

На правах рукописи



Пронина Полина Федоровна

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ**

Специальность

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Тушавина Ольга Валериановна,** кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Попов Виктор Сергеевич,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Угланов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита диссертации состоится 22 декабря 2023 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.13, при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993 Москва, Волоколамске шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МАИ по адресу: 125993, Москва, Волоколамске шоссе, д.4, а также на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=176804

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.13, к.т.н.



Орехов Александр Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Необходимой предпосылкой надежного функционирования космического аппарата (КА), его систем, установленной на нем научной аппаратуры является обеспечение необходимого теплового режима всех его элементов.

Математическое моделирование теплообмена большинства типов КА связано с рядом трудностей, обусловленных сложностью и значительной неопределенностью протекания физических процессов внешнего и внутреннего теплообмена между элементами КА. В связи с этим большое значение при создании КА имеет его тепловая отработка, представляющая собой совокупность физических экспериментов (испытаний) и проводимых на основе их результатов мероприятий по доработке (в случае необходимости) средств обеспечения функционирования, а иногда и конструкции аппарата.

Подобные испытания могут проводиться на различных стадиях создания КА начиная с этапа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до летно-конструкторских испытаний. Для начальной стадии разработки КА характерны эксперименты, связанные с поиском и отработкой новых методов, схемных и конструктивных решений задачи обеспечения теплового режима КА в целом или его отдельных частей, а также эксперименты, проводимые с целью подтверждения возможности получения требуемых технических характеристик систем КА. На последующих стадиях разработки КА этапы испытаний отражают один из принципов отработки техники в направлении от «простого к сложному». Этот принцип требует постепенного укрупнения и усложнения обрабатываемых частей КА.

На сегодняшний день главными элементами системы обеспечения теплового режима (СОТР) являются подсистемы теплозащиты. В зависимости от целей и задач можно заметить различные варианты подсистем теплозащиты, разных по конструктивному выполнению и принципу действия. Подсистемы теплозащиты должны обеспечивать необходимую температуру внутренних

поверхностей. Одной из основных составляющих системы обеспечения теплового режима космического аппарата является экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ). Рассматривая ее как одну из подсистем теплозащиты, следует отметить, что она является самым результативным методом защиты от внешних тепловых потоков, поступающих от солнца, планет, а также излучения наружных поверхностей элементов КА. Именно ее использование позволяет снизить лучистый теплообмен КА с внешней средой.

Поэтому развиваемые в настоящей диссертации методы математического моделирования таких конструкций, а также результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий и исследования влияния излучения на физико-механические характеристики материалов являются **актуальными**.

Целью диссертационной работы является исследование динамического поведения многослойных покрытий для оценки распределения температурных потоков в ЭВТИ, а также исследование влияния ионизирующего излучения на физико-механические характеристики теплоизоляции.

Задачи работы

Цель диссертационной работы достигается в результате последовательного решения следующих задач:

- разработка математической модели, описывающей динамическое поведение элементов экранно-вакуумной теплоизоляции под действием температурного поля;
- исследование анализа структуры поверхности ЭВТИ;
- проведение испытаний на растяжение и определение физико-механических характеристик;
- анализ влияния излучения на физико-механические характеристики ЭВТИ с учетом деградации свойств ее элемента;
- численное моделирование элементов теплоизоляции и сравнение полученных результатов с аналитическими решениями.

Научная новизна

- построена математическая модель описывающая динамическое поведение экранно-вакуумной теплоизоляции;
- впервые исследовано влияние излучения на деградацию свойств элемента ЭВТИ;
- получена конечно-элементная модель описывающая динамическое поведение экранно-вакуумной теплоизоляции;

Теоретическая значимость работы определяется её научной новизной.

Практическая значимость работы определяется использованием полученных результатов в разработке современных элементов экранно-вакуумной теплоизоляции, а также аналогичных слоистых теплозащитных покрытий. Полученный результат использовался при создании новых высокотехнологических изделий, что подтверждается актом внедрения.

Объектом исследования в данной работе являются ЭВТИ и изделия схожие с ними.

Предметом исследования является многослойные теплозащитные покрытия типа ЭВТИ.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в диссертации задач использовались:

- аналитические и численные методы математического моделирования;
- при проведении экспериментальных исследований использовались стандартизированные методики испытаний на растяжение и соответствующие им оборудование;
- для реализации разработанной математической модели использовалось интегральное преобразование Лапласа по времени и классические методы математической физики.
- для разработки программ и проведения вычислительных экспериментов использовался язык программирования Maple и Wolfram Mathematica;

— численное моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов в среде Ansys Workbench.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, подтверждается удовлетворительным совпадением результатов вычислительных экспериментов, проведённых с использованием разработанных моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ. Достоверность численных расчетов оценивалось путем варьирования размера конечно-элементной сетки, а также сопоставлением полученных решений с решением в рамках упрощённых аналитических моделей.

