
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.372.8

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ТЕРМОУПРУГОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛНОВОДА**© 2019 г. И. В. Кудрявцев^{1,*}, А. В. Минаков¹, А. Е. Митяев¹¹ *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия***e-mail: ikudryavcev@sfu-kras.ru*

Поступила в редакцию 07.02.2018 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Исследуется междисциплинарный вопрос о влиянии потерь мощности передаваемых по волноводам сверхвысокочастотных сигналов на их термоупругое состояние. Оценка температурного поля осуществляется на основе разработанной математической модели с дифференциальным уравнением теплового баланса волновода, которое учитывает различные условия его эксплуатации и решается методом конечных разностей в разработанной программе.

Ключевые слова: сверхвысокочастотные сигналы, волноводы, токопроводящие покрытия, коэффициент потерь, термоупругое состояние

DOI: 10.1134/S0235711919040102

Термоупругое состояние рассчитывается по методике с использованием уточненной формулы Стони, что позволяет оценивать, как нормальные напряжения в волноводе, так и касательные напряжения между его стенками и токопроводящим покрытием. Полученное решение для термоупругого состояния волновода может использоваться для уточнения его температурного и напряженного состояний с целью обеспечения условий прочности и долговечности в целом и токопроводящего покрытия, в частности.

Введение. Волноводы предназначены для передачи электромагнитных сигналов сверхвысокой частоты (СВЧ) между антеннами и приемо-передающими блоками в различной технике: в авиакосмической отрасли, системы радиолокации, военная и гражданская связь и др.

В процессе эксплуатации волноводы подвергаются различным внешним воздействиям: деформационным, силовым и температурным (например, от солнечного излучения). С целью обеспечения работоспособности волноводов, разработаны и используются соответствующие методики их расчета на прочность и жесткость [1].

Вместе с тем, в настоящее время происходит изменение спектра частот и рост мощности передаваемых по волноводам СВЧ-сигналов при одновременном увеличении их срока активной эксплуатации, что требует уточнения существующих методов их расчета для учета влияния воздействия таких внешних факторов, которые ранее были второстепенными. Это особенно актуально для автономных систем, длительно работающих в экстремальных условиях, например, для космических аппаратов связи, навигации и геодезии, срок активного существования которых может достигать 15 лет и даже более.

Повышение мощности передаваемых высокочастотных сигналов до 10 кВт и более приводит к заметному нагреву волноводов. Поскольку при эксплуатации волноводов передача сигналов высокой мощности происходит регулярно, то данный нагрев будет представлять собой дополнительное термоциклирование, которое необходимо учиты-

вать для уточнения их термоупругого состояния. Данная проблема будет особенно актуальной для волноводов, эксплуатируемых в условиях открытого космоса, где конвективный обмен практически отсутствует и возможности для рассеивания избыточного тепла весьма ограничены.

Периодическое изменение температуры волноводов при передаче СВЧ-сигналов приводит к появлению дополнительных температурных напряжений, которые в сочетании с рабочими нагрузками могут приводить к недопустимым деформациям, трещинам, нарушению герметичности конструкции и т.д.

Различие в механических и тепловых свойствах материала волновода и токопроводящего покрытия на его внутренних стенках приводит к появлению в местах их соединения касательных напряжений, которые будут изменяться периодически во времени в соответствии с передачей сигналов. В результате такого термоциклирования может произойти отслаивание слоя токопроводящего материала и нарушению работоспособности волноводов до наступления гарантированного срока активной эксплуатации (САС).

Решить данную проблему возможно с помощью разработки методов расчета, уточненного термоупругого состояния волноводов.

Проведенный обзор существующей литературы [2–7] по данной проблеме показал, что авторы рассмотренных источников отмечают только лишь очень малые потери (менее 1%) мощности передаваемых сигналов в волноводах и делается вывод об отсутствии необходимости учета выделения тепла. Однако, в случае передачи СВЧ-сигналов большой мощности образующимся нагревом пренебрегать некорректно.

