50	0,025	1650	$2{,}5\cdot10^{-5}$
Алюминиевый сплав 1201	2850	130	900	$2\cdot10^{-5}$

Между металлическим кольцом и слоем пенопласта был задан контакт как идеальный, с односторонней связью без трения, в программном комплексе — как Frictionless. Контакт данного типа является нелинейным, он рассчитывается за несколько итераций. В программном комплексе контакт моделируется с помощью контактных конечных элементов, т. е. между двумя слоями имитируются пружинки с некоторой жесткостью. Чем меньше жесткость контакта (пружинок), тем лучше сходимость решения, но ниже точность решения и выше значение проникновения одного тела в другое. И наоборот, чем выше значение контактной жесткости, тем хуже сходимость решения, при этом выше точность решения и ниже значение проникновения контактирующих тел.

Алгоритм решения задачи с контактом данного типа был выбран с использованием расширенного метода Лагранжа (Formulation — Augmented Lagrange). Этот метод сочетает в себе метод штрафных функций и метод множителей Лагранжа. На каждой итерации сравнивается проникновение тел с допуском на проникновение, после чего это значение корректируется. В результате обеспечиваются хорошая сходимость задачи и меньшая чувствительность к величине нормальной контактной жесткости.

Значение нормальной контактной жесткости (normal stiffness absolute value) было подобрано так, чтобы решение имело сходимость, поскольку задача склонна к расходимости по силовым факторам и тепловым потокам в момент возникновения расслоения конструкции. Значение жесткости было выбрано равным 600 000 Н/м^3. Кроме того, для улучшения сходимости и гашения колебаний в момент расслоения коэффициент демпфирования (stabilization damping factor) был задан равным единице.

Контактное термическое сопротивление принималось на основе теплопроводности и толщины клеевого соединения между двумя слоями. Несмотря на то что действием клеевого сопротивления в данной задаче пренебрегаем, выбиралось контактное термическое сопротивление $R = 1/600$ м^2·К/Вт [6].

Конечно-элементная модель объекта исследования. В качестве объекта исследования рассматриваются два твердых тела, между которыми контакт с односторонней связью. Твердые тела, представляющие собой металлическую вафельную и пенопластовую обечайки, разбивались на объемные конечные элементы типа SOLID225. Были выбраны твердотельные конечные элементы, чтобы смоделировать вафельную конструкцию металлической обечайки. Тип конечных элементов SOLID225 предназначен для решения задач, сочетающих различные по природе физические процессы, его можно применять в задачах с большими деформациями и нелинейным поведением материалов. В рассматриваемой конструкции задача теплопроводности решается совместно с задачей деформирования тела с учетом нелинейного поведения металла. Внутренние опции выбранных конечных элементов (keyopt) были заданы следующими [8, 9]:

– keyopt (1) = 11 — означает использование элементов в структурно-термическом анализе;

– keyopt (2) = 1 — показывает слабую векторную связь;

– keyopt (6) = 0 и 2 для различных конечных элементов — показывает особенность метода интегрирования (полное интегрирование либо более точная методика вычисления деформации);

– keyopt (9) = 1 — означает отсутствие термоупругого демпфирования;

– все остальные параметры нулевые.

Конечные элементы имеют форму параллелепипедов с восемью узлами. Суммарное число конечных элементов составило 334 004, суммарное число узлов — 628 008. Конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца представлена на рис. 3.