Все результаты, изложенные в диссертации лично получены автором, либо при его непосредственном участии. Полученный результат использовался при создании новых высокотехнологических изделий, что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы

Основные научные результаты работы докладывались на 4 научно-технических конференциях. В частности:

1. «II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». Москва, МАИ, 16 ноября 2021 г. Тема доклада: Математическое моделирование теплового излучения при высокоскоростном обтекании космических аппаратов;
2. «XII Международная научно-практическая конференция, посвященная 160-летию Белорусской железной дороги». В 2-х частях. Гомель, 2022. Тема доклада: Экранно-вакуумная теплоизоляция для космических аппаратов;
3. «XXVIII Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова». Москва, 2022. Тема доклада: Исследование влияния излучения на физико-механические характеристики экранно-вакуумной теплоизоляции;
4. «Юбилейная Международная научно-практическая конференция, «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов», посвященной 70-летию БИИЖТа-БелГУТа. В 2-х частях. Гомель,

2023 г. Тема доклада: Расчетно-экспериментальные методы исследования экранно-вакуумной теплоизоляции.

Содержание диссертации изложено в 14 публикациях: 5 научные работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 5 работ опубликовано в издании, цитируемом в базе данных Scopus и 4 тезиса доклада по материалам конференций, в том числе международных.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 165 страниц основного текста, 45 рисунков, 8 таблиц, списка литературы из 105 наименований и одного приложения;

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, обоснована актуальность диссертационного исследования, научная новизна, достоверность и обоснованность результатов, а также теоретическая и практическая значимость работы. Кратко охарактеризованы методы теоретического и экспериментального исследований.

В первой главе диссертации представлен краткий аналитический обзор используемых в настоящее время экранно-вакуумных теплоизоляций, структура ее пакетов, эксплуатационные параметры, технические особенности, теплофизические параметры при различных температурных интервалах, методы определения теплопроводности и сравнительный анализ различных ЭВТИ.

Показано, что к самому из распространенных и надежных средств пассивной тепловой защиты относится ЭВТИ, которая позволяет уменьшить лучистый теплообмен КА с внешней средой и является защитой от излучения поверхностей КА, планет, солнца и т.д.

Из анализа литературных данных следует что наибольший научный вклад в разработку ЭВТИ внесли такие ученые как: Жунь Г. Г., Зеленов И.А., Крестов Ю.В., Мануйлов К. К., Матвеев С.Г., Пожидаев Е.Д., Саенко В.С., Тютнев А.П., Соколов А.Б., Аристов В.Ф., Чайкин К.Ю., Штайнгардт И.Х., Якубович М.М., и

др. Экспериментальные исследования проводили: С. Дай, А. Копелов, Г.Л., Лебедев В. А., Ермолаев Г. В., Лой С. А., Матвиенко, М. В., и др. Математическим моделированием слоистых структур ЭВТИ занимались: Алифанов О. М., Формалев В. Ф., Козлов Л.В., Нусинов М.Д. и др. Однако мало исследованы математические модели слоистых теплозащитных конструкций в нестационарной постановке и практически не изучено влияние ионизирующего излучения на физико-механические характеристики элемента ЭВТИ. Этим направлениям исследования посвящена представленная к защите работа.

Во **второй главе** диссертации описано экспериментальное исследование элемента ЭВТИ. Определяются физико-механические характеристики образцов производства НПП Полипен марки ПМ-1ЭУ-ОА с алюминиевым покрытием. Образцы вырезались из полиимидного металлизированного рулона шириной 600 мм.

Образцы для механических испытаний вырезались габаритами 25ммx100мм. До механических испытаний проводились структурные исследования пленки с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Структурные исследования. Для определения микроструктуры и химического состава использовался растровый электронный микроскоп Karl Zeiss Evo 40. По результатам исследования структуры для образцов проверялись характерные размеры слоев, а также наличие дефектов. Для проверки исследуемых материалов, заявленных производителями, а также исключением нежелательных элементов проводился химический анализ с использованием детектора X-Мах и программным обеспечением Aztec.

Механические исследования ЭВТИ определялись в квазистатических испытаниях на растяжение, из которых определялся предел прочности и эффективный модуль упругости материала.

Все квазистатические испытания проводились на универсальной электромеханической машине Instron 5969. Скорость движения траверсы в испытаниях на растяжение составляла 0,5 мм/мин. В связи с тем, что образец

имел зеркальную поверхность, то использование видеоэкстензометра не представлялось возможным. Для определения истинных деформаций определялась кривая податливости, с учетом которой определялись истинные деформации путем вычитания из основных полученных результатов значения податливости. Для предотвращения разрушения образца в захватах он фиксировался в прорезиненных губках.

Для определения механических свойств проводились испытания на образцах с геометрическими параметрами длиной $L = 100$ мм и шириной $b = 25$ мм. Образцы до испытаний представлены на Рисунке 1. Всего было испытано по 3 однотипных образца. Образец в захватах представлен на Рисунке 2.