В связи с этим, в данной работе нами предлагаются методика расчета термоупругого состояния тонкостенной конструкции волноводов и его токопроводящего покрытия в результате нагрева, образующегося при затухании передаваемых СВЧ-сигналов.

Расчет по предлагаемой методике состоит из трех этапов: 1) расчет мощности, затухающей и рассеивающейся на рассматриваемом участке волновода; 2) оценка температурного поля волновода при выделении в нем рассчитанной мощности с учетом тепловых условий окружающей среды; 3) определение термоупругого состояния волновода в целом с возможностью оценки локальных напряжений в токопроводящем покрытии на основе рассчитанного температурного поля.

Полученное решение будет являться уточнением для других эксплуатационных внешних воздействий на волновод: силовых, деформационных, температурных и т.д. и позволит обеспечить условия его работоспособности в течение заданного срока активной эксплуатации.

1. Оценка рассеиваемой мощности сигнала. В процессе распространения электромагнитной волны по волноводу происходит затухание мощности передаваемого СВЧ сигнала вследствие рассеивания его части в скин-слое токопроводящего покрытия на внутренних стенках тонкостенной конструкции. Причин затухания сигнала несколько: 1) потери в токопроводящем слое материала на внутренних стенках волновода; 2) потери в диэлектрике во внутренней полости волновода; 3) потери на излучение из-за неплотного соединения отдельных элементов участка волноводно-распределительной системы и др.

В результате мощность передаваемого СВЧ-сигнала вдоль волновода (ось z на рис. 1) будет уменьшаться по экспоненциальному закону [2]

$$\Delta P = P_{\text{вх}}(1 - e^{-2\alpha l}) \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность на входе волновода, Вт; α – коэффициент потерь, дБ/м; l – длина волновода, м.

В зависимости (1) коэффициент потерь (затухания) α можно определить с помощью различных теоретических зависимостей, предлагаемых различными авторами [2–5], которые зависят от условий распространения электромагнитного сигнала (геометрические размеры волновода, свойства материала его стенок и токопроводящего слоя, параметры диэлектрика, характеристики передаваемого СВЧ-сигнала и др.).

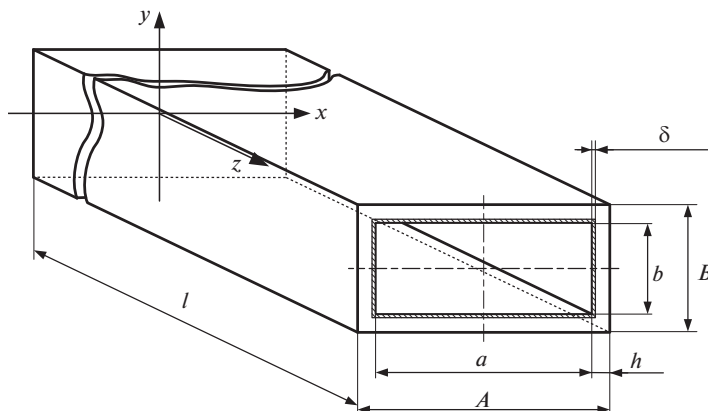


Рис. 1.

В наиболее распространенном случае передачи по прямолинейному участку волновода прямоугольного поперечного сечения магнитной волны типа H_{10} теоретическое значение коэффициента потерь α , согласно [2], можно определить по следующей зависимости:

$$\alpha = \frac{2a^3 + b\lambda^2}{abZ} \sqrt{\frac{10^{-7} \pi f \mu_a \rho}{4a^2 - \lambda^2}} \text{ [дБ/м]}, \quad (2)$$

где $\pi - 3.1415$; f – частота передаваемого сигнала, Гц; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м; ρ – удельное сопротивление материала скин-слоя, Ом м; a – ширина ($a > b$) внутренней полости волновода, м; b – высота ($a > b$) внутренней полости волновода, м; λ – длина волны передаваемого сигнала, м; Z – волновое сопротивление среды распространения сигнала, Ом.