Для того чтобы разбить металлическое кольцо с вафельной структурой на упорядоченные конечные элементы, имеющие форму параллелепипедов, все кольцо было разбито на элементарные парты (части),

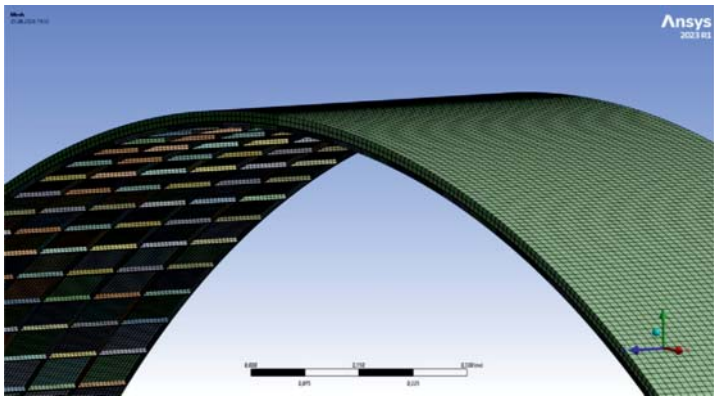
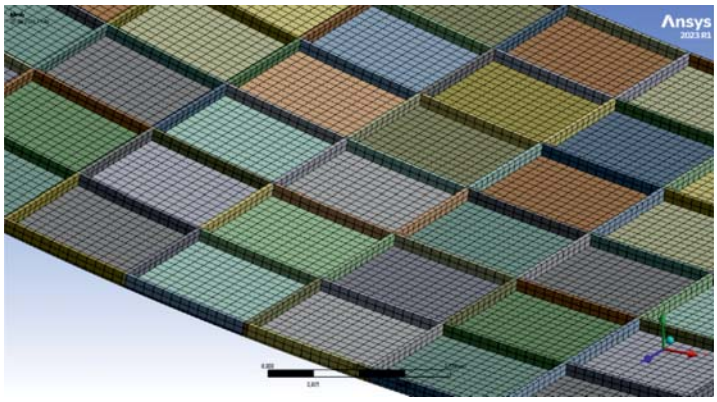
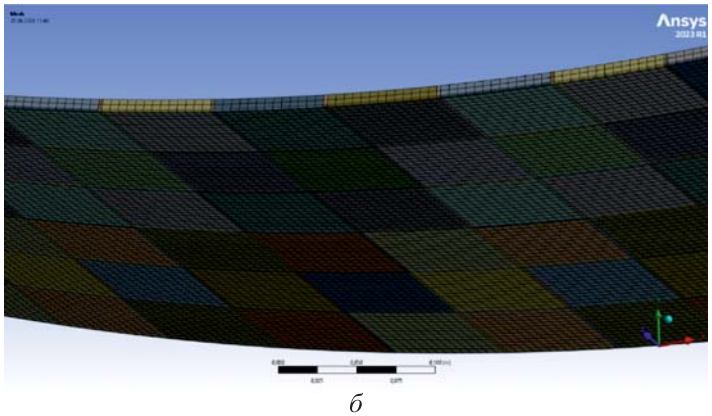


Рис. 3. Конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца

состоящие из частей ребра и частей тонкостенной оболочки. Затем все парты собирались в единую конструкцию с помощью команды Share в редакторе объемной геометрии (в данном случае — Discovery Workbench). На таких элементарных частях КЭ-сетка принимает структурированный вид, а конечные элементы имеют форму параллелепипеда. Для выбора линейного типа конечного элемента (восьмиузлового) в настройке Element order был выбран тип Linear. Размер конечного элемента металлического кольца был задан равным 6 мм, в результате чего максимальное отношение линейных размеров конечного элемента составляет не более 1:5, что является предельно допустимым. На ребрах отношение линейных сторон конечных элементов не превышает 1 : 3. Конечно-элементная сетка вафельного металлического кольца приведена на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Конечно-элементная модель вафельного кольца:
а — вид внутренней поверхности; *б* — вид внешней поверхности

Поскольку слой пенопласта представляет собой гладкое кольцо, для построения структурированной конечно-элементной модели он был разбит на четыре парта относительно плоскостей симметрии *Oxz* и *Oyz*. Затем, по аналогии с построением для металлического кольца,

эти парты слоя пенопласта были собраны в единую конструкцию с помощью команды Share. Это позволило создать структурированную и симметричную конечно-элементную сетку. Тип конечных элементов и их форма соответствуют типу и форме конечных элементов, на которые разбито металлическое кольцо. Размер конечных элементов в слое пенопласта был задан в 2 раза больше размера конечных элементов, на которые было разбито металлическое кольцо, и он составил 12 мм. Конечно-элементная модель слоя пенопласта представлена на рис. 5.