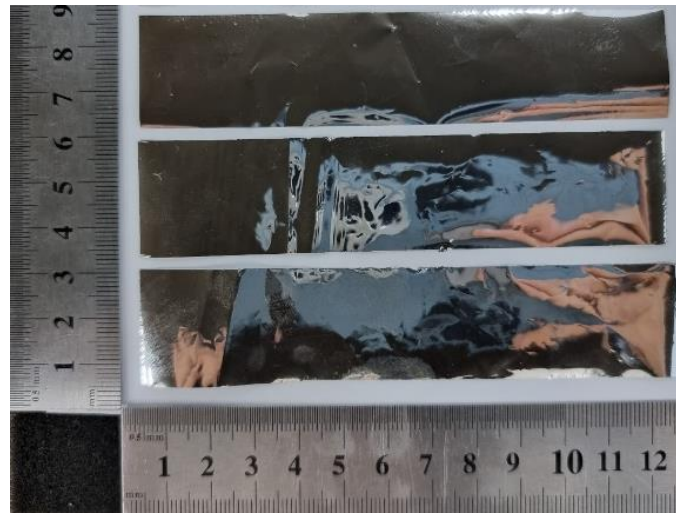


Рисунок 1 – Образцы до испытаний.

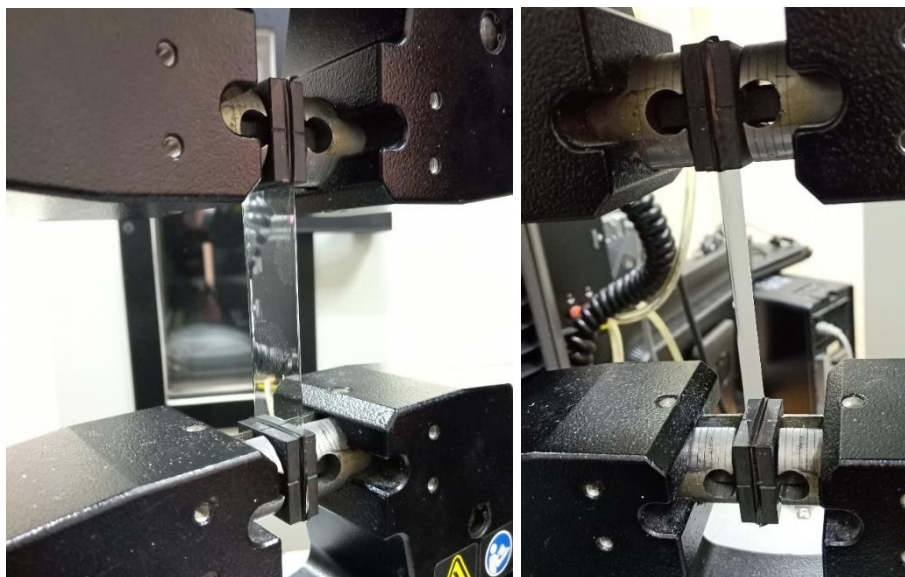


Рисунок 2 – Установленный образец в испытательной машине.

Получена диаграмма напряжения – деформации, определенная в испытаниях на растяжение для образца, представленная на Рисунке 3.

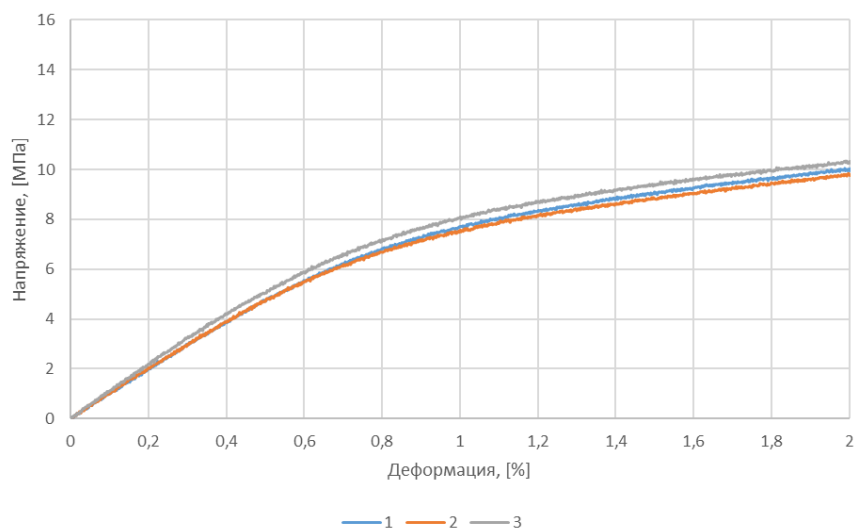


Рисунок 3 – Диаграмма напряжение - деформация, определенная на испытаниях на растяжение образца

Из полученного графика был определен модуль упругости равный 9,72 ГПа, а предел прочности составил 13,8 МПа. Коэффициент вариации для этой партии составлял ~3%.

Влияние излучения на физико-механические свойства

Проводилось исследование влияния излучения на механические характеристики образцов. Облучение проводилось на линейном ускорителе электронов LINS-03-350 (фирмы RadiaBeam Systems, США) с горизонтальным не сканируемым пучком при энергии 3 МэВ, длительности импульса 4 мкс и частоте повторения импульсов 50 Гц. Доза за импульс при воздушном зазоре 26 см составляла $2,7 \pm 0,1$ Гр. Облучение проводилось на воздухе при температуре 295 К. Схема излучения и сама установка показана на Рисунке 4.