При этом все авторы уточняют, что действительные значения коэффициента потерь (2) оказываются больше расчетных значений на 10–30% [2–5].

Способы определения значений коэффициента потерь α для криволинейных волноводов в рассмотренной литературе [2–7] не приводятся из-за сложности математического характера при их аналитическом расчете. Однако в этих случаях возможно воспользоваться существующими программами на ЭВМ, которые позволяют численными методами исследовать распространение электромагнитных полей в криволинейных волноводах [8].

Согласно приведенным уравнениям расчет потери мощности передаваемого СВЧ-сигнала был реализован в разработанной программе на ЭВМ [10].

2. Расчет температурного поля волновода. Рассеиваемая по волноводу мощность (1) выделяется в толщине скин-слоя на его внутренних стенках. Значение толщины скин-слоя зависит от частоты СВЧ-сигнала, свойств материала и определяется согласно выражению [5]

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho \mu_0}{f \mu_a}} \text{ [м]},$$

где ρ – удельное сопротивление материала волновода, Ом м; f – частота передаваемого сигнала, Гц; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость свободного пространства; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала скин-слоя, Гн/м.

Примем, что рассеиваемая мощность (1) полностью преобразовывается в тепловую энергию. Тогда температурное поле волновода будет полностью определяться услови-

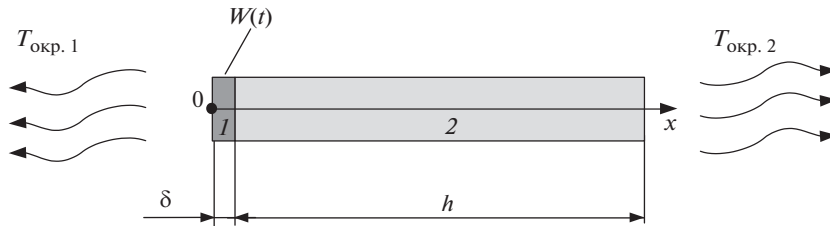


Рис. 2.

ями его теплообмена с окружающей средой. В этом случае задача сводится к решению уравнения теплопроводности с заданными краевыми условиями и источником тепла интенсивностью $W(t)$. Пусть весь тепловой поток проходит через стенки волновода по нормали к ним, а краевыми эффектами в углах соединения пластин и на торцах участка будем пренебрегать. В этом случае для расчета температурного поля волновода будет корректна одномерная тепловая модель (рис. 2), которую описывает параболическое дифференциальное уравнение теплопроводности с источником тепла в виде [6]

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{c_2 \gamma_2} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{W(t)}{c_1 \gamma_1}, \quad (3)$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности материала стенок, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$; c_2 – удельная теплоемкость материала стенок, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$; γ_2 – удельная плотность материала стенок, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; c_1 – удельная теплоемкость материала скин-слоя, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$; γ_1 – удельная плотность материала скин-слоя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $W(t)$ – интенсивность источника тепла в скин-слое, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right]$:

$$W(t) = \frac{(1 - e^{-2\alpha l}) P_{\text{вх}}(t)}{S \delta},$$

где S – площадь боковых поверхностей всех стенок волновода, м^2 .

Как известно, однозначное решение дифференциального уравнения (3) требует задания начального и граничных условий на наружной и внутренней стенках волновода.

