

Теплообмен в широкоапертурных поглощающих нагрузках жидкостных сверхвысокочастотных калориметров

© А.И. Климов, В.Ю. Конев

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: klimov@lfe.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2024 г.
В окончательной редакции 29 августа 2024 г.
Принято к публикации 1 октября 2024 г.

С помощью программы CST Microwave Studio выполнено моделирование тепловых процессов в широкоапертурных дискообразных поглощающих нагрузках калориметров с рабочей жидкостью на основе этилового спирта при поглощении энергии мощных импульсов сверхвысокочастотного излучения. Исследованы нагрузки с плоскими и ребристыми входными окнами на несущих частотах 3 и 10 GHz. Проанализированы особенности и оптимальные условия использования пакета CST Microwave Studio применительно к решаемым задачам. Для плоских входных окон выполнено сравнение результатов моделирования с аналитическими оценками на основе задачи об остывании полупространства, заполненного однородной средой, имеющей в начальный момент времени скачок температуры. Получены временные зависимости ухода тепла из рабочей жидкости во входные окна в течение отрезка времени измерения энергии импульсов сверхвысокочастотного излучения калориметром. Рассчитано занижение измеряемой энергии относительно сверхвысокочастотной энергии, выделившейся в рабочей жидкости.

Ключевые слова: мощные сверхвысокочастотные импульсы, тепловые процессы, рабочая жидкость, ребристое диэлектрическое входное окно, численное моделирование, CST Microwave Studio

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59093.205-24

Введение

Жидкостные калориметры [1] с дискообразными широкоапертурными поглощающими нагрузками успешно используются для измерения энергии мощных импульсов сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения. Действие калориметров основано на измерении увеличения объема рабочей жидкости на основе этилового спирта, заполняющей нагрузку, при поглощении энергии СВЧ импульса. К настоящему времени разработаны калориметры с ручным и электронным управлением. Время измерения поглощенной энергии составляет несколько секунд. Оно близко к времени механической реакции нагрузки калориметра.

На рис. 1 показаны схематический рисунок и внешний вид дискообразной поглощающей нагрузки с ребристым входным окном. Корпус нагрузки изготовлен из полиэтилена высокой плотности, а форма нагрузки, включая геометрию ребристого входного окна, оптимизировалась методом компьютерного моделирования с целью достижения минимального коэффициента отражения СВЧ излучения.

Поглощение энергии СВЧ импульсов в рабочей жидкости сопровождается возникновением и развитием тепловых процессов, которые проявляются в утечке части тепла в диэлектрическое входное окно поглощающей нагрузки и, вследствие этого, — занижении измеряемой энергии. Первая попытка выполнить исследование этих процессов применительно к широкоапертурным погло-

щающим нагрузкам с плоскими входными окнами с помощью программного пакета CST Microwave Studio в сравнении с аналитическими оценками была предпринята в работе [2]. Однако последующий анализ результатов этой работы показал необходимость более детального исследования и уточнения условий использования программного пакета CST Microwave Studio, причем применительно не только к поглощающим нагрузкам с

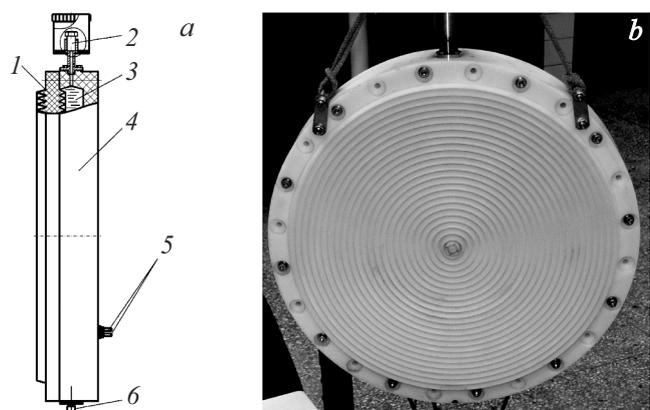


Рис. 1. Схематический рисунок (а) и внешний вид (б) дискообразной широкоапертурной поглощающей нагрузки калориметра трехсантиметрового диапазона со стороны входного окна [1]: 1 — ребристое входное окно; 2 — заливная пробка; 3 — рабочая жидкость; 4 — крышка; 5 — контакты нагревательных спиралей; 6 — сливная пробка.

плоскими, но и, что важнее, с ребристыми входными окнами, чему посвящена настоящая работа.

1. Аналитические оценки для модели широкоапертурной поглощающей нагрузки с плоским входным окном

Прежде всего, интерес представляет анализ более простого случая – широкоапертурной дискообразной поглощающей нагрузки с плоским входным окном (рис. 2). Такая нагрузка также может быть использована в жидкостном СВЧ калориметре [3].