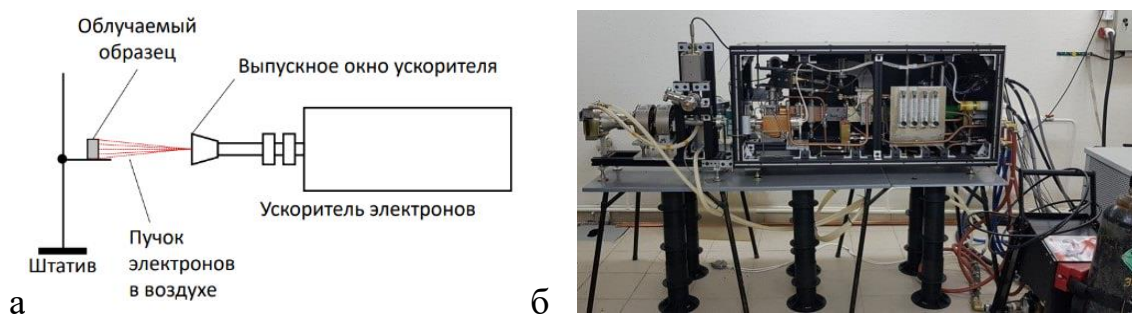


Рисунок 4 – Структурная схема (а) и фото(б) ускорителя ионов.

Испытания после излучения проводилось при тех же условиях, что и для образцов без излучения. С использованием одного и того же оборудования. Диаграмма напряжения – деформации, определенная в испытаниях на растяжение представлена на Рисунке 5.

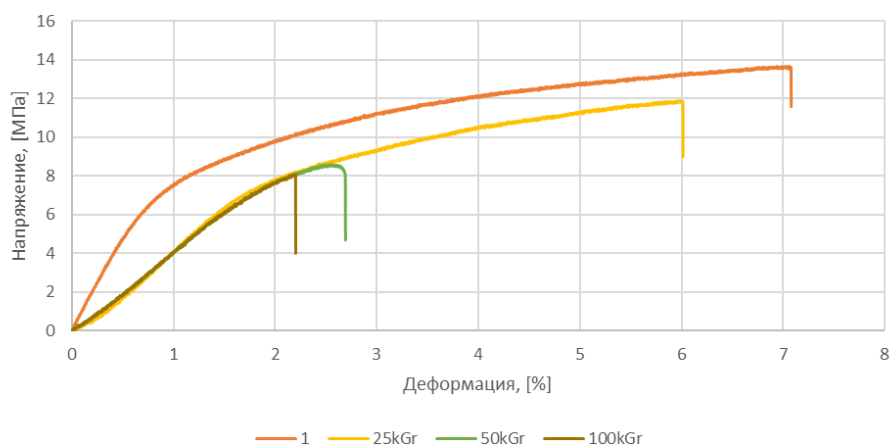


Рисунок 5 – Диаграмма напряжение - деформация, определенная на испытаниях на растяжение образцов для средних значений каждой рассматриваемой партии.

Из полученных зависимостей следует, что коэффициент вариации в партии для каждого типа образца не превышал 10%. Модуль упругости у необлучённого образца равен 9,72 ГПа, предел прочности составил 13,8 МПа, а деформация 7,07%. Модуль упругости у облучённого образца 25 кГр равен 4 ГПа, предел прочности составил 11,8 МПа, а деформация 6,01%. Модуль упругости у облучённого образца 50 кГр, равен 3,5 ГПа, предел прочности составил 8,6 МПа, а деформация 2,69%. Модуль упругости у облучённого образца 100 кГр равен 3,4 ГПа, предел прочности составил 8 МПа, а деформация 2,2%.

При увеличении уровня излучения существенно изменяется предел прочности материала, снижается с увеличением уровня излучения. Модуль упругости при излучении равном 25кГр падает практически в два раза, а при последующем излучении до дозы излучения 50кГр и 100кГр снижается незначительно.

В третьей главе на основе математического моделирования представлена постановка задачи по определению напряженно-деформированного состояния элемента ЭВТИ на основе решения нестационарной задачи теплопроводности совместно с уравнениями теории упругости для однородного упругого слоя, нагруженного по внутренней и внешней поверхности температурным полем. Проведены тестовые расчеты.

Четвертая глава посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния экранно-вакуумной теплоизоляции на основе постановки задачи, приведенной в третьей главе. Здесь рассматривается напряженно-деформированное состояние ЭВТИ, состоящее из четырех слоев.

Исследуется элемент экранно-вакуумной теплоизоляции, представляющий собой слоистую композитную конструкцию, состоящую из теплозащитного покрытия, которое состоит из слоя стеклоткани, полиамида и алюминиевой подложки. Рассматриваемая теплоизоляция находится под действием температурного поля (Рисунок 6). Необходимо найти распределения поля температур и тепловых потоков по толщине пакета, а также определить напряженно-деформированное состояние от действия температурного поля.

