

На правах рукописи



Радченко Валерий Петрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
СТАНЦИЙ.**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018 г.

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

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин»
Рабинский Лев Наумович.

Официальные оппоненты:

Попов Виктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.;

Нуштаев Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, менеджер по моделированию клиентских процессов дирекции по техническому развитию и качеству АО «Северсталь Менеджмент»

Ведущая организация: **ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук»**

Защита диссертации состоится 26 декабря 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=98258

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05

Федотенков Григорий Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Актуальность работы определяется тем, что современный этап развития радиолокационных технологий характеризуется все возрастающими требованиями к многофункциональности станций, работе по многим одновременно обнаруживаемым и сопровождаемым объектам на больших дальностях, к работе в условиях многочисленных помех. Известно, что такие характеристики радиолокационных станций, как разрешающая способность, точность, помехозащищенность, устойчивость к ионизации атмосферы, существенно улучшаются с уменьшением длины волны. Кроме того, использование высокочастотных диапазонов волн позволяет при небольших апертурах антенн, что характерно для мобильных комплексов, обеспечить высокую концентрацию энергии в пространстве, что в свою очередь приводит к увеличению дальности обслуживания малоразмерных объектов. Указанные выше обстоятельства диктуют необходимость разработки мощных радиолокационных средств в более высоких диапазонах длин волн. Настоящая диссертационная работа является частью работ, ориентированных на создание оптимальных систем терморегулирования мощных активных фазированных антенных решеток (АФАР) высокоточных помехозащищенных мобильных радиолокационных станций.

Особенностью современных цифровых АФАР является то, что приемо-передатчики и цифровые схемы управления размещаются на антенном полотне в каждом излучателе. В зависимости от решаемых задач выбирается расстояние между излучателями кратное длине волны (шаг решетки) и в большинстве случаев заполнение антенного полотна получается очень плотное. Поэтому подводимая энергия, а, следовательно, и тепловая, достаточно плотно распределена по антенному полотну. Становится очевидным, что с увеличением частоты излучаемой энергии, а, следовательно, и конструктивном уплотнении при размещении приемо-передатчиков в антенном полотне, задачи отвода тепловой мощности от антенны выходят по сложности на первое место.

Одним из важных факторов, влияющих на характеристики АФАР, является возможность создания равномерного или хотя бы стабильного температурного поля поверхности и основных электро-радио элементов (компонентов) конструкции. Расчеты показывают, что для реализации РЛС в интересах, указанных выше применений, уровень выходной мощности антенного устройства в импульсе может достигать до сотен киловатт при средней мощности в десятки киловатт, а, следовательно, и выделяемая тепловая мощность может исчисляться десятками киловатт.

Анализ результатов исследований и технических решений для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных элементов систем терморегулирования, используемых в конструкциях АФАР, показал,

что используемые методы моделирования процессов деформирования таких конструкций как с учетом особенностей их эксплуатации, так и конструктивных особенностей не охватывают многие практически важные задачи, либо вовсе отсутствуют. В связи с этим разработка и развитие методов моделирования на основе адекватных математических моделей в сочетании с методами экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов конструкций, применяемых в системах терморегулирования АФАР, с учетом конструктивных особенностей и особенностей их эксплуатации, представляет собой *актуальную проблему*, имеющую важное *прикладное и теоретическое* значение.

Целью работы является разработка методов моделирования с последующей экспериментальной отработкой процессов деформирования тонкостенных элементов конструкций систем терморегулирования АФАР для определения оптимальной с точки зрения обеспечения заданных условий эксплуатации ширины зоны контакта, реализующейся между деформируемыми каналами системы охлаждения и охлаждаемыми поверхностями нагреваемых прямо-передающих модулей РЛС, с учетом действующего внутри каналов гидростатического давления, геометрии сечений каналов и зазоров между охлаждаемыми прямо-передающими модулями РЛС. Решается задача обеспечения наиболее широкой зоны контакта (для наиболее интенсивного теплоотвода) с учетом условий прочности и долговечности.

Объектом исследований настоящей диссертации являются деформируемые тонкостенные каналы охлаждения плоскоовального сечения, на базе которых предложен новый вариант системы терморегулирования радиолокационных станций (РЛС).

Методы исследования. Для определения исходных требований к конструкции труб-каналов охлаждения в системе терморегулирования АФАР проведен анализ существующих конструктивных схем построения АФАР и анализ влияния неравномерного нагрева на основные характеристики излучения АФАР.

Для предварительного аналитического проектирования и для поиска оптимальной геометрии тонкостенных труб в системе охлаждения применяются модели теории тонких оболочек и пластин, нагруженных внутренним гидростатическим давлением, в приближении малых и больших прогибов с учетом наличия контактного взаимодействия с жесткой поверхностью. Аналитические расчеты проводятся в упругой постановке в приближении плоского деформированного состояния для области основной рабочей зоны труб охлаждения. Предполагается наличие контакта без проскальзывания.

Для определения условий нагружения тонкостенных каналов охлаждения использованы методы гидравлического проектирования систем жидкостного охлаждения.

Результаты аналитических расчетов сопоставляются с численным конечно-элементным моделированием, реализованным в геометрически-нелинейной постановке с учетом трения в зоне контакта. Трехмерные модели оболочек строятся с использованием элементов типа shell и модели Миндлина-Рейсснера. В численных расчетах рассматриваются и сопоставляются различные варианты поперечных сечений труб. Дается оценка их прочности при статическом и многократном нагружении. Для рассматриваемых металлических труб используется критерий Мизеса для оценки возможности возникновения пластических деформаций. Прочность при многократном нагружении оценивается по результатам статических расчетов на основе эмпирического соотношения Лэнджера.

Экспериментальные исследования проведены на элементе трубы плоскоовального сечения для непосредственной проверки результатов расчета зоны контакта трубы с жесткой поверхностью под действием давления наддува.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- впервые решена задача об определении ширины зоны контакта между тонкостенной оболочкой плоскоовального сечения (каналом охлаждения) и жесткой плоскостью в условиях действия гидростатического давления. Решение контактной задачи для оболочки сведено к решению задачи о деформациях балки единичной ширины для случая плоского деформированного состояния. Построены аналитические и численно-аналитические решения в приближении малых и больших прогибов в рамках классической теории изгиба балок и в приближении малых прогибов в рамках модели балок типа Тимошенко. Показано, что построенные решения в рамках неклассических теорий в предельных случаях (малые прогибы, малая толщина стенки) выходят на классическое решение.

- проведена экспериментальная проверка предложенной аналитической методики оценки ширины зоны контакта в системе терморегулирования АФАР на основе испытаний труб плоскоовального сечения.