Этиловый спирт является средой, сильно поглощающей СВЧ излучение, поэтому выделение СВЧ энергии происходит вблизи границы раздела между рабочей жидкостью и диэлектриком. В случае ребристого окна выделение энергии сосредоточено также вблизи диэлектрика, и процессы теплопередачи могут иметь общие особенности с таковыми в случае плоского окна. Плоская геометрия нагрузки позволяет сделать аналитические оценки, результаты которых представляют интерес для сравнения с результатами компьютерного моделирования.

Строгое аналитическое рассмотрение процесса теплопередачи даже в случае плоской геометрии представляет собой сложную задачу. Некоторую ясность может внести анализ на основе использования результатов решения известной задачи [4] об остывании полупространства (рис. 3), заполненного однородной средой, имеющей в начальный момент времени скачок температуры.

Поскольку термодинамические характеристики полиэтилена и этилового спирта различаются не очень сильно, использование решения данной задачи в первом приближении представляется оправданным.

В начальный момент времени $t = 0$ температура среды $t = T_0$ везде при $z > 0$. Температура T_1 поверхности $z = 0$ всегда постоянна, $T_1 < T_0$. Необходимо найти

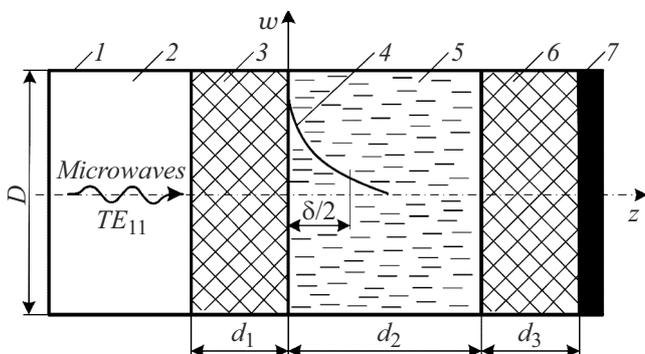


Рис. 2. Расчетная геометрия дискообразной поглощающей нагрузки с плоским входным окном с диаметром много больше длины волны, $D \gg \lambda$: 1 — волновод; 2 — воздух; 3 — плоское входное полиэтиленовое окно; 4 — распределение плотности поглощенной СВЧ энергии; 5 — спирт; 6 — задняя полиэтиленовая стенка; 7 — СВЧ поглотитель.

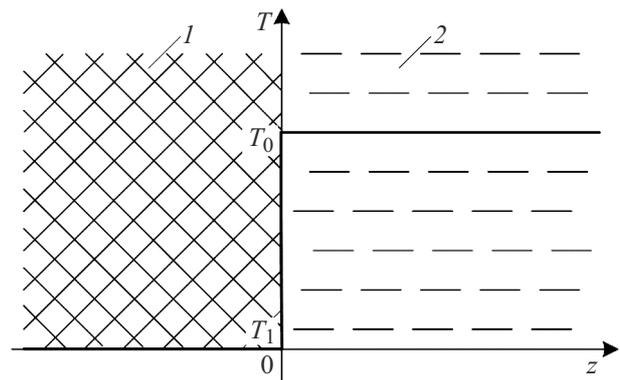


Рис. 3. К задаче об остывании полупространства: 1 — полиэтилен; 2 — спирт.

распределение температуры среды $T(z, t)$ в полупространстве $z > 0$ для моментов времени $t \geq 0$. Среда справа от плоскости $z = 0$ моделирует этиловый спирт в поглощающей нагрузке и имеет соответствующие ему физические характеристики. А сама плоскость $z = 0$ соответствует границе раздела спирта и диэлектрика входного окна. Распределение температуры $T(z, t)$ описывается уравнением теплопроводности [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad \chi = \frac{\kappa}{\rho c_v},$$

где χ — коэффициент температуропроводности, κ — коэффициент теплопроводности, ρ и c_v — плотность и удельная теплоемкость спирта при постоянном объеме соответственно.

Решение задачи для $t \geq 0$ имеет вид

$$T(z, t) = 2 \frac{T_0 - T_1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{\chi t}}} \exp(-\xi^2) d\xi + T_1,$$

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = \frac{T_0 - T_1}{\sqrt{\pi \chi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\chi t}\right),$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = \frac{T_0 - T_1}{\sqrt{\pi \chi t}},$$

поэтому можно оценить зависимости плотности тепловой мощности $p_0(t)$ и плотности потока тепла $\Delta w_0(t)$ от времени через границу раздела жидкости и диэлектрика $z = 0$:

$$p_0(t) = \kappa \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = \kappa \frac{T_0 - T_1}{\sqrt{\pi \chi t}},$$

$$\Delta w_0(t) = \int_0^t p_0(t') dt' = 2\kappa(T_0 - T_1) \sqrt{\frac{t}{\pi \chi}}. \quad (1)$$

В нижеприведенных оценках использовались следующие значения характеристик этилового спирта [5–7] для

Таблица 1. Расчетные параметры модели поглощающей нагрузки с плоским входным окном

f , GHz	λ , mm	D , mm	d_1 , mm	d_2 , mm	d_3 , mm	K , dB	T_{tr} , MW	W_{tr} , J
3	100	600	17.5	45	25	-10.26	525	52.5
10	30	200	5.8	45	25	-12.3	546	54.6

температуры 20°C: $\rho = 789 \text{ kg/m}^3$, $c_v = 2130 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\kappa = 0.1705 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\chi = 0.904169 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, и $c_p = 2390 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ — удельная теплоемкость спирта при постоянном давлении.