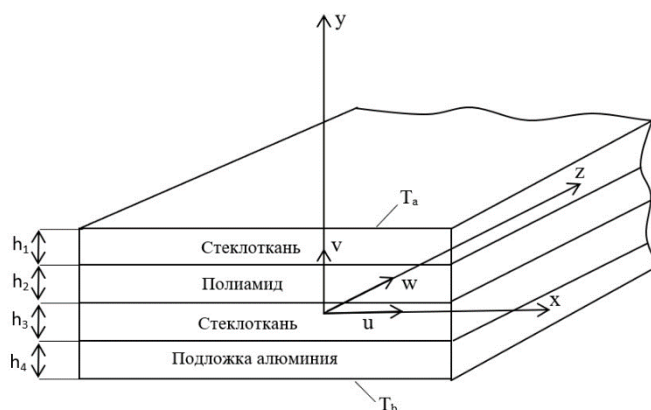


Рисунок 6 – Общий вид теплоизоляции под действием температурного поля.

Для определения поля температур в многослойной конструкции (Рисунок б) решается нестационарная термоупругая задача в несвязанной постановке.

Предполагается, что данная конструкция находится в плоском деформированном состоянии. Перемещения $u(\tau, x, y, z)$, $v(\tau, x, y, z)$ предполагаются не зависящими от координаты z , тогда как $w(\tau, x, y, z)$ не зависит от координат x, y , а его зависимость от z может быть только линейна, тогда компоненты вектора смещений будут иметь вид:

$$u = u(x, y), v = v(x, y), w = w_0 + \zeta z$$

где ζ - деформация в направлении оси z .

Следствием этих предположений является отсутствие касательных напряжений τ_{zx}, τ_{yz}

$$\tau_{zx} = G\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) = 0 \quad \tau_{yz} = G\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) = 0$$

Ненулевые компоненты тензора напряжений также не зависят от координаты z . Тогда обобщенный закон Гука в безразмерном виде будет:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \varepsilon_x + \gamma(\varepsilon_y + \varepsilon_z) - \beta \bar{T} \\ \bar{\sigma}_y &= \varepsilon_y + \gamma(\varepsilon_x + \varepsilon_z) - \beta \bar{T} \\ \bar{\sigma}_z &= \varepsilon_z + \gamma(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \beta \bar{T} \\ \bar{\tau}_{xy} &= \gamma \varepsilon_{xy}, \bar{\tau}_{xz} = \gamma \varepsilon_{xz}, \bar{\tau}_{yz} = \gamma \varepsilon_{yz} \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{3K\alpha T_0}{2\mu + \lambda} = \frac{3(2\mu + 3\lambda)\alpha T_0}{2\mu + \lambda} \quad \gamma = \frac{\lambda}{2\mu + \lambda} = \frac{\nu}{1 - \nu}, \text{ здесь и далее черточки над}$$

безразмерными функциями в опускаем.

$K = 2\mu + 3\lambda$, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - нормальные напряжения в направлении соответствующих осей, $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ - касательные напряжения.

Ненулевые деформации определяются соотношениями Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \zeta$$

Уравнения движения при реализации плоской деформации будут:

$$\frac{\partial \sigma_x(\tau, y)}{\partial x} = \frac{\partial^2 u(\tau, y)}{\partial \tau^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_y(\tau, y)}{\partial y} = \frac{\partial^2 v(\tau, y)}{\partial \tau^2}$$

Естественно предполагается, что вся композитная структура деформируется в направлении оси x как одно целое (деформации ε_x^i в каждом слое одинаковы и постоянны) и отсутствуют деформации сдвига. При этом естественно, что все компоненты напряженно-деформированного состояния зависят лишь от одной координаты y . В этом случае соотношения Коши будут:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u(\tau, y)}{\partial x} = 0 \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u(\tau, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(\tau, y)}{\partial x} \right] = 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v(\tau, y)}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \zeta$$

С учетом принятых допущений математическая постановка задачи для i слоя будет иметь вид:

- уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_i(\tau, y)}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 T_i(\tau, y)}{\partial y^2} = 0$$

Напряжения в i слое будут иметь вид:

$$\sigma_x^i(\tau, y) = \gamma \left[\frac{\partial v(\tau, y)}{\partial y} + \zeta \right] - \beta T_i(\tau, y)$$

$$\sigma_y^i(\tau, y) = \frac{\partial v(\tau, y)}{\partial y} + \gamma \zeta - \beta T_i(\tau, y)$$

$$\sigma_z^i(\tau, y) = \zeta + \gamma \frac{\partial v(\tau, y)}{\partial y} - \beta T_i(\tau, y)$$

$$\tau_{xy}(\tau, y) = \tau_{xz}(\tau, y) = \tau_{yz}(\tau, y) = 0$$

Уравнение движения при реализации плоской деформации для i слоя при отсутствии объемных и поверхностных сил будут иметь вид:

$$\frac{\partial \sigma_y^i(\tau, y)}{\partial y} = \frac{\partial^2 v_i(\tau, y)}{\partial \tau^2}$$

Начальные условия для системы уравнений предполагаются однородными, краевые уравнения будут:

-краевые условия на стыках для i слоя имеют вид

$$T_i(\tau, y) \Big|_{y=y_i} = T_{i+1}(\tau, y) \Big|_{y=y_i} \quad \frac{\partial T_i(\tau, y)}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = \tilde{\beta}_i \frac{\partial T_{i+1}(\tau, y)}{\partial y} \Big|_{y=y_i}$$

$$v_i(\tau, y) \Big|_{y=y_i} = v_{i+1}(\tau, y) \Big|_{y=y_i} \quad \sigma_y^i(\tau, y) \Big|_{y=y_i} = \sigma_y^{i+1}(\tau, y) \Big|_{y=y_i}$$

Здесь $\tilde{\beta} = \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_i}$ где λ_i -теплопроводность

-краевые условия на границе слоев будут

$$T_1(\tau, y) \Big|_{y=0} = T_a \quad v_1(\tau, y) \Big|_{y=0} = 0$$

$$T_1(\tau, y) \Big|_{y=h} = T_b \quad \sigma_y^i(\tau, y) = \frac{\partial v(\tau, y)}{\partial y} + \gamma \zeta - \beta T_i(\tau, y) \Big|_{y=\bar{h}} = 0$$

В постановке задачи присутствуют дополнительные константы в каждом слое, которые по своему физическому смыслу являются деформациями в направлении оси x из которых образована композитная слоистая структура. Эти константы следует определять из интегрального условия равновесия слоя:

$$\sum_{i=1}^N \int_{y_i}^{y_{i+1}} \sigma_x^i(\tau, y) dy = 0,$$

Для решения поставленной задачи используется интегральное преобразование Лапласа по времени при однородных начальных условиях. Краевые условия на стыке слоев предполагают равенство температур и температурных потоков в температурной задаче, равенство перемещений и напряжений в упругой. На свободных поверхностях ЭВТИ задается температура, а также равенство нулю напряжений и перемещений.

В результате получается система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно трансформант функций температуры, перемещений и напряжений, которые определяются после удовлетворения граничным условиям.

Оригиналы полученных трансформант определяются достаточно просто на основе свойств преобразования Лапласа и соответствующих таблиц.

Ниже приводятся результаты проведенных расчетов при температуре на внешней стороне пакета 25°C , а на внутренней -183°C (Рисунок 7). На графиках показано изменение поля температур кинематических и статических параметров по толщине пакета.

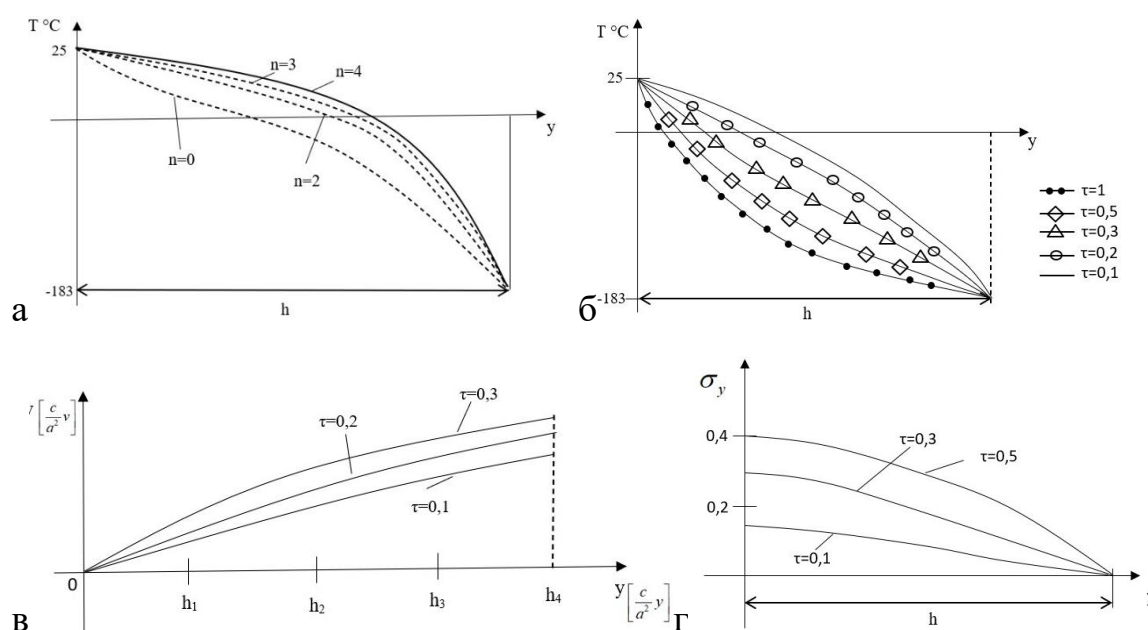


Рисунок 7 – Результаты проведенных расчетов.

(а-изменение поля температур по толщине пакета при различном количестве членов ряда, б- изменение поля температур по толщине пакета при различных временах, в- распределение перемещений по толщине слоя при различных значениях безразмерного времени, г- распределение нормальных напряжений по толщине слоя при различных значениях безразмерного времени)

Рисунок 7а показывает сходимость решения при количестве членов ряда при $n=4$. Рисунок 7б показывает распределение температурного поля при различных значениях безразмерного времени, видно что график температурного поля меняет кривизну при больших временах ($\tau=1$). Рисунок 7в определяет

перемещение внутри пакета ЭВТИ при различных временах. Распределение нормальных напряжений при различных временах приведено на Рисунке 7г.