- результаты аналитических расчетов подтверждены на основе численного конечно-элементного моделирования. Дана оценка прочности труб системы терморегулирования с различной формой поперечных сечений. Показана эффективность выбранной формы поперечного сечения труб с точки зрения статической и циклической прочности.

- с применением разработанных расчетных методов предложена новая конструкция системы терморегулирования АФАР и достигнут необходимый уровень теплопередачи за счет применения нового типа конструктивных элементов. В отличие от традиционных методов охлаждения прямо-передающих модулей предложено создать способ охлаждения с помощью деформируемых U-образных труб плоскоовального сечения. Таким образом, предложен и апробирован подход и конструктивные решения, позволяющие усовершенствовать существующие

системы охлаждения АФАР и обеспечить их надежную и эффективную работу.

Новизна технических решений подтверждена *четырьмя* патентами, полученными по результатам работы:

1. Патент на изобретение №2615661 «Способ охлаждения АФАР». Авторы Радченко В.П., Топчиев С.А., Тушнов П.А.
2. Патент на изобретение №2624437 «Мобильная радиолокационная станция». Авторы Левитан Б.А., Топчиев С.А., Радченко В.П., Никитин М.В., Захаров А.А., Логинов А.Е.
3. Патент на изобретение №2564152 «Способ охлаждения активной фазированной антенной решетки» Авторы Венценовцев Д.Л., Левитан Б.А., Радченко В.П. Смолин М.Г., Токмаков Д.И., Топчиев С.А., Тушнов П.А.
4. Патент на изобретение №2556863 «Корпус радиоэлектронного устройства (варианты)» от 16.07.2014.

Практическая значимость и внедрение результатов. Практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в разработке и экспериментальной проверке прикладных аналитических методов расчета параметров напряженно-деформированного состояния тонкостенных каналов систем охлаждения АФАР.

- в практической реализации систем терморегулирования АФАР на базе деформируемых тонкостенных каналов с применением предложенных расчетных методик.

Результаты исследований легли в основу разработки конструкторской документации, изготовления и испытаний мобильного радиолокационного комплекса «Демонстратор».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обосновывается использованием строгих и апробированных подходов механики деформируемого твердого тела, в частности, моделей теории упругих тонких пластин и оболочек при малых и больших прогибах, подтвержденных результатами численного конечно-элементного моделирования, а также результатами проведенных в работе экспериментальных исследований для проектируемых элементов конструкций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- аналитические и численно-аналитические решения задач об определении напряженно-деформированного состояния и ширины зоны контакта между тонкостенной оболочкой плоскоовального сечения (каналом охлаждения) и жесткой плоскостью в условиях действия гидростатического давления, построенные для случая плоского деформированного состояния основной рабочей зоны каналов охлаждения в приближении малых и больших прогибов.

- результаты экспериментальной проверки предложенной аналитической методики оценки ширины зоны контакта в системе терморегулирования АФАР на основе испытаний фрагментов труб плоскоовального сечения.

- результаты численного конечно-элементного моделирования, подтверждающие эффективность предложенной аналитической методики проектирования и предложенных конструкторских решений с точки зрения обеспечения прочности каналов охлаждения в форме тонкостенных труб плоскоовального поперечного сечения.

- конструктивные решения, обеспечивающие устойчивый режим съема тепловой энергии с активных СВЧ элементов АФАР. В частности, способ охлаждения на базе деформируемых труб плоскоовального сечения, обеспечивающий интенсивное отведение тепла без введения охлаждающей жидкости непосредственно в корпус приемо-передающих модулей и обеспечивающий равномерное распределение теплового потока по антенному полотну и стабильность амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова. Москва, МАИ, 2017, 2018.
2. Международный научный семинар "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы", Москва, МАИ, 2016, 2017.
3. International conference magnetism, long and short-range spin-spin interaction, Москва, МЭИ, 2009.
4. Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, 2009

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, включая 5 научных статей в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ. Зарегистрировано 4 патента.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения и двух приложений, содержит 112 страниц основного текста, 8 страниц списка литературы, 44 рисунка, 10 страниц приложений.

Основное содержание работы

Во введении проводится анализ состояния рассматриваемых вопросов, определяются цель диссертационной работы и задачи исследований, новизна полученных результатов и их практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагаются результаты диссертации.

В первой главе рассматривается современное состояние проблемы проектирования систем терморегулирования радиолокационных станций. Проводится обзор и анализ существующих конструктивных схем построения АФАР и применяемых систем терморегулирования. Формулируются требования к допустимым габаритным размерам каналов внешней жидкостной системы охлаждения, которые могут быть размещены в свободном пространстве между приемо-передающими модулями, работающими в составе современных мобильных радиолокационных комплексов. Проводится обзор известных методов решения задач о деформировании балок, пластин и оболочек, контактирующих с жесткими преградами. Показана возможность применения упрощенных балочных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических неосесимметричных каналов охлаждения, работающих в условиях плоского деформированного состояния. Отмечено ограниченное количество опубликованных работ, посвященных контактными задачам для неосесимметричных оболочек.

Во второй главе диссертации представлено общее описание предлагаемой конструкции жидкостной системы терморегулирования АФАР, построенной на базе тонкостенных деформируемых труб плоскоовального поперечного сечения. Получены оценки гидростатического давления, действующего внутри каналов охлаждения. Получены аналитические решения для оценки ширины зоны контакта между плоскоовальными трубами охлаждения и охлаждаемыми поверхностями.

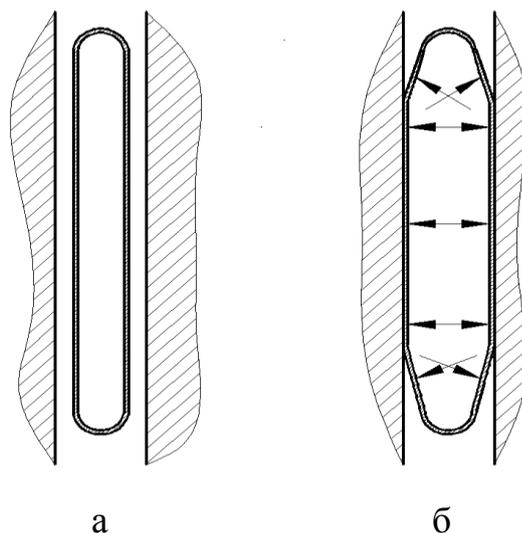


Рис. 1. Поперечное сечение канала охлаждения в виде тонкостенной плоскоовальной трубы, расположенной между охлаждаемыми стенками ППМ АФАР (а), поперечное сечение канала после деформирования под действием внутреннего давления охлаждающей жидкости (б).