Оценка приращения температуры $\Delta T = (T_0 - T_1)$, необходимого для расчета зависимостей $p_0(t)$ и $\Delta w_0(t)$, выполнялась для частот $f = 3$ и 10 GHz на оси симметрии круглого волновода для волны TE_{11} с вертикально направленным электрическим полем, падающей из воздуха на слоистую структуру (рис. 2). В аналитических оценках и компьютерном моделировании задавался СВЧ импульс с прямоугольной огибающей и амплитудой мощности $P = 580 \text{ MW}$ при длительности $\tau = 100 \text{ ns}$ (энергия 58 J). Толщина полиэтилена d_1 для обеих нагрузок с плоским входным окном оптимизировалась в процессе описанного ниже численного моделирования с целью минимизации коэффициента отражения СВЧ излучения K_r , с учетом которого рассчитывались мощность P_{tr} и энергия $W_{tr} = P_{tr}\tau$, прошедшие в спирт. Толщина спирта d_2 была достаточной для практически полного поглощения энергии СВЧ импульса, так что отражением от задней полиэтиленовой стенки толщиной d_3 можно было пренебречь. Как показало компьютерное моделирование, изменение условий на внешней стороне задней стенки, а именно установка отражающей металлической пластины или наличие слоя воздуха между стенкой и идеальным СВЧ поглотителем как в модели с плоским входным окном, так и в нижеописанных моделях с ребристыми входными окнами, не оказывало существенного влияния на результаты расчетов. Параметры для расчетов в случае модели с плоским входным окном представлены в табл. 1.

Поскольку для обеих частот выполняется условие $D \gg \lambda$, дисперсией волновода можно пренебречь, и может быть использовано выражение для электрического поля плоской волны, распространяющейся в среде с поглощением [8]: $E(z, t) = E_0 \exp[(j(\omega t - kz))]$, где E_0 — амплитуда электрического поля волны, $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$ — угловая частота, c — скорость света в вакууме. Поскольку спирт представляет собой среду с потерями, волновое число — комплексное: $k = k' + jk''$, где

$$k'k'' = \pm \frac{2\pi f}{c} \sqrt{0.5 \left[\sqrt{\varepsilon'^2(f) + \varepsilon''^2(f)} \pm \varepsilon'(f) \right]}.$$

Здесь $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$ — действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости спирта соответственно. Таким образом, электрическое поле волны в спирте затухает в соответствии с соотношением: $E(z, t) = E_0 \exp[j(\omega t - k'z)] \exp(k''z)$. Величина

$\delta = 1/|k''|$ есть пространственный масштаб затухания поля. Поскольку плотность потока мощности волны $\sim |E(z, t)|^2$, пространственный масштаб уменьшения плотности поглощенной мощности и плотности поглощенной энергии равен $\delta/[2 = 1/(2|k''|)]$, т.е. в два раза меньше пространственного масштаба затухания поля, и $p_{tr}(z) = p_{tr0} \exp(-2z/\delta)$ — плотность потока СВЧ мощности вблизи границы диэлектрик–спирт.

Для расчетов использовались $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$, полученные путем аппроксимации по формуле Дебая, соответственно, действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости этилового спирта с концентрацией 95%, на основании данных работы [9]. Для $f = 3 \text{ GHz}$ $\varepsilon'(f) = 10.1$, $\varepsilon''(f) = 9.4$. Для $f = 10 \text{ GHz}$ $\varepsilon'(f) = 6.0$, $\varepsilon''(f) = 3.4$. Для полиэтилена $\varepsilon'(f) = 2.25$, $\varepsilon''(f)/\varepsilon'(f) = 0.0004 - 0.0005$ [10], и поглощением СВЧ энергии во входном окне можно пренебречь.

Мощность ΔP_{tr} , выделяющаяся в тонком слое $\Delta z \ll \delta/2$ рабочей жидкости в пределах малого круга площадью S вблизи оси волновода (рис. 2):

$$\Delta P_{tr} = S[p_{tr}(z) - p_{tr}(z + \Delta z)] = p_{tr0}S \{ \exp(-2z/\delta) - \exp[-2(z + \Delta z)/\delta] \} \approx p_{tr0}S(2\Delta z/\delta) \exp(-2z/\delta).$$

Вблизи окна, $z = 0$, и $\Delta P_{tr} = 2p_{tr0}S\Delta z/\delta = 2p_{tr0}V/\delta$, где $V = S\Delta z$ объем слоя. Энергия, выделившаяся в слое:

$$\Delta P_{tr}\tau = 2p_{tr0}\tau V/\delta = m c_p(T_0 - T_1) = \rho V c_p(T_0 - T_1),$$