В качестве начального условия принимаем однородное температурное поле в момент времени $t = 0$

$$T_0 = \text{const}. \quad (4)$$

Граничные условия задаются на границах рассматриваемой области, ими в рассматриваемом случае будут являться внутренняя и наружная поверхности стенки волновода (рис. 2), через которые происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру $T_{\text{окр}1}$ и $T_{\text{окр}2}$. Для внутренней стенки волновода ($x = 0$) условие теплообмена имеет вид

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x=0,t)}{\partial x} + \alpha_1 [T_1(x=0,t) - T_{\text{окр}1}] = 0, \quad (5)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала скин-слоя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^{*0} \cdot \text{°C}}$; $T_1(x=0,t)$ – температура на поверхности внутренней стенки волновода; α_1 – коэффициент тепло-

обмена поверхности внутренней стенки со средой внутри волновода, $\frac{W}{m^{2,0} C}$; $T_{\text{окр1}}$ – температура среды внутри волновода, °С.

Второе граничное условие, определяет условие теплообмена наружных стенок волновода с окружающей средой и имеет вид

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x = h, t)}{\partial x} + \alpha_2 [T_2(x = h, t) - T_{\text{окр2}}] = 0, \quad (6)$$

где $T_2(x = h, t)$ – температура на внешней поверхности стенок волновода; α_2 – коэффициент теплообмена внешних поверхностей стенок с окружающей средой снаружи волновода, $\frac{W}{m^{2,0} C}$; $T_{\text{окр2}}$ – температура окружающей среды снаружи волновода, °С.

При работе волновода в условиях Космоса преобладающим способом переноса тепловой энергии является лучистый теплообмен. В этом случае необходимо задать условия чистого теплообмена на внешних поверхностях стенок волновода, которое имеет вид

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x = h, t)}{\partial x} - \sigma_2 [T_{\text{окр2}}^4 - T_2^4(x = h, t)] = 0, \quad (7)$$

где σ_2 – приведенный коэффициент лучеиспускания, $\frac{W}{m^{2,0} C}$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (3) с крайвыми условиями (4)–(7) позволяет определять температурное поле прямолинейного участка волновода любых размеров, материалов, параметров передаваемого СВЧ-сигнала и условий эксплуатации.

Решение задачи теплопроводности выполнялось с помощью численного метода конечных разностей по явной схеме в специально разработанной программе на ЭВМ [11].

3. Напряженное состояние волновода. Оценку термоупругого состояния волновода в целом можно проводить по ранее разработанным методам расчета [13, 14], в которых необходимо использовать фактическую температуру волновода, полученную на основании решения уравнения теплопроводности (3), учитывающем нагрев от передачи СВЧ-сигналов и условия окружающей среды.

Локальное напряженное состояние в токопроводящем покрытии волновода будем оценивать на основании формулы Стони (Stoney) [15], которая после уточнения, согласно работе [16], позволяет рассчитывать напряжения в характерных точках (рис. 3) стенки волновода с учетом токопроводящего покрытия

$$\sigma_1 = \frac{E \Delta \alpha T h}{h + \delta} - \frac{E(h + \delta)}{2\rho} \text{ [Па]}, \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{E \Delta \alpha T h}{h + \delta} - \frac{E(h - \delta)}{2\rho} \text{ [Па]}, \quad (9)$$

$$\sigma_3 = -\frac{E \Delta \alpha T \delta}{h + \delta} - \frac{E(h - \delta)}{2\rho} \text{ [Па]}, \quad (10)$$

$$\sigma_4 = -\frac{E \Delta \alpha T \delta}{h + \delta} + \frac{E(h + \delta)}{2\rho} \text{ [Па]}, \quad (11)$$

где E – среднее значение модуля Юнга материала стенок и токопроводящего покрытия волновода в предположении их близких значений (для рассматриваемых конструкций волноводов это условие выполняется), [Па]; $\Delta \alpha$ – разница в коэффициентах термического расширения токопроводящего покрытия и стенки волновода, [°С⁻¹]; T – текущая температура волновода, °С; ρ – радиус кривизны стенки, вызванный из-