В рассматриваемой конструкции трубы охлаждения размещены между приемо-передающими модулями (ППМ) АФАР с небольшим

зазором (рис. 1а). Под действием гидростатического давления нагнетаемой охлаждающей жидкости, трубы деформируются и прилегают к охлаждаемым стенками ППМ (рис. 1б). В этом случае определяющим параметром, необходимым для проведения тепловых расчетов и проектирования рассматриваемой конструкции, является ширина зоны контакта, которая реализуется между каналами охлаждения и охлаждаемыми стенками. Этот параметр определяет уровень теплоотвода и эффективность работы системы охлаждения.

Для построения упрощенных (проектировочных) аналитических решений, позволяющих оценить ширину зоны контакта, реализующейся между тонкостенной оболочкой плоскоовального сечения (рис. 2) и жесткими параллельными поверхностями, ограничивающими ее деформации использованы следующие гипотезы:

1) Внутри канала действует постоянное давление p , равное максимальному гидростатическому давлению, найденному из гидравлических расчетов.

2) Канал находится в состоянии плоской деформации, то есть деформации в направлении его длины равны нулю (рассматриваем участок канала вдали от его краев). В этом случае, задача сводится к рассмотрению деформаций балки-полоски в форме поперечного сечения канала.

3) Трением в зоне контакта пренебрегаем.

4) Наличием внутри оболочки жидкости пренебрегаем, предполагая, что ее воздействие сводится только к давлению на стенки канала.

5) Поверхность, с которой реализуется контакт, является абсолютно жесткой.

6) Материал оболочки линейно-упругий и изотропный.

В итоге, рассматриваемая задача о деформациях тонкостенной неосесимметричной оболочки сведена к задаче о деформациях упругого контура ее поперечного сечения, которая, в свою очередь, с учетом условий симметрии, сведена к решению задачи о деформациях балки единичной ширины (Рис. 2). Решение этой задачи в рамках балочной модели позволяет построить решение задачи для исходной оболочки заменой модуля Юнга материала на приведенной модель упругости (см. Тимошенко С.П., Курс теории упругости, 1972)



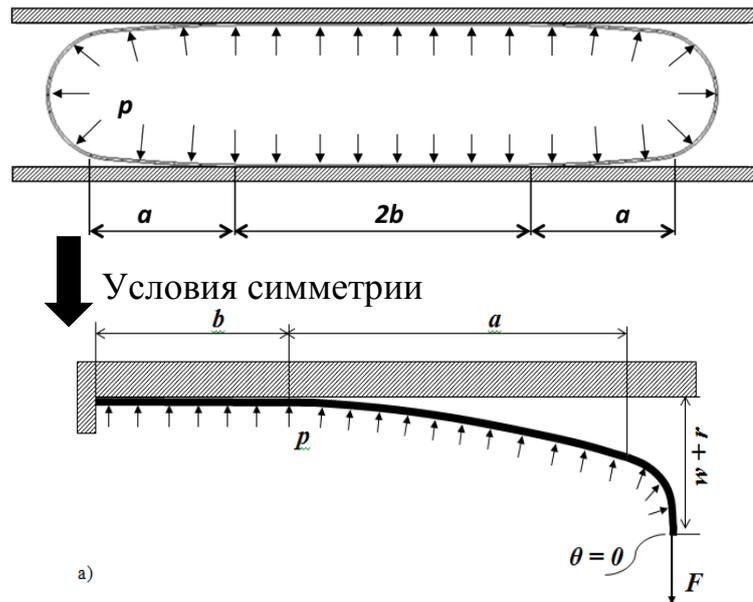


Рис 2. Сведение задачи о деформациях тонкостенной цилиндрической оболочки плоскоовального сечения к задаче о деформациях балки-полоски.

Наиболее простое решение удастся получить при использовании еще одной дополнительной упрощающей гипотезы о том, что деформации круговых частей поперечного сечения оболочки малы, и эти части работают как шарниры, запрещая вертикальные смещения конца прямолинейного участка поперечного сечения оболочки и не создавая при этом изгибающий момент (рис. 3).

Решение такой задачи (Рис. 3) было построено с использованием трех моделей в рамках классической теории изгиба балок для малых и больших прогибов, и в рамках теории балок Тимошенко для малых прогибов.

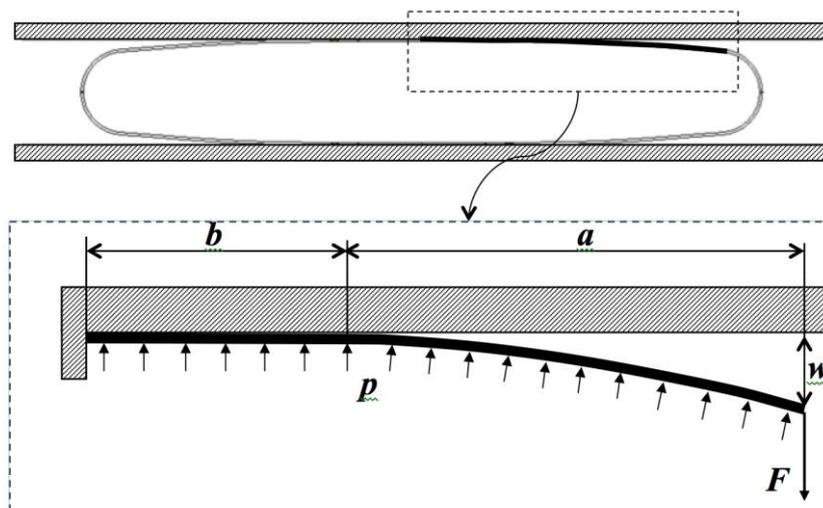


Рис. 3. Введение дополнительной упрощающей гипотезы о том, что деформации круговых частей поперечного сечения малы, и их влияние аналогично наличию шарнира на конце рассматриваемой балки-полоски

(на конце возникает реакция F , но отсутствует изгибающий момент).