В пятой главе проводилось численное моделирование в среде Ansys Workbench. В работе рассматривался пакет ЭВТИ, состоящий из следующих компонентов: 1 - прокладка из стеклоткани, 2 - алюминиевая фольга, 3 – пакет из экран-плёнок из полиимида с напылением алюминия, 4 - прокладка из стеклоткани и 5 - алюминиевая стенка бака. Пакет, состоящий из экран-плёнок полиимида с напылением алюминия, рассматривался в качестве 5-ти слоев, где в качестве слоев учитывался и полиимид и напыленный на него алюминий. На Рисунке 8 представлен рассматриваемый пакет ЭВТИ, в таблице 1 – схема укладки слоёв.

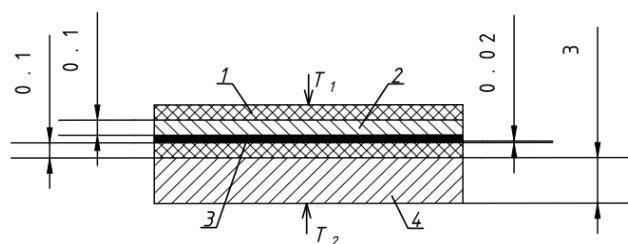


Рисунок 8 – Пакет ЭВТИ.

1-стеклоткань; 2-алюминиевая фольга; 3-полиимид; 4-алюминиевый бак.

Таблица 1– Схема укладки ЭВТИ.

Номер слоя	Материал	Толщина, мм
1	Стеклоткань	0,1
2	Алюминиевая фольга	0,1
3	Экран (полиимид)	0,02
4		0,02
5		0,02
6		0,02
7		0,02
8	Стеклоткань	0,1
9	Алюминий (AlCuMn ₆)	3

В процессе эксплуатации ЭВТИ бака может подвергаться различным перепадам температуры и условиям окружающей среды. Исходя из заданных условий температуры внешней среды T_1 и температуры внутри бака T_2 рассматриваются три случая: один рабочий режим эксплуатации и два критических, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы работы ЭВТИ бака.

Номер	Режимы	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$
1	Рабочий	25	-183
2	Захолаживания	25	-198
3	Радиация космоса	150	-183

Решалась одномерная задача теплопроводности для верификации аналитического решения. Распределения перемещений в направлении нормали в слоях ЭВТИ при различных режимах представлены на Рисунке 9.

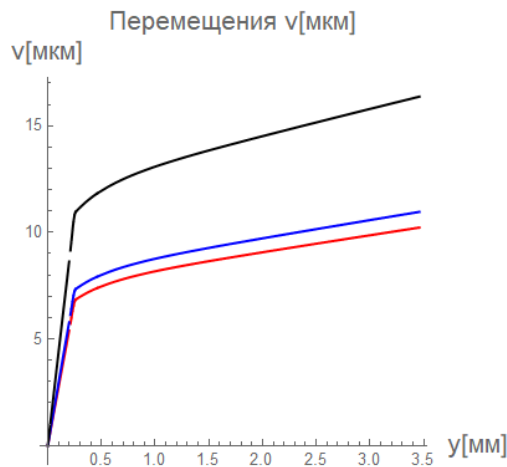


Рисунок 9 – Распределение перемещений [мкм] по толщине (красным цветом обозначен рабочий режим, синим цветом – 1-ый критический режим, черным цветом – 2-ой критический режим).

Из полученного решения видно, что влияние толщины слоев на НДС покрытия оказывается значительным. Полученные результаты позволяют подобрать оптимальные толщины каждого слоя рассматриваемого покрытия. Выбор подобных толщин, позволит повысить статическую и циклическую

прочность ЭВТИ, за счет снижения уровня максимальных напряжений, которые возникают при действии нагрева.

Для дополнительной проверки аналитической модели, полученной в главе 3 диссертационной работы, использовалась текущая конечно-элементная модель. Полученные результаты аналитического моделирования были сведены для расчетного случая 1 и сопоставлены с численным результатом.

На Рисунке 10 представлено сравнение аналитического решения (Рисунок 7б кривая $\tau = 1$) с полученными численными результатами (нанесено на график точками). Из этого графика видно, что результаты фактически совпадают.

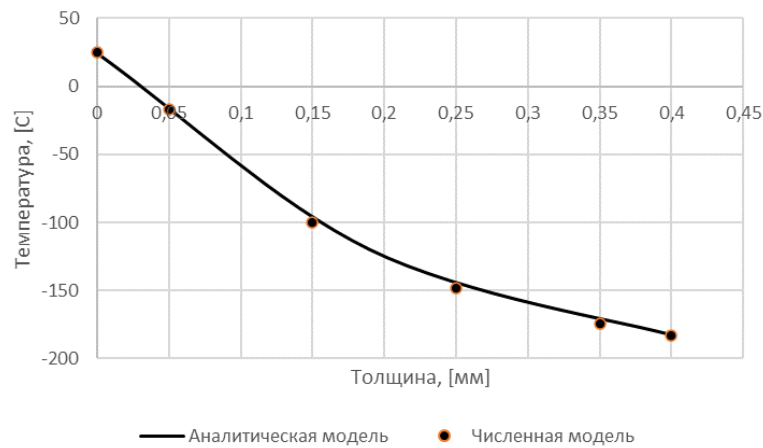


Рисунок 10 – Распределение температуры для численных и аналитических решений.