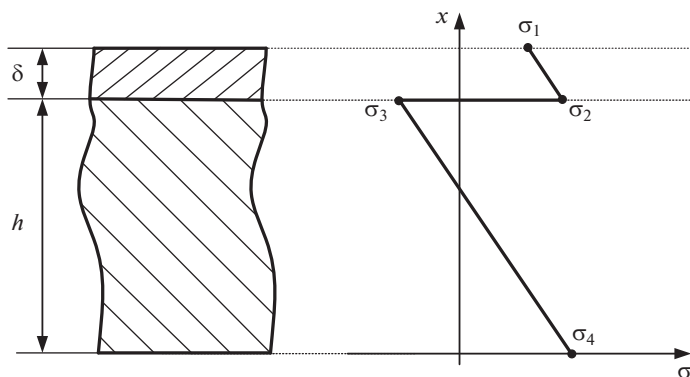


Рис. 3.

гибом вследствие разницы в коэффициентах термического расширения токопроводящего покрытия и стенки волновода, который можно определить по формуле [17]

$$\rho = \frac{1}{\Delta\alpha\Delta t} \left[\frac{h + \delta}{2} + \frac{1}{6(h + \delta)} \left(\frac{E_1\delta^3}{1 - \mu_1} + \frac{E_2h^3}{1 - \mu_2} \right) \left(\frac{1 - \mu_1}{E_1} \delta + \frac{1 - \mu_2}{E_2} h \right) \right],$$

где E_1 , μ_1 и E_2 , μ_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона токопроводящего покрытия и стенки волновода соответственно.

Для наглядности результатов расчетов нормальных напряжений, согласно выражениям (8)–(11), построим эпюру распределения их значений по толщине стенки волновода (рис. 3).

Согласно рис. 3 и зависимостям (8)–(11) величина касательных напряжений, возникающих на границе соединения стенки волновода и токопроводящего покрытия, определяется по зависимости

$$\tau = \sigma_2 - \sigma_3 = E\Delta\alpha\Delta t. \quad (12)$$

Уравнения (8)–(12) позволяют определять особенности локального напряженного состояния стенок волновода с учетом нанесенного на них токопроводящего покрытия.

4. Результаты расчетов. Проведены расчеты по разработанным методикам термоупругого состояния прямого участка волновода длиной 0.5 м и типоразмером 15×35 при передаче СВЧ-сигнала мощностью 10 кВ. В проектных расчетах для космических аппаратов в качестве максимально возможной температуры обычно используются ее крайние значения $\pm 120^\circ\text{C}$ [12]. Примем значение температуры $+120^\circ\text{C}$ за начальное и используем граничные условия, моделирующие условия эксплуатации волновода на околоземной орбите.

4.1. Тепловой расчет волновода. На рис. 4 показаны результаты расчета температурного поля волновода во времени при нагреве от передачи СВЧ-сигнала. Результаты показывают, что в условиях отсутствия конвекции нагрев волновода происходит весьма быстро (рис. 4а). Например, через 60 с фактическая температура волновода составит около 150°C , то есть будет на 30°C больше начального значения (120°C). При этом распределение температуры по толщине стенки можно считать постоянным (рис. 4б).

Таким образом, установлено, что текущее значение температуры волновода будет зависеть от начальной температуры, определяемой высотой орбиты космического аппарата и времени передачи сигналов. Температура волновода зависит и от габаритов волновода, уменьшаясь с увеличением его типоразмера за счет большей

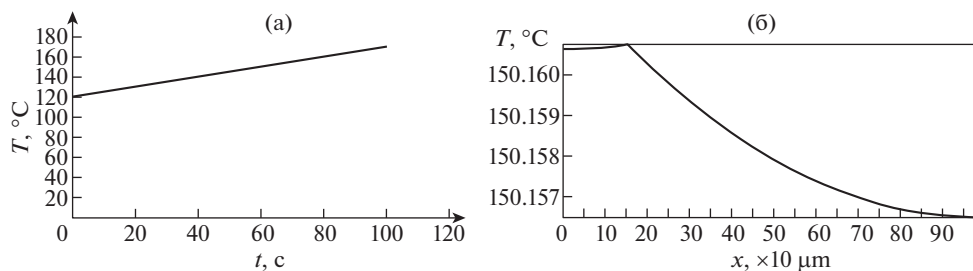


Рис. 4. (а) – изменение температуры волновода от времени, (б) – распределение температуры по толщине стенки.