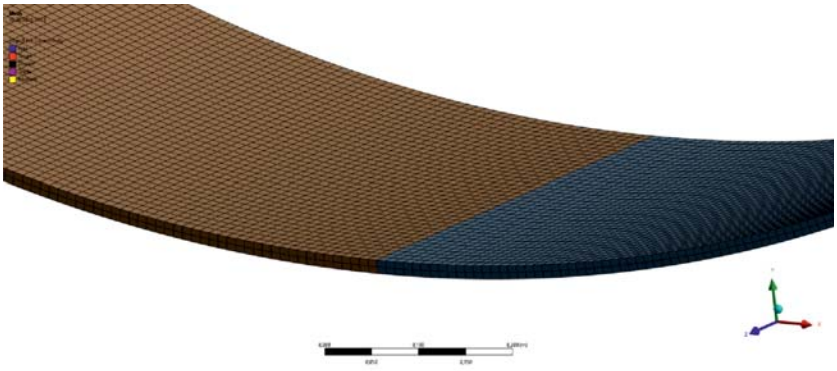


Рис. 5. Конечно-элементная модель слоя пенопласта

Поскольку исследуется контактная задача, в конечно-элементной модели должны присутствовать контактные конечные элементы. Применительно к данной задаче по умолчанию был выбран тип контактных конечных элементов TARGE170 — для целевого тела (металлического кольца), CONTA174 — для контактного тела (кольца из пенопласта).

Для моделирования нагрузок в трехмерном анализе вводятся специальные конечные элементы, которые отвечают за эффекты на поверхностях объемных тел. В рассматриваемой задаче среди таких конечных элементов применяются SURF152 и SURF154.

Схема закрепления объекта исследования. В связи с тем что объект исследования представляет собой часть цилиндрической обечайки составного криогенного бака, схема закрепления должна обеспечить:

– запрет на перемещение и вращение объекта исследования как жесткого целого;

– имитацию вырезанной части цилиндрической обечайки недопущением возникновения силовых и кинематических краевых эффектов на торцах трансверсально-составного кольца;

– возможность радиального и осевого деформирования конструкции.

Исходя из перечисленных требований для сохранения симметричной картины напряженно-деформированного состояния была выбрана симметричная схема закрепления и использована цилиндрическая система координат.

Для того чтобы не допускать перемещение и вращение трансверсально-составной конструкции как жесткого целого, а также проскальзывание одного слоя относительно другого, было ограничено перемещение и вращение поверхности левого торца металлического слоя (ме) и слоя пенопласта (пп), т. е. $z = 0$, $\varphi = 0$. Так закрепление располагается по всей окружности (рис. 6), т. е. принимает симметричный вид и не нарушает симметрию распределения параметров напряженно-деформированного состояния. Закрепление распространяется на торцевую поверхность, чтобы не возникало моментного состояния на левом торце, иначе проявится краевой эффект, вследствие чего нарушится имитация вырезанной части обечайки.