где $m = \rho V$ — масса слоя спирта, а разность температур

$$\Delta T = T_0 - T_1 = 2p_{tr0}\tau/(\delta \rho c_p). \quad (2)$$

Плотности потока мощности p_{tr0} и потока энергии $w_{tr0} = p_{tr0}\tau$ оценивались с использованием формулы, связывающей СВЧ мощность P_{tr} , прошедшую в спирт, и напряженность электрического поля E волны TE_{11} на оси круглого волновода [11]. В случае $D \gg \lambda$ $E_{\text{кВ/см}}^2 = 6320 P_{tr\text{MW}}/(\pi D_{\text{см}}^2)$. При этом вблизи оси волновода фронт волны близок к плоскому, поэтому можно использовать формулу, связывающую напряженность поля и плотность потока мощности для плоской волны: $E_{\text{кВ/см}}^2 = 729 p_{tr0\text{MW/cm}^2}$, откуда $p_{tr0\text{MW/cm}^2} = 8.67 P_{tr\text{MW}}/(\pi D_{\text{см}}^2)$. В табл. 2 приведены результаты расчетов по формуле (2) приращения температуры ΔT . С использованием полученных приращений температуры и соотношения (1) были рассчитаны зависимости от времени относительного ухода тепла $\Delta w_0/w_{tr0}$ из рабочей жидкости в диэлектрик. Они представлены ниже на рис. 4.

Таблица 2. Результаты расчетов приращения температуры на плоской границе раздела спирт–диэлектрик.

f, GHz	D, mm	$w_{tr0}, \text{J/cm}^2$	δ, cm	$\Delta T, \text{K}$
3	600	0.0402	1.17	0.0365
10	200	0.376	0.707	0.565

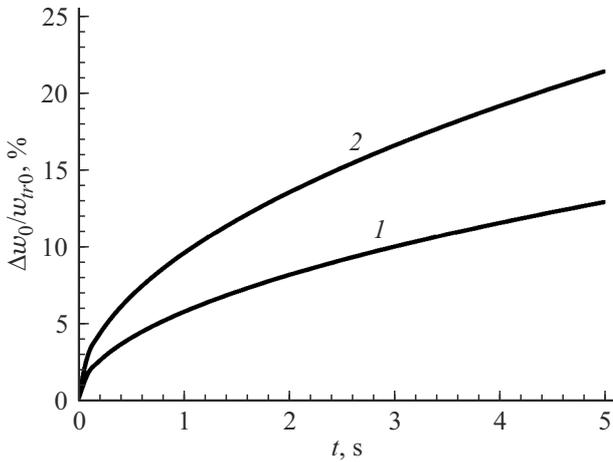


Рис. 4. Результаты аналитических оценок зависимостей от времени относительного ухода тепла из рабочей жидкости в диэлектрик для частоты 3 (1) и 10 GHz (2).

2. Численное моделирование

Как отмечалось выше, компьютерное моделирование тепловых процессов выполнялось с использованием программы CST Microwave Studio. Расчетная геометрия для моделирования поглощающих нагрузок с плоским входным окном представлена выше (рис. 2). Использовались данные для расчетов, включая параметры СВЧ импульса, приведенные в табл. 1. На рис. 5 представлены расчетные геометрии поглощающих нагрузок с ребристыми входными окнами для частот 3 и 10 GHz. Для обеих нагрузок, так же, как и в случае нагрузок с плоскими входными окнами, выполняется условие $D \gg \lambda$.

Как и в аналитических оценках, на частотах 3 и 10 GHz задавалась вертикально поляризованная волна TE_{11} , падающая на каждую из четырех нагрузок.

Расчетный коэффициент отражения СВЧ мощности от нагрузки, представленной на рис. 5, *a* ($f = 3 \text{ GHz}$), составляет $K_r = -18.7 \text{ dB}$, СВЧ мощность, прошедшая в спирт — $P_{tr} = 572 \text{ MW}$, а СВЧ энергия, поглощенная в спирте — $W_{tr} = 57.2 \text{ J}$. Для нагрузки, показанной на рис. 5, *b*, ($f = 10 \text{ GHz}$) $K_r = -23.5 \text{ dB}$, $P_{tr} = 577 \text{ MW}$, $W_{tr} = 57.7 \text{ J}$.