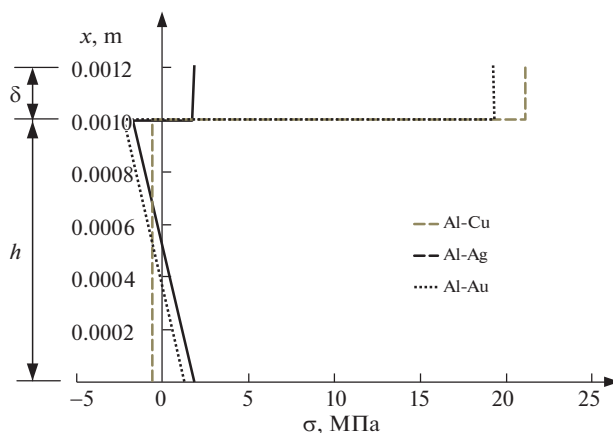


Рис. 5.

площади рассеивания мощности по сечению и увеличения площади поверхности лучеиспускания.

4.2. Результаты расчета напряженного состояния. Используя результаты расчета температурных полей волноводов, построим эпюру распределения нормальных напряжений при температуре 120°C для 3-х характерных случаев сочетания материалов стенки и токопроводящего покрытия (рис. 5).

Результаты расчетов показывают, что уровень нормальных напряжений по толщине стенки весьма мал и не является определяющим фактором прочности для токопроводящего покрытия. Поэтому далее проведем оценку касательных напряжений на границе токопроводящего покрытия и стенки волновода.

После подстановки требуемых данных в формулу (14) получаем, что в зависимости от температуры нагрева и материала токопроводящего покрытия значения касательных напряжений будут составлять 20–65 МПа (рис. 6).

Из результатов расчета касательных напряжений следует, что при расчетной температуре 120°C максимальные значения начинают приближаться к пределу выносливости материалов токопроводящего покрытия [18]. Совокупное периодическое действие касательных напряжений, вызванных солнечным излучением, передачей СВЧ-сигнала высокой мощности, а также другими рабочими нагрузками (монтажные усилия, силы инерции и др.) может привести к превышению предела выносливости материала токопроводящего слоя и его усталостному разрушению. Таким образом, прочность

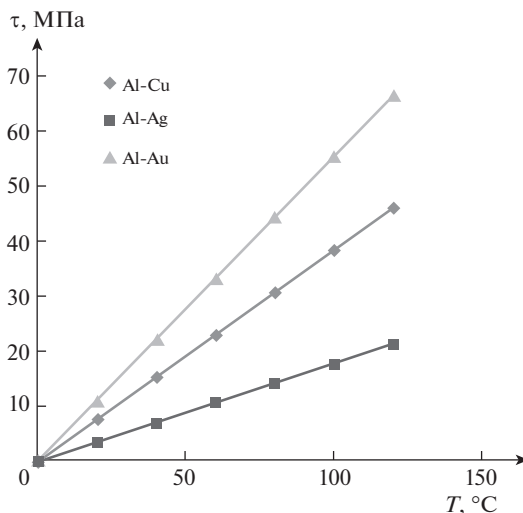


Рис. 6.

токопроводящего покрытия в основном зависит от уровня касательных напряжений на границе соединения материалов стенки и токопроводящего покрытия.

Результаты расчетов показывают, что с точки зрения прочности наилучшим вариантом материала для токопроводящего слоя, наносимого на алюминиевые стенки волновода является серебро.