В заключении обобщаются результаты выполненного исследования и представлены выводы по работе.

Основные результаты диссертационной работы:

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной и практической ценностью:

1. Сделан аналитический обзор литературных данных по проблеме защиты космических аппаратов путем использования экранно-вакуумной теплоизоляции. Анализ литературы показал, что физико-механические характеристики малоизучены, в особенности это касается деградации свойств в условиях космического пространства.

2. Для детального исследования проводилось экспериментальное исследование элемента ЭВТИ. Испытания проводились с использованием универсальной разрывной машины и линейного ускорителя электронов. В ходе проведенных исследований определялись свойства материала до излучения и после в зависимости разного уровня излучения.

3. Построена математическая модель, описывающая динамическое поведение ЭВТИ, которая основана на совместном решении нестационарного уравнения теплопроводности и классического уравнения теории упругости для одномерного слоя. Решение проводилось на основе интегрального преобразования Лапласа по времени. Решена тестовая задача. На основе математической модели получены аналитические зависимости кинематических и статических параметров для ЭВТИ, состоящего из четырех слоев. Построены зависимости распределения температурного поля по времени и толщине многослойного пакета ЭВТИ, а также распределение нормальных напряжений по толщине пакета и во времени.

4. Проведено численное моделирование ЭВТИ для проверки полученных аналитических зависимостей. Определено влияние толщины на уровень НДС в слоях и на их границе. Моделирование проводилось с учетом полученных экспериментальных результатов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРАТЦИИ

По теме диссертационной работы опубликовано 10 работ в научных изданиях, из них 5 научные работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Тушавина, О. В., Пронина, П. Ф., Лопатин, С. С. Подходы к моделированию изменения физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий при циклическом нагреве/ О. В. Тушавина, П. Ф. Пронина, С. С. Лопатин // СТИН. — 2023. — № 10. — С. 21-23.

2. Тушавина, О. В., Палешкин, А. В., Пронина, П. Ф., Шеметова, Е. В. Оценка допустимых погрешностей воспроизведения тепловых факторов космической среды и погрешностей моделирования тепловых режимов для малых космических аппаратов/ О. В. Тушавина, А. В. Палешкин, П. Ф. Пронина, Е. В. Шеметова // СТИН. — 2023. — № 10. — С. 23-27.

3. Пронина, П. Ф. Аналитическое моделирование теплопереноса в элементах экранно-вакуумной теплоизоляции / П. Ф. Пронина // Труды МАИ. — 2023. — № 130. — С. 27.

4. Пронина, П. Ф. Исследование влияния дозы излучения на физико-механические характеристики полиимидных пленок с металлизированными покрытием элементов экранно-вакуумной теплоизоляции / П. Ф. Пронина // Труды МАИ. — 2023. — № 132. — С. 14.

5. Пронина, П. Ф., Пичужкин, П. В., Гофин, М.Я. Применение математического моделирования при исследовании теплозащитной конструкции космического аппарата на теплопроводность в условиях изменяющегося давления и температуры во время спуска в плотные слои атмосферы/ П. Ф. Пронина, П. В. Пичужкин, М.Я. Гофин // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 5. — С. 81-84.

Статьи в журналах, индексируемых Scopus:

1. Starovoitov E.I., Pronina P.F. The influence of the temperature field on the stress-strain behaviour of heat protection tiles on an elastic base / Starovoitov E.I., Pronina P.F. // Journal of the Balkan Tribological Association. — 2021. — № 2. — С. 256-270.
2. Orekhov A.A., Utkin Y.A., Pronina P.F. Determination of deformation in mesh composite structure under the action of compressive loads / Orekhov A.A., Utkin Y.A., Pronina P.F. // Periodico Tche Quimica. — 2020. — № 35. — С. 599-608.
3. Sha M., Utkin Y.A., Tushavina O.V., Pronina P.F. Experimental studies of heat and mass transfer from tip models made of carbon-carbon composite material (cccm) under conditions of high-intensity thermal load / Sha M., Utkin Y.A., Tushavina O.V., Pronina P.F. // Periodico Tche Quimica. — 2020. — № 35. — С. 988-997.
4. Pronina P.F., Tushavina O.V., Sun Y. Mathematical modelling of high-intensity heat flux on the elements of heat-shielding composite materials of a spacecraft / Pronina P.F., Tushavina O.V., Sun Y. // Journal of Applied Engineering Science. — 2020. — № 4. — С. 693-698.
5. Kyaw Y.K., Pronina P.F., Polyakov P.O. Mathematical modelling of the effect of heat fluxes from external sources on the surface of / Kyaw Y.K., Pronina P.F., Polyakov P.O. // Journal of Applied Engineering Science. — 2020. — № 4. — С. 732-736.