Для каждой нагрузки выполнялся электродинамический расчет установившейся в течение СВЧ импульса структуры электрических и магнитных полей и распределения плотности СВЧ мощности, поглощаемой в рабочей жидкости. Затем в модуле Thermal (вычисли-

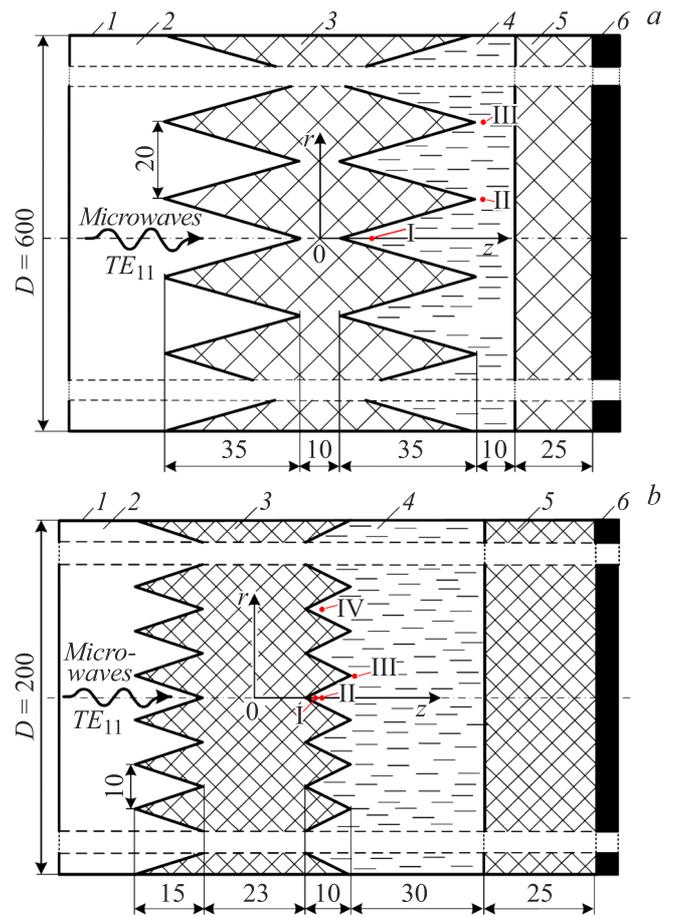


Рис. 5. Расчетные геометрии поглощающих нагрузок для несущей частоты 3 (а) и 10 GHz (b): 1 — волновод; 2 — воздух; 3 — полиэтиленовое входное окно; 4 — спирт; 5 — задняя стенка; 6 — СВЧ поглотитель. Римскими цифрами помечены точки, в которых рассчитывалась температура рабочей жидкости после поглощения импульса СВЧ излучения. Размеры приведены в миллиметрах.

тель переноса тепла Conjugate Heat Transfer Solver) на основе данных электродинамических расчетов задавались соответствующие источники тепловой мощности и выполнялось компьютерное моделирование тепловых процессов. Рассчитывалась температура T рабочей жидкости в различных точках и ее зависимость от времени. Выполнялся расчет потока тепла из рабочей жидкости в материал диэлектрика входного окна через всю его поверхность и моделировались конвекционные потоки жидкости.

3. Анализ результатов

3.1. Поглощающие нагрузки с плоскими входными окнами

Требования к условиям компьютерного моделирования, заключающиеся в определении размеров простран-

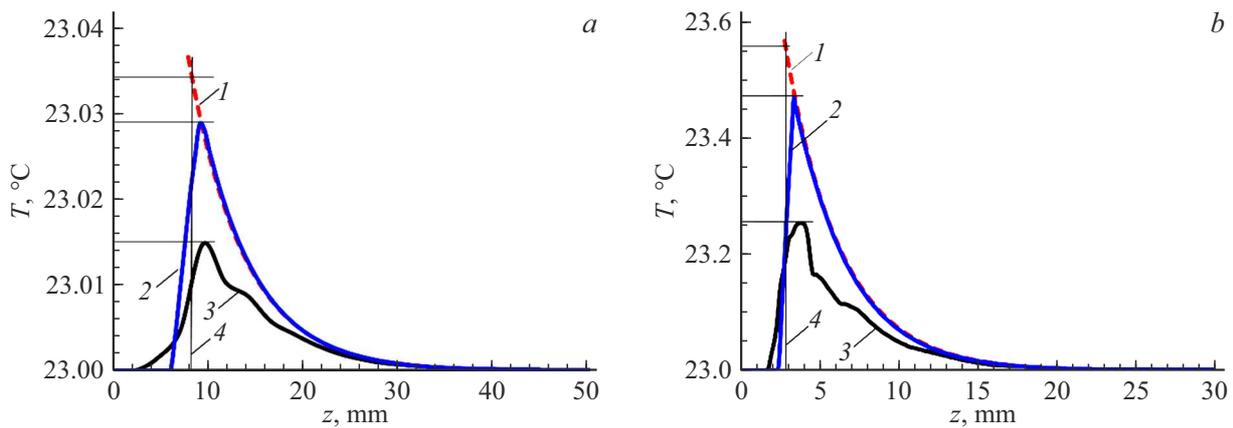


Рис. 6. Распределения температуры рабочей жидкости вдоль оси z для поглощающих нагрузок с плоским входным окном на частоту 3 (*a*) и 10 GHz (*b*): 1 — аналитические расчеты, 2 — результаты расчета в электродинамическом модуле, 3 — результаты расчета в модуле Thermal, 4 — положение границы раздела между диэлектриком и жидкостью.