В случае классической теории изгиба балок из условия равенства нулю суммы проекций всех сил на вертикальную ось, следует, что на границе зоны контакта жесткая плоскость дает сосредоточенную реакцию, равную приложенной силе F . Помимо этого, в зоне контакта на балку со стороны жесткой поверхности действует распределенное давление. В уравновешенном состоянии часть балки, касающаяся поверхности, имеет прямолинейную форму и, следовательно, изгибающий момент в ней равен нулю, так как в недеформированном состоянии эта часть контура также была прямолинейной. Следовательно, изгибающий момент должен быть равен нулю на границе зоны контакта. Из этого условия сразу определяется величина приподнятого участка балки a :

$$M(b) = \frac{pa^2}{2} - Fa = 0 \quad \Rightarrow \quad a = 2F / p$$

В рассматриваемом случае сила F является неизвестной, однако известным является величина расстояния от конца балки до жесткой плоскости – это расстояние равно заданному зазору w между первоначально недеформируемым контуром оболочки и плоскостью. Связь заданной величины w с силой F определяется из решения задачи о деформациях консольной балки, что в итоге позволяет получить решение для определения ширины зоны контакта $2b$ в следующем виде:

$$b = l - a = l - \sqrt[4]{\frac{24wD}{p}} = l - \sqrt[4]{\frac{2wEh^3}{p(1-\nu^2)}}, \quad (1)$$

где D – изгибная жесткость балки-полоски единичной ширины, вычисляемая через приведенный модуль упругости для оценки деформаций контура поперечного сечения оболочки в условиях плоского деформированного состояния, p – давление, l – длина прямолинейной части контура поперечного сечения, E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала оболочки, h – толщина ее стенок, w – заданный первоначальный зазор.

Аналогичное решение может быть построено в рамках теории балок Тимошенко, однако в этом случае на границе зоны контакта изгибающий момент не будет равен нулю. В диссертационной работе показано, что, решая задачу на двух участках балки (в зоне контакта и вне ее) и выполняя условия равенства прогибов, углов поворота, перерезывающих усилий и изгибающих моментов в точке их сопряжения (на границе зоны контакта), в рамках модели Тимошенко может быть установлено следующее трансцендентное уравнение, из решения которого определяется длина участка сечения, a , не прилегающего к жесткой поверхности:

$$\frac{3wD}{a^3} - \frac{5pa}{8} - \frac{3pD}{2Ba} = -\sqrt{B/D} \operatorname{cth}\left((l-a)\sqrt{B/D}\right) \left(\frac{3wD}{a^2} - \frac{pa^2}{8} - \frac{3pD}{2B}\right), \quad (2)$$

где $B = 5GS/6$ – жесткость балки Тимошенко на сдвиг, $S = 1 \cdot h$ – площадь поперечного сечения рассматриваемой балки-полоски единичной

ширины.

Полученное решение (2) может применяться для описания деформированного состояния плоскоовальных оболочек с достаточно большой толщиной стенок ($l/h < 10$), однако, показано, что для рассматриваемых типов тонкостенных конструкций применение этого решения не позволяет получить значительного уточнения получаемых оценок.

Сопоставление решений для ширины зона контакта, найденных на основании (1), (2), а также на основании численного конечно-элементного моделирования рассматриваемой контактной задачи (Рис. 3) в системе Ansys представлено на Рис. 4. Для построения этих графиков решение уравнения (2) находилось численно методом Ньютона-Рафсона.

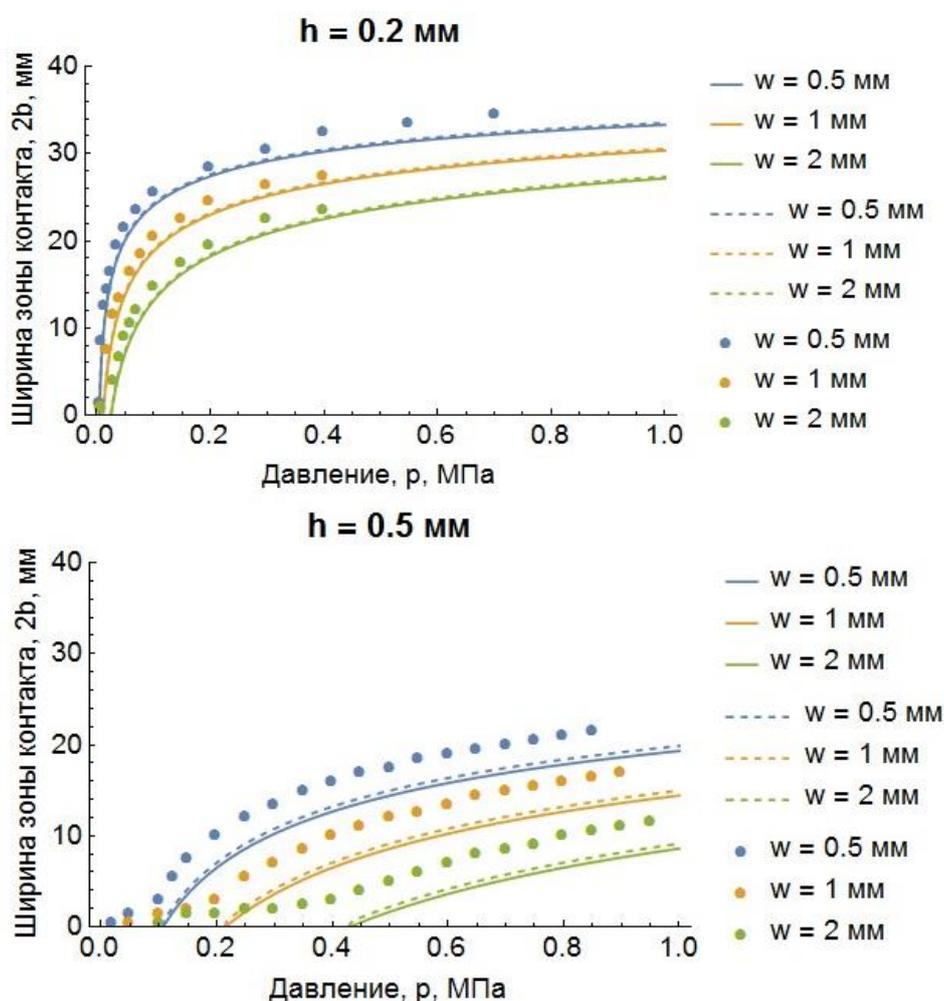


Рис. 4. Зависимость ширины зоны контакта от давления, действующего внутри оболочки. Сплошные линии – решение (1), пунктирные – решение (2), точки – конечно-элементное моделирование. Материал оболочки – сталь, $l = 22.5 \text{ мм}$, толщина $h = 0,2$ и $0,5 \text{ мм}$, величина зазора $w = 0,5, 1$ и 2 мм .