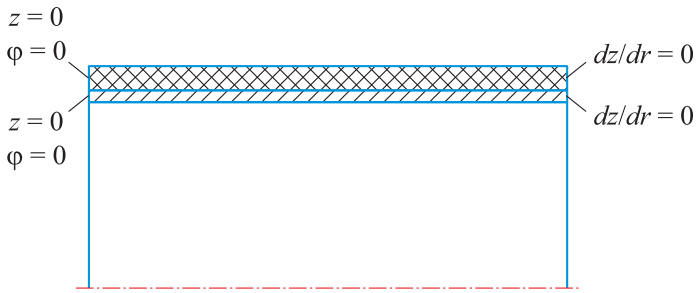


Рис. 6. Схема кинематических граничных условий, заданных на трансверсально-составном кольце

Для имитации части обечайки, далеко расположенной от шпангоутов, также необходимо ввести граничное условие на правом торце, суть которого заключается в сохранении плоскостности торцевых поверхностей каждого слоя. Выбранные граничные условия предполагают, что на левом торце осевые перемещения торцевых поверхностей равны нулю, а на правом торце они могут принимать различные значения. При этом торцевые поверхности слоев должны сохранять плоскостность для имитации части обечайки и недопущения краевых эффектов. Данные кинематические граничные условия можно записать в следующем виде:

$$z_{\text{ме}}(0) = z_{\text{пп}}(0) = 0,\ \varphi_{\text{ме}}(0) = \varphi_{\text{пп}}(0) = 0,$$

$$\frac{\partial z_{\text{ме}}}{\partial r}\Big|_{z=L} = \frac{\partial z_{\text{пп}}}{\partial r}\Big|_{z=L} = 0.$$

Таким образом, граничные условия дают возможность конструкции деформироваться в осевом направлении. В программном комплексе ANSYS это граничное условие реализуется через равенства степени свободы вдоль оси z каждой торцевой поверхности. Для этого необходимо применить функцию Coupling (Beta), а также выбрать требуемую поверхность и степень свободы, вдоль которой должна сохраниться плоскостность. Выбранная схема закрепления (см. рис. 6) позволяет конструкции деформироваться как в радиальном, так и в осевом направлении, причем краевые эффекты не будут возникать.

Нагрузки на конструкцию. На трансверсально-составное кольцо действуют такие же нагрузки, как и на реальный объект исследования — криогенный бак для жидкого водорода. Среди прикладываемых нагрузок следует выделить механические (внутреннее давление) и температурные (изменение температуры внутренней металлической поверхности).

Внутреннее давление наддува p, равное 0,1 МПа, имитирует давление захолаживающих газов. Поскольку в полной конструкции криогенного цилиндрического бака данное давление наддува действует и на днища, представляющие собой сферические сегменты радиусом R, цилиндрическая металлическая обечайка будет дополнительно растягиваться. В соответствии с безмоментной теорией расчета тонких оболочек значение растягивающей силы F можно рассчитать по формуле

$$F = pS = p\pi R^2.$$

Эта сила, равная 1256 кН, равномерно прикладывается ко всей поверхности правого торца металлического кольца. Осевые сжимающие силы, перерезывающие силы и изгибающие моменты, вызванные внешним механическим воздействием на стартовом столе (сила тяжести головной части, ветровая нагрузка), не учитываются.

Изменение температуры на внутренней поверхности металлического кольца происходит в интервале от 293K до 20K, что имитирует захолаживание криогенного бака. Зависимость температуры от времени захолаживания, которая задается в виде функции в программном комплексе, представлена на рис. 1. Кроме того, на внешней поверхности слоя пенопласта учитывается конвективный теплообмен с окружающей средой, температура $T_{ср}$ которой принимается равной 20 °C, коэффициент теплоотдачи a был задан постоянным и равным 30 Вт/(м^2·K). Ранее было отмечено, что контактное термическое сопротивление между слоями принято равным 1/600 м^2· K/Вт. Схема всех приложенных нагрузок показана на рис. 7.