ственных ячеек и шага по времени, определялись с учетом сравнения результатов расчетов и аналитических оценок распределения температуры рабочей жидкости вдоль оси z для нагрузок с плоскими входными окнами (рис. 2).

Начальная (сразу после воздействия импульса СВЧ излучения) рассчитанная с электродинамическим модулем зависимость температуры рабочей жидкости от координаты z определяется соответствующим распределением поглощенной удельной СВЧ энергии. При этом проблему составляет узкая область вблизи границы раздела сред. После воздействия СВЧ импульса вблизи границы раздела сред формируется скачок температуры с большим градиентом по z . Это приводит к тому, что при изменении размеров сетки и шага по времени максимум $P_T(0)$ зависимости потока тепла $P_T(t)$ из рабочей жидкости в диэлектрик входного окна от времени заметно меняется, и меняется вид самой зависимости $P_T(t)$ вблизи $t = 0$. При уменьшении размеров ячеек и шага по времени то и другое стабилизируется и начинает соответствовать результатам аналитических в случае плоского окна. Пришлось использовать (и в случае ребристых окон тоже) размеры ячеек и шаг по времени, которые по факту определялись возможностями видеокарты компьютера. Для дополнительных корректировок оценок погрешностей расчетов ухода тепла вблизи $t = 0$ были введены экстраполяции вида $P_T(t) \sim 1/\sqrt{t}$, аналогичные (1) в аналитических оценках.

В расчетах температура рабочей жидкости до воздействия СВЧ импульса задавалась равной 23°C.

На рис. 6 представлены распределения температуры рабочей жидкости вдоль z , полученные из аналитических расчетов и моделирования.

Из графиков видно, что результаты моделирования с использованием электродинамического модуля хорошо соответствуют результатам аналитических расчетов. Они показывают (в соответствии с изложенным выше в разд. 1) экспоненциальный спад приращения темпе-

ратуры с удалением от границы раздела между рабочей жидкостью и диэлектриком плоского входного окна. При этом заметно различие этих результатов и результатов моделирования в модуле Thermal. Можно предположить, что это различие связано с особенностями преобразования данных распределения удельной поглощаемой мощности СВЧ излучения электродинамического модуля в данные распределения удельной мощности выделения тепла модуля Thermal. Это, в свою очередь, может быть обусловлено, например, различием в особенностях разбиения расчетной области в этих модулях. К сожалению, с использованием имеющегося в распоряжении авторов описания программы CST Microwave Studio не удалось выяснить причины указанного различия.

На рис. 7 представлены результаты компьютерных расчетов зависимостей от времени тепловых потоков $P_T(t)$ и относительного ухода тепла в плоские входные окна поглощающих нагрузок.

Как отмечалось выше, сразу после поглощения энергии СВЧ импульса в жидкости на границе с диэлектриком возникает скачок температуры, дающий в соответствии с (1) теоретически бесконечно большой поток тепла, который в численном расчете в силу конечного шага по пространственной координате не может быть точно определен. Это приводит к некоторому занижению тепла ΔW , ушедшего в диэлектрик. Для оценки этого занижения на начальных малых отрезках времени для всех четырех поглощающих нагрузок выполнялась экстраполяция результатов численных расчетов зависимостями, аналогичными (1), вида $P(t) \sim 1/t^{0.5}$ так, чтобы они плавно сопрягались с кривыми, полученными в результате моделирования, и $\Delta W \sim t^{0.5}$. Данные, представленные на рис. 7, *a, b*, позволили рассчитать относительный уход тепла $\Delta W/W_{tr}$ в плоские окна для различных промежутков времени. Результаты этих расчетов приведены на рис. 7, *c, d*.

Видно, что зависимости $P_T(t)$ имеют участок выраженного спада и заметно отличаются от аналитических