Во избежание усталостного разрушения токопроводящего покрытия необходим соответствующий набор технологических и конструктивных приемов. Например, с целью снижения максимальной величины касательных напряжений необходимо выбрать наиболее рациональный материал покрытия и использовать такой режим его нанесения, при котором после изготовления будут действовать компенсирующие остаточные напряжения требуемого знака и величины [19]. Снизить максимальные напряжения также возможно путем увеличения типоразмера волноводов, организацией отвода тепла и др., что также уменьшит пиковые значения напряжений.

Заключение. В данной статье предложен способ оценки влияния потерь мощности сверхвысокочастотных сигналов, передаваемых по волноводам, на их термоупругое состояние. Для этого разработана математическая модель процесса нагрева волновода и получено разрешающее дифференциальное уравнение задачи с начальными и граничными условиями, соответствующие условиям работы волноводов на Земле и в открытом космосе.

С учетом особенностей распределения температур по волноводу при передаче СВЧ-сигналов высокой мощности получены зависимости, уточняющие его напряженное состояние в целом и с учетом токопроводящего покрытия.

Разработанные методики могут использоваться для уточнения термоупругого состояния волноводов для обеспечения условий их прочности в целом и токопроводящего покрытия в частности.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-48-242110.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сильченко П.Н., Михнев М.М., Анкудинов А.В. и др. Обеспечение прочности и точности крупногабаритных волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 1. С. 112.
2. Ефимов И.Е. Волновые линии передачи. М.: Связь, 1979. С. 232.
3. Кинг Р. Передающие линии, антенны, волноводы. 2012. С. 360.
4. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. и др. Устройства СВЧ и антенны / Учебное пособие. 2-е издание, дополненное и переработанное. М.: Радиотехника. 2006. С. 376.
5. Пименов Ю.В., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. М.: Радио и связь. 2000. С. 536.
6. Карташов Э.М. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М.: Книжный дом Либроком, 2012. С. 656.
7. Котельников И.А. О затухании в волноводе // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 9. С. 91.
8. Finnveden S. Waveguide finite elements for curved structures // Journal of Sound and Vibration. 2008. № 312. P. 644.
9. Кудрявцев И.В., Гоцелюк О.Б., Новиков Е.С. Особенности нагрева волноводов при передаче сверхвысокочастотных сигналов большой мощности // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 1. С. 90.
10. Кудрявцев И.В., Гоцелюк О.Б., Новиков Е.С. и др. Программа для оценки потерь мощности СВЧ-сигналов при их передаче по прямым участкам волноводов "PowerLoss". Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016660485, 15.09.2016 г.
11. Кудрявцев И.В., Гоцелюк О.Б., Новиков Е.С. и др. Программа для расчета теплового состояния волноводов при передаче СВЧ-сигналов высокой мощности ThermoLoss. Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016660369, 14.09.2016 г.
12. Чеботарев В.Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения / Учебное пособие: в 2 кн. Красноярск: СибГАУ, 2005. С. 168.
13. Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнев М.М. Уточненное решение системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба оболочечных конструкций волноводов сечения // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2017. № 5. С. 4.
14. Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В. и др. Термоупругий анализ прямых элементов складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением // Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012661202, 10.12.2012 г.
15. Stoney G.S. The tension of metallic films deposited by electrolysis // Proceedings of the Royal Society A. 1990. V. 82. NA553. P. 172.
16. Добрынин А.В. О применимости формулы Стони для расчета механических напряжений в толстых пленках и покрытиях // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 32.
17. Timoshenko S.P. Analysis of Bi-Metal Thermostats // Journal of the Optical Society of America the Review of Scientific Instruments. 1925. V. 11. № 3. P. 233.
18. Троценко В.Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов. Киев: Наукова Думка, 1987. С. 347.
19. Ковенский И.М., Моргуи А.И., Подборнов Н.В. Возникновение и релаксация внутренних напряжений в металлических покрытиях // Ж. Нефть и газ. 2002. № 4. С. 81.