Из построенных решений видно, что для стальных тонкостенных

каналов охлаждения с типичными геометрическими параметрами применение уравнения (2) не позволяет получить существенного уточнения решения (1). Оба решения дают заниженные значения по отношению к численному моделированию. Заметим, что решение (2) дает существенные уточнения, только для каналов большой толщины, выполняемых из менее жестких материалов. Например, на Рис. 5а показано, сопоставление решений, полученных в рамках классической теории и теории балок Тимошенко для толстостенных медных каналов.

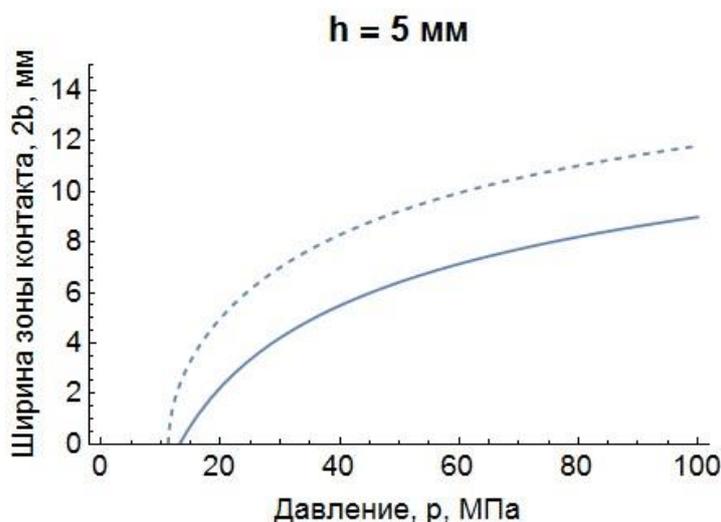


Рис. 5. Зависимость ширины зоны контакта от давления, действующего внутри оболочки. Сплошная линия – решение (1), пунктирная линия – решение (2). Материал оболочки – медь, $h = 5$ мм, $l = 45$ мм, $w = 0,5$ мм.

Еще один вариант решения задачи, представленной на рис. 3 был получен в рамках классической балочной теории (Бернулли-Эйлера), учитывающей большие прогибы. Для решения этой задачи рассмотрена следующая постановка задачи. Дифференциальное уравнение изгиба балки, записывается относительно углов поворота сечений балки:

$$\frac{d\theta}{ds} = -\frac{M}{D}, \quad (3)$$

где s – координата вдоль деформированной линии балки, отсчитываемая от свободного конца балки, $\frac{d\theta}{ds}$ – кривизна балки.

Аналогично классической теории изгиба, в теории с учетом больших прогибов в зоне контакта возникает равномерно распределенное давление p , равное приложенному давлению, а на границе зоны контакта – сосредоточенная реакция F , равная силе, приложенной на конце балки. Изгибающий момент в балке в зоне контакта равен нулю.

Дифференцируя соотношение (3) и учитывая, что производная от момента на участке балки не касающемся поверхности связана с заданной нагрузкой соотношением $\frac{dM}{ds} = (F - ps) \cos \theta$ (влиянием «следящего»

характера распределенной нагрузки пренебрегаем, чтобы построить аналитическое решение), получаем следующее нелинейное дифференциальное уравнение для определения углов поворота сечений балки:

$$0 < s < a: -D \frac{d^2 q}{ds^2} = (F - \rho s) \cos q \quad (4)$$

Решение этого уравнения необходимо искать с учетом граничных условий, устанавливающих равенство нулю изгибающего момента на свободном конце балки и равенство нулю угла наклона балки на границе зоны контакта:

$$\begin{aligned} s = 0: M = 0 &\Rightarrow d\theta / ds = 0 \\ s = a: \theta = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

В соответствии с подходом, примененным при рассмотрении классической теории балок в приближении малых прогибов, длина участка балки a заранее является неизвестной и определяется из указанного выше условия равенства нулю изгибающего момента на границе зоны контакта, на котором уже задано условие по отсутствию поворотов. Таким образом, имеем дополнительное условие:

$$s = a: M = 0 \Rightarrow d\theta / ds = 0 \quad (6)$$

Это условие является условием сопряжения двух участков балки – касающегося жесткой поверхности и не касающегося ее.

Величина силы F (см. (4)) действующей на конце балки, является неизвестной. Эту силу необходимо найти в процессе построения решения с учетом заданного перемещения конца балки, равного зазору $v(0) = w$. Таким образом, замыкающим условием, для решения рассматриваемой задачи является соотношение:

$$v(a) = \int_0^a \sin \theta ds = w \quad (7)$$

Решение задачи (4)-(7) было построено в численно-аналитическим методом в рядах. В работе показано, что полученное решение выходит на классическое (1) в случае малых прогибов. Показано, что построенное решение задачи (3)-(7) позволяет уточнить классическое решение (1) в случае относительно больших зазоров, реализующихся между оболочкой-каналом охлаждения и охлаждаемыми стенками (рис. 7).

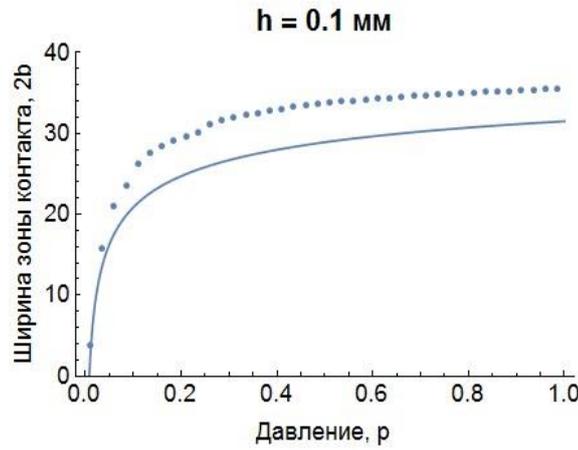


Рис. 7. Сопоставление классического решения (сплошная линия) и решения с учетом больших прогибов (точки), $h = 0.1$ мм, $l = 45$ мм, $w = 5$ мм, материал балки – сталь

В качестве последней аналитической модели для определения ширины зоны контакта, использована классическая теория изгиба балок с учетом деформаций всех участков контура, включая круговые. Таким образом, в этой модели не используется упрощение, представленное на рис. 3, и рассматриваем деформации всего контура поперечного сечения (см. рис. 2). Эта задача может быть решена классическими методами теории сопротивления материалов (в частности, в диссертации представлено решение «методом сил») с тем лишь отличием, что длина участка балки, не касающегося жесткой поверхности, заранее неизвестна и должна определяться из дополнительного условия равенства нулю изгибающего момента на границе зоны контакта. В результате построения этого решения установлено, что длина участка балки a , не касающейся жесткой поверхности может быть найдена, как корень полинома шестой степени следующего вида:

$$pa^6 + 3\pi r p a^5 + 30p r^2 a^4 + 12\pi p r^3 a^3 + 9(p(\pi^2 - 8)r^4 - 8Dw)a^2 - 72\pi r Dwa - 144D r^2 w = 0 \quad (8)$$