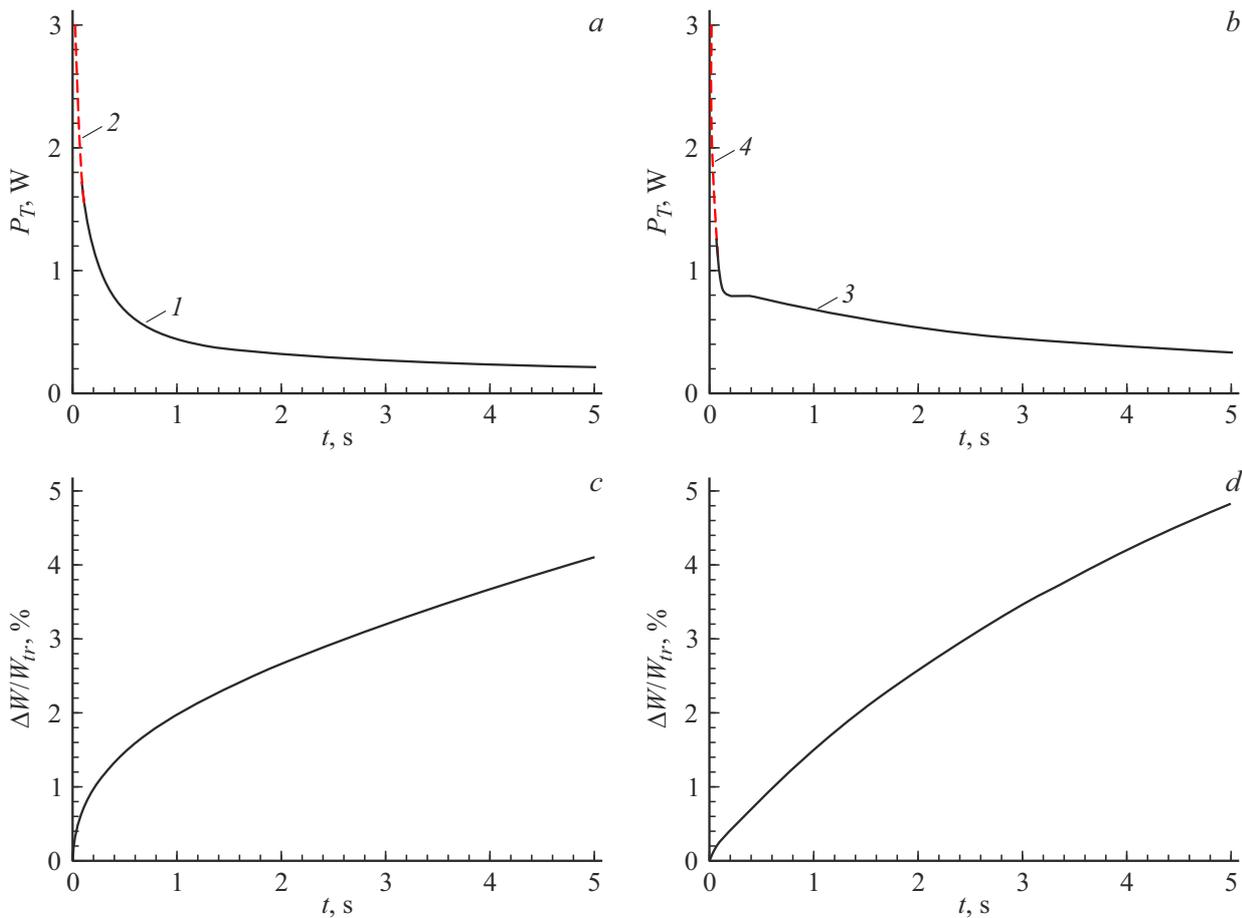


Рис. 7. Зависимости от времени тепловых потоков (*a, b*) и относительного ухода тепла (*c, d*) из рабочей жидкости в плоские входные окна для частоты 3 (*a, c*) и 10 GHz (*b, d*): 1 и 3 — компьютерное моделирование, 2 — экстраполяция по формуле $P_T(t) = 0.5/t^{0.5}$ для $0 \leq 0.1111$ s, 4 — экстраполяция по формуле $P_T(t) = 0.33/t^{0.5}$ для $0 < t \leq 0.0861$ s.

зависимостей, представленных на рис. 4. Это отличие обусловлено различием начальных распределений температур — ступенька в случае рис. 4 и скачок температур с последующим экспоненциальным спадом в случае рис. 7. В последнем случае уменьшение теплового потока в диэлектрик может объясняться более значительным снижением во времени градиента температуры в рабочей жидкости со стороны входного окна.

На рис. 8 показаны распределения температуры и потоки конвекции после воздействия СВЧ импульса для обеих нагрузок.

Видно, что через 1 s наибольшая температура рабочей жидкости наблюдается вблизи ее границы с диэлектриком входного окна. Максимальная конвекционная скорость рабочей жидкости составляет $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ м/с для нагрузки на частоту 3 GHz и $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ м/с — для нагрузки на частоту 10 GHz. За время 5 s соответствующие смещения жидкости могут составлять 2.5 и 20 мм. Конвекция нагретой жидкости, не считая верха и низа, происходит преимущественно вдоль поверхности окон, что не способствует эффективному отводу тепла от поверхностей окон. Можно предположить, что механизм

конвекции не играет существенной роли в процессах изменения пространственного распределения температуры рабочей жидкости со временем в случае нагрузки на 3 GHz и может иметь некоторое значение в случае нагрузки для частоты 10 GHz (несколько усложненная зависимость $P_T(t)$, рис. 7, *b*).

Оценки и компьютерное моделирование (рис. 4 и 7) показывают, что тепловые потери для частоты 10 GHz превышают потери для частоты 3 GHz, что может объясняться более высокой начальной разностью ΔT на границе рабочей жидкости и диэлектрика в случае частоты 10 GHz. Учет экстраполированных зависимостей дает увеличение потерь не более чем на 8% для поглощающей нагрузки на частоту 3 GHz и не более чем 0.2% для нагрузки на частоту 10 GHz.