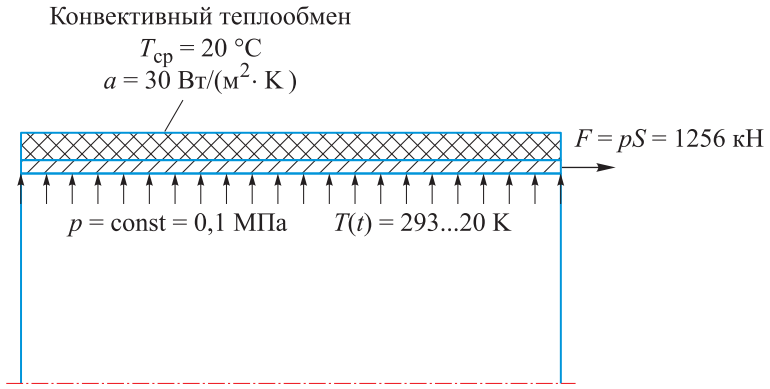


Рис. 7. Схема механических и температурных нагрузок, действующих на составное кольцо

Методика и особенности проведения расчета. Рассматриваемая задача является нестационарной задачей термоупругости, поэтому она решается в нестационарной постановке. При расчете было задано 65 итераций на всем временном интервале захолаживания. Данное число было получено опытным путем. Если ввести меньшее число итераций, снизится точность решения задачи, если большее — некоторые итерации будут попадать в моменты времени переходного процесса, т. е. момент расслоения, когда производные устремляются в бесконечность, а значит, задача не имеет сходимости. Так как изучение переходного процесса не является целью исследования, этот момент не рассматривается, причем решение интерполируется, переходя данный процесс с достаточной точностью.

В настройках тип решателя выбран по умолчанию, допустимы большие перемещения, а также отключены небольшие пружинки для улучшения сходимости. При контроле сходимости задачи невязка по силовым факторам и перемещениям выбирается автоматически по умолчанию в процессе решения, а невязка по тепловым потокам задана не более 6 Вт. Это сделано для того, чтобы задача сошлась по тепловым потокам в момент возникновения расслоения с приемлемой точностью.

Заключение. Построенная конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца позволяет исследовать поведение двухслойного криогенного бака под жидкий водород. Такие баки находят применение и в транспортной технике, что обусловливает актуальность модели. Предложенная расчетная схема дает возможность учесть характерные для подобных конструкций температурные и силовые нагрузки, включая внутреннее переменное охлаждение и наружный конвективный теплообмен с окружающей средой, а также давление наддува.

Разработанная компьютерная программа в ANSYS на базе конечно-элементной модели была применена для расчета цилиндрического криогенного бака с алюминиевым лейнером и пенопластовой теплозащитой. Представленный расчет показал, что существует возможность нежелательного расслоения рассмотренной составной конструкции. Для того чтобы установить эффект расслоения, связанного с нелинейным деформированием металлической оболочки, решалась контактная задача с односторонней связью без трения. Полученные результаты могут быть полезны специалистам в области проектирования ракетно-космической техники, например, в области проектирования составных тонкостенных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Егоров А.В., Васильев Ф.Ал. Конструктивное исполнение криогенных топливных баков для ракетной техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 1. EDN ZVKZTO

[2] Булатов Г.А. *Пенополиуретаны и их применение на летательных аппаратах*. Москва, Машиностроение, 1970, 230 с.

[3] Мишин В.П., Карраск В.К., ред. *Основы конструирования ракетносителей космических аппаратов.* Москва, Машиностроение, 1991, 416 с.

[4] Каблов Е.Н. *Конструкционные композиционные материалы*. Москва, ФГУП ВИАМ, 2012, 58 с.

[5] Свойства материалов. *Thermalinfo.ru* URL: http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/ (дата обращения 11.08.2024).

[6] Абелиов Я.Л. Наполнители для теплопроводящих клеев. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 8, с. 26–27.

[7] Чэнь Я., Мараховский П.С., Малышева Г.В. Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения. *Труды ВИАМ*, 2018, № 9, ст. 12, с. 119–123.

[8] Басов К.А. *ANSYS в примерах и задачах*. Москва, КомпьютерПресс, 2002, 224 с.

[9] Ansys Help. *ANSYS* URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_SOLID225.html (дата обращения 22.06.2026).