Полученное соотношение является уравнением шестой степени относительно неизвестной величины a . Все остальные величины, входящие в это соотношение определены в исходных данных задачи. Решение этого уравнения позволяет найти ширину зоны контакта $2b = 2l - 2a$. Заметим, что при отсутствии скругленного участка, то есть, при $r = 0$, выражение (8) приводит к следующему результату:

$$pa^6 - 72Dwa^2 = 0 \Rightarrow a = \sqrt[4]{\frac{72Dw}{p}} \Rightarrow b = l - \sqrt[4]{\frac{72Dw}{p}} \quad (9)$$

В этом случае мы находим явное выражение для ширины зоны контакта прямолинейной балки с жесткой поверхностью, которое отличается от полученного ранее решения (1) коэффициентом: в решении (9) под корнем стоит коэффициент 72 вместо 24. Это связано с тем, что полученный предельный случай соответствует другому типу закрепления

свободного конца балки. При выполнении предельного перехода $r \rightarrow 0$, условие отсутствия поворотов на свободном конце балки сохраняется, в то время как в решении (1) на этом конце предполагалось шарнирное опирание и нулевая величина момента.

Построенное решение (8) позволяет уточнить решение (1) за счет учета деформаций круговых участков контура. По сути, это решение содержит единственный дополнительный параметр r – радиус скругленных участков сечения. Влияние этого параметра на реализующуюся ширину зоны контакта показано на рис. 8.

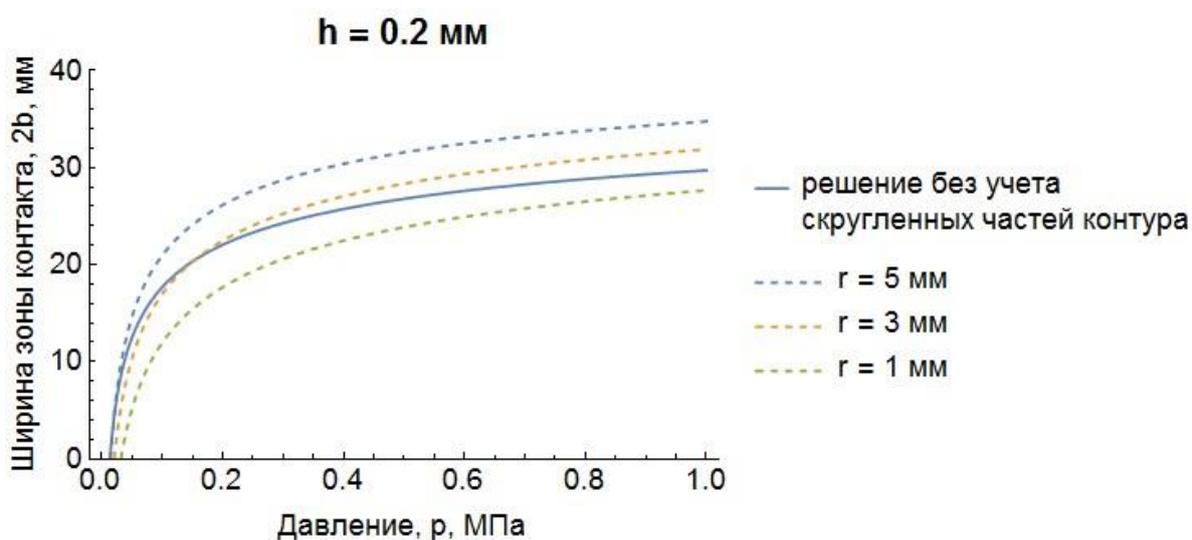


Рис. 8. Сопоставление решения (1) без учета деформаций скругленных частей контура поперечного сечения (сплошная линия) и решения для задачи о деформациях всего контура (пунктир).

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований. Дано описание разработанной лабораторной установки для измерения ширины зоны контакта, реализующейся при контакте фрагментов труб плоскоовального поперечного сечения с жесткими преградами, в качестве которых использованы прозрачные стеклянные плиты толщиной 20 мм. Фотография собранной установки представлена на рис. 9.

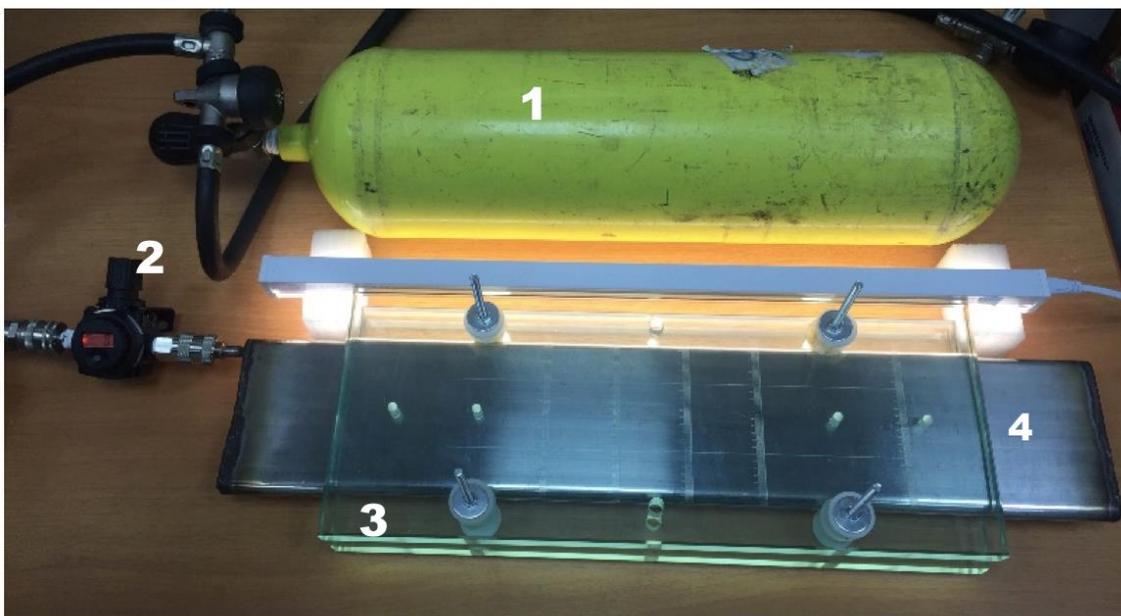
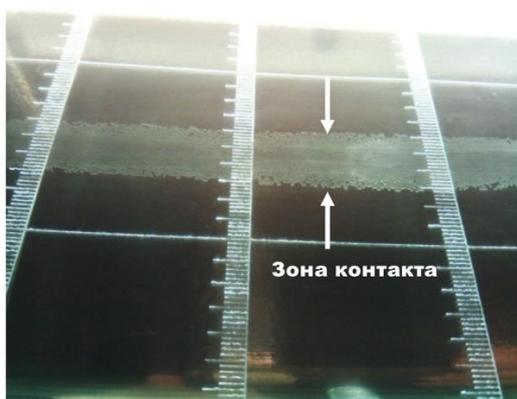