Относительные уходы тепла в плоские окна, полученные в результате компьютерного моделирования, не превышают 5% и существенно меньше, чем в аналитических оценках. Компьютерное моделирование более полно учитывает процессы теплообмена, и поэтому дает более точные результаты. Оценки для плоских окон на основе модели с остыванием полупространства могут

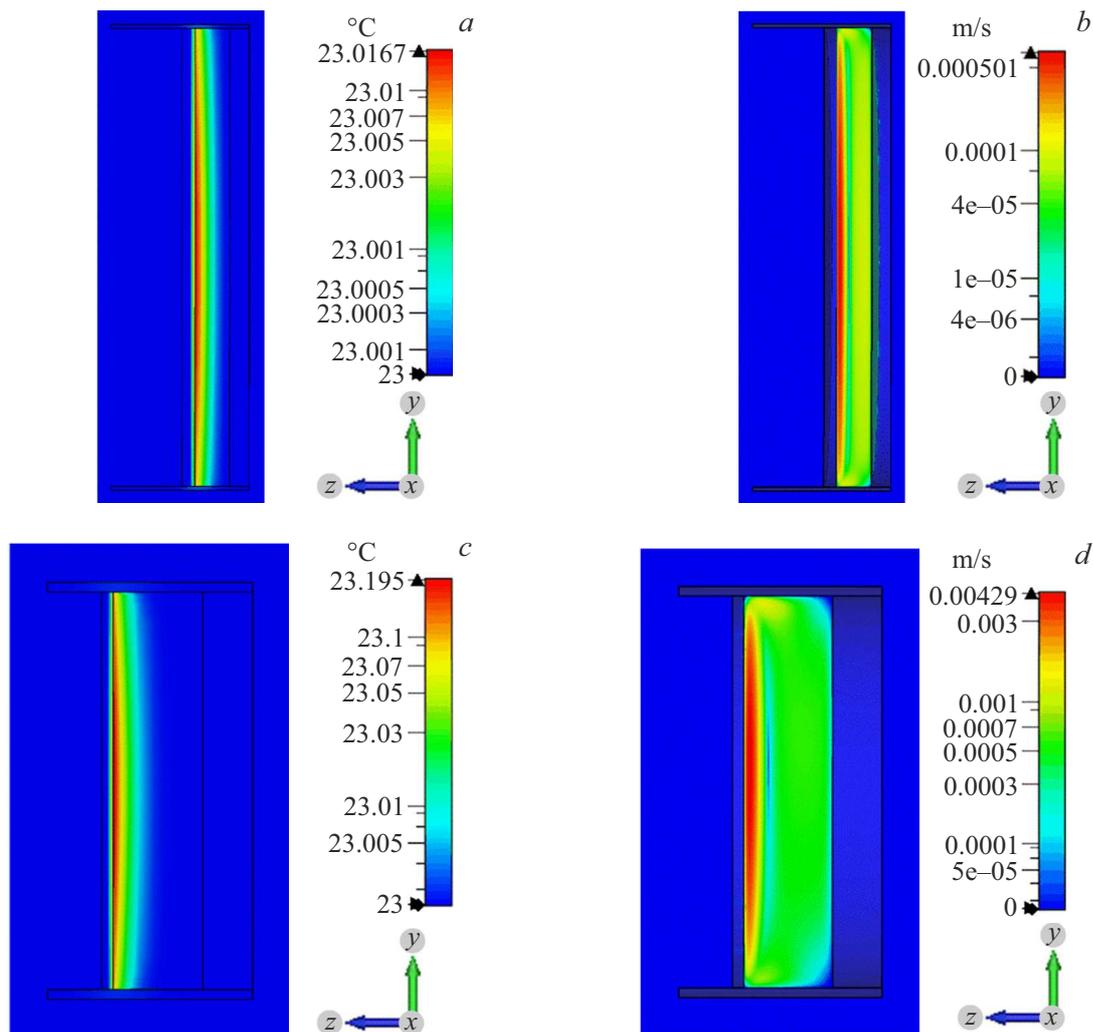


Рис. 8. Распределения температуры (*a, c*) через 1 s и потоки конвекции (*b, d*) через 5 s после воздействия СВЧ импульса для поглощающих нагрузок на 3 (*a, b*) и 10 GHz (*c, d*) с плоскими входными окнами.

иметь ограниченное применение в течение первых секунд сразу после поглощения СВЧ энергии и являются достаточно грубыми, дающими завышенный уход тепла.

3.2. Поглощающие нагрузки с ребристыми входными окнами

В поглощающих нагрузках с ребристыми входными окнами, по сравнению с нагрузками с плоскими окнами, структура электромагнитного поля и распределение плотности поглощенной СВЧ энергии усложнены ребристостью поверхности диэлектрика. Ребристость поверхности окна оказывает влияние и на процесс конвекции рабочей жидкости.

На рис. 9, *a, b* представлены результаты компьютерных расчетов зависимости от времени тепловых потоков $P_T(t)$ в ребристые входные окна поглощающих нагрузок. Для уточнения тепловых потоков на малых начальных отрезках времени так же, как и в случае плоских окон,

использованы экстраполяции $P