Статья поступила в редакцию 15.07.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Васильев Ф.Ал., Егоров А.В. Конечно-элементное моделирование двухслойного криогенного бака под жидкий водород. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 10. EDN VWGKLM

Васильев Федор Алексеевич — аспирант кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: Fedorxx@inbox.ru

Егоров Антон Витальевич — д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители», МГТУ им. Н.Э. Баумана; профессор кафедры 921 МАИ. e-mail: antegor177@mail.ru

Finite Element Modeling of a Two-Layer Cryogenic Tank for Liquid Hydrogen

© F.A. Vasiliev, A.V. Egorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper examines finite element modeling of a portion of the cylindrical shell of a cryogenic liquid hydrogen tank using the ANSYS software package. The objective is to analyze the stress-strain state of the cylindrical shell with a heat-protective coating during tank cooldown. The study is conducted on a transversely composite ring element, which represents a portion of the cylindrical shell. The finite element model of this ring consists of two solid rings (a supporting metal ring and a foam ring) between which there is ideal frictionless one-way contact, defined in the software package as Frictionless. Both solid rings have a finite element mesh constructed from eight-node SOLID225 parallelepiped finite elements. This type of finite element allows for simultaneous calculations for two different physical processes. First, the temperature and heat flux fields are determined. Then, based on the obtained results, thermal deformations are determined in accordance with mechanical loading and kinematic boundary conditions. The clamping scheme of the transversely composite ring simulates the deformation of a portion of the cylindrical shell of a tank. Therefore, both layers at one end are rigidly secured against axial movement and rotation, while at the other end, each layer of the composite structure remains flat and perpendicular to the ring axis. The inner surface of the composite ring is cooled from 293K to 20K, while convective heat exchange with the environment occurs on the outer surface, taking into account a constant internal pressure of 0.1 MPa. The calculation results show that delamination of the transversely composite structure occurs due to large thermal deformations exceeding those caused by internal pressure.

Keywords: *cryogenic rocket tank, chilldown, stress-strain state, contact problem, one-way contact, finite element method.*

REFERENCES

[1] Egorov A.V., Vasiliev F.Al. Konstruktivnoe ispolnenie kriogennykh toplivnykh bakov dlya raketnoy tekhniki [Design of a Cryogenic Fuel Tank for the Rocket Technology]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 1. EDN ZVKZTO..

[2] Bulatov G.A. *Penopoliuretany i ikh primenenie na letatelnykh apparatakh* [Polyurethanes and Their Application on Aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 231 p.

[3] Mishin V.P., Karrask V.K., eds. *Osnovy konstruirovaniya raket-nositeley kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of Designing Launch Vehicles for Spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 416 p.

[4] Kablov E.N. *Konstruktsionnye kompozitsionnye materialy* [Structural Composite Materials]. Moscow, FGUP VIAM Publ., 2012, 58 p.

[5] Svoystva materialov [Properties of Materials]. *Thermalinfo.ru.* Available at: http://thermalinfo.ru (accessed August 11, 2024).

[6] Abelov Ya.L. Napolniteli dlya teploprovodyashchikh kleev [Fillers for Thermally Conductive Adhesives]. Klei. Germetiki. Tekhnologii — Adhesives. Sealants. Technologies, 2005, no. 8, pp. 26–27.

[7] Chen Ya., Marakhovskiy P.S., Malysheva G.V. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv epoksidnykh materialov v protsesse ikh otverzhdeniya [Determination

of Thermophysical Properties of Epoxy Materials During Their Curing]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, no. 9, art. 12, pp. 119–123.

[8] Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in Examples and Problems]. Moscow, KompyuterPress Publ., 2002, 224 p.

[9] Ansys Help. *ANSYS*. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_SOLID225.html (accessed June 22, 2026).

Vasiliev F.A., Postgraduate Student, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: Fedorxx@inbox.ru

Egorov A.V., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University; Professor, Department 921, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: antegor177@mail.ru