Рис. 9. Лабораторная установка для измерения ширины зоны контакта между трубкой плоскоовального сечения и жесткими параллельно расположенными стеклянными плитами. 1: баллон давления, 2: регулятор давления, 3: прозрачные стеклянные плиты толщиной 20 мм, ограничивающие деформации трубы с заданным зазором, 4: исследуемая труба.

Для проведения испытаний фрагмент трубы заваривается с обеих сторон и подключается к баллону давления. Труба устанавливается между стеклянными плитами с заданным зазором, устанавливаемым с точностью 0,1 мм. На стекле с помощью лазерной гравировки нанесена разметка – миллиметровая шкала. Перед испытаниями на поверхность трубы наносится водный аэрозоль. В процессе испытаний трубы наддуваются и касаются стекла. Сбоку включается подсветка, которая позволяет увидеть ширину зоны контакта: микроскопические капли аэрозоля в зоне контакта дают характерное пятно, ширина которого измеряется (рис. 10а). Погрешность измерений не велика - пятно появляется только там, где есть контакт, и немного за пределами контакта, примерно, на 1-2 мм шире, за счет эффекта капиллярности.



а

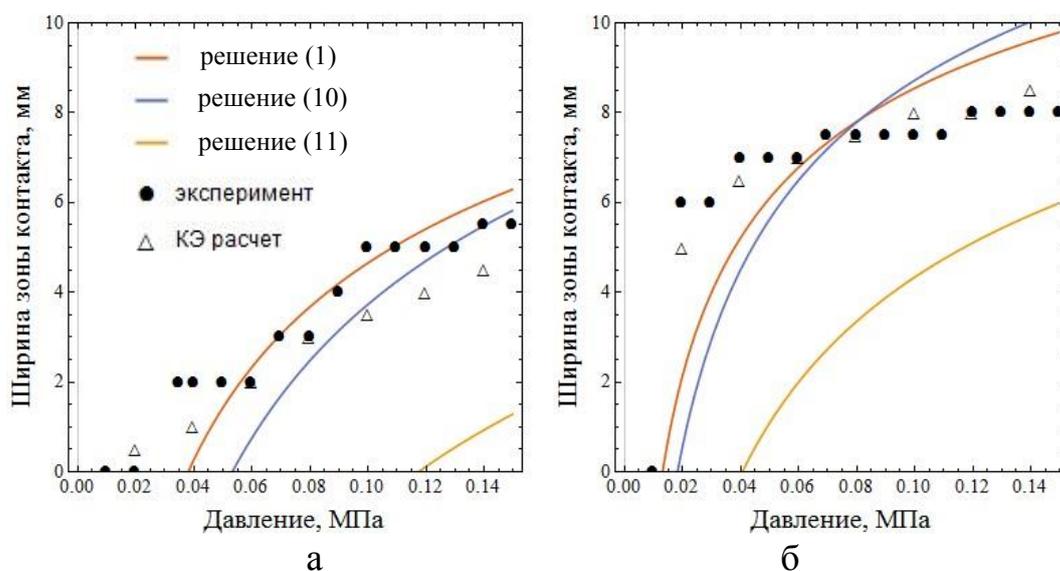
б

в

Рис. 10. Измерение ширины зоны контакта (пятно из капель нанесенного аэрозоля образуется при контакте поверхности трубы со стеклом) (а), фрагмент малой трубы, в: фрагмент большой трубы (б).

Были испытаны два фрагмента труб с размерами с размерами $r = 1.75$ мм, $2l = 21.5$ мм, $h = 0.2$ м и $r = 7$ мм, $2l = 102$ мм, $h = 1.8$ мм (рис. 10 б, в). Задаваемое давление контролировалось с точностью 0,005 МПа и изменялось в диапазоне 0-0,15 МПа для малой трубы и в диапазоне 0-0,3 МПа для большой трубы. Эти диапазоны и зазоры были выбраны таким образом, чтобы в трубах не возникало пластических деформаций, что проверялось предварительным численным моделированием. Ширина зоны контакта мерялась в 3-5 точках по длине трубы и найденные значения усреднялись и наносились на графики. Результаты испытаний в сопоставлении с результатами расчетов показаны на рис. 11.

Из проведенных экспериментов следует, что наиболее простое решение (1) для ширины зоны контакта достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментов. Применение более сложного решения (8) для рассмотренных фрагментов труб не позволило улучшить теоретическую оценку. Применение решения (9) дает слишком заниженную оценку ширины зоны контакта. Численно решение (треугольники-точки на рис. 11), построенное в системе Ansys с учетом нелинейных деформаций и коэффициента трения 0,2, позволяет получить хорошее описание эксперимента, но требует достаточно длительных вычислений.



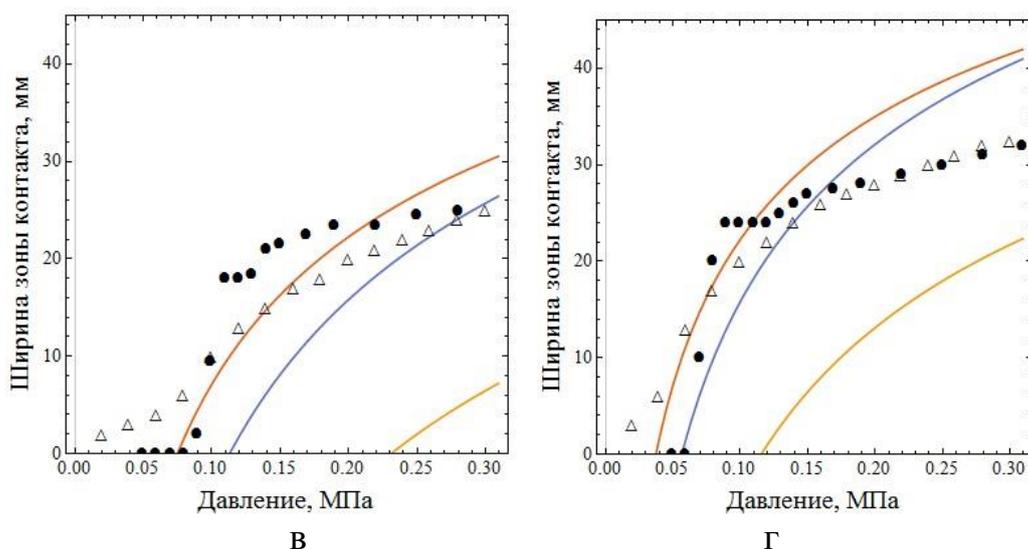


Рис. 11. Зависимость ширины зоны контакта от давления: малая труба, зазор $w = 0.15$ мм (а), малая труба, зазор $w = 0.05$ мм (б), большая труба, зазор $w = 0.2$ мм (в), большая труба, зазор $w = 0.1$ мм (г).

В четвертой главе диссертации представлены результаты конечно-элементных расчетов для труб охлаждения с различной формой поперечного сечения, отличным от плоскоовального. В этой главе показано, что выбранное сечение труб является наиболее оптимальным с точки зрения получения наиболее широкой зоны контакта при наименьшей концентрации напряжений в стенках каналов. Также в четвертой главе дана оценка длительной прочности каналов на основе результатов статических расчетов и формулы Лэнджера.

В заключении представлены выводы по работе и перечислены основные результаты проведенного исследования.

В приложениях к диссертации представлены результаты внедрения проведенных исследований, а также дано обоснование требований к системе терморегулирования АФАР. Получены оценки температурных зависимостей основных характеристик полупроводниковых приборов при повышении температуры выше нормальной. Показано, что при повышении температуры надежность полупроводниковых приборов существенно снижается: среднее время наработки на отказ уменьшается примерно в 10 раз при повышении температуры на 10 градусов. Установлено, что система терморегулирования АФАР должна обеспечивать стабильность разности температур между каналами АФАР в пределах 10 °С. В этом случае значения деградации характеристик ФАР в большинстве практических применений являются приемлемыми и могут быть приняты в качестве допустимых технологических отклонений при разработке аппаратуры.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Решена задача об определении ширины зоны контакта между тонкостенной оболочкой плоскоовального сечения (каналом охлаждения) и жесткой плоскостью в условиях действия гидростатического давления. Решение контактной задачи для оболочки сведено к решению задачи о деформациях балки единичной ширины для случая плоского деформированного состояния. Построены аналитические и численно-аналитические решения в приближении малых и больших прогибов в рамках классической теории изгиба балок и в приближении малых прогибов в рамках модели балок типа Тимошенко. Показано, что построенные решения в рамках неклассических теорий в предельных случаях (малые прогибы, малая толщина стенки) выходят на классическое решение.
2. Проведена экспериментальная проверка предложенной аналитической методики оценки ширины зоны контакта в системе терморегулирования АФАР на основе испытаний труб плоскоовального сечения.
3. Результаты аналитических расчетов подтверждены на основе численного конечно-элементного моделирования. Дана оценка прочности труб системы терморегулирования с различной формой поперечных сечений. Показана эффективность выбранной формы поперечного сечения труб с точки зрения статической и циклической прочности.
4. С применением разработанных расчетных методов предложена новая конструкция системы терморегулирования АФАР и достигнут необходимый уровень теплопередачи за счет применения нового типа конструктивных элементов. В отличие от традиционных методов охлаждения приемо-передающих модулей предложено создать способ охлаждения с помощью деформируемых U-образных труб плоскоовального сечения. Таким образом, предложен и апробирован подход и конструктивные решения, позволяющие усовершенствовать существующие системы охлаждения АФАР и обеспечить их надежную и эффективную работу.

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ:

1. Добрянский В. Н., Рабинский Л. Н., Радченко В. П., Соляев Ю. О. Оценка ширины зоны контакта между плоскоовальными каналами охлаждения и корпусом приемо-передающего модуля активной фазированной антенной решётки. Электронный журнал Труды МАИ. 2018. № 101. <http://trudymai.ru/published.php?ID=98252>
2. Бабайцев А.В., Рабинский Л.Н., Радченко В.П., Венценовцев Д.Л. Оценка прочности и выбор оптимальной формы поперечного сечения тонкостенных металлических трубок системы охлаждения АФАР. Технология металлов. 2017. № 10. С. 38-46.

3. Бабайцев А.В., Венценосцев Д.Л., Рабинский Л.Н., Радченко В.П. Оценка тепловых режимов приемопередающего модуля активной фазированной антенной решеткой. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-1. С. 365-374.
4. Крахин О.И., Радченко В.П., Венценосцев Д.Л.; Методы создания системы отвода теплотеплонагруженных частей ФАР. Радиотехника. 2011г. N 10, 88-94 с.
5. Левитан Б.А., Радченко В.П., Топчиев С.А. Мобильная специализированная радиолокационная станция. Радиотехника 2014. № 1. С. 059-064.

Публикации в других изданиях:

1. Радченко В.П. Рабинский Л.Н. Решение задачи об определении ширины зоны контакта между цилиндрической оболочкой плоскоовального поперечного сечения и жесткой плоскостью. В книге: Тезисы докладов VI международного научного семинара "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы», МАИ. 2017. С. 104.
2. Радченко В.П. Оценка тепловых режимов основных тепловыделяющих элементов приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки. В книге: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXIII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. 2017. С. 79-80.
3. Рабинский Л.Н., Радченко В.П. Расчет напряженно-деформированного состояния труб системы охлаждения АФАР, работающих в условиях гидростатического давления и нагрева. В книге: Тезисы докладов V международного научного семинара "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы», МАИ. 2016. С. 157-158

По результатам работы получены патенты:

1. Патент на изобретение №2615661 «Способ охлаждения АФАР». Авторы Радченко В.П., Топчиев С.А., Тушнов П.А.
2. Патент на изобретение №2624437 «Мобильная радиолокационная станция». Авторы Левитан Б.А., Топчиев С.А., Радченко В.П., Никитин М.В., Захаров А.А., Логинов А.Е.
3. Патент на изобретение №2564152 «Способ охлаждения активной фазированной антенной решетки» Авторы Венценосцев Д.Л., Левитан Б.А., Радченко В.П. Смолин М.Г., Токмаков Д.И., Топчиев С.А., Тушнов П.А.
4. Патент на изобретение №2556863 «Корпус радиоэлектронного устройства (варианты)» от 16.07.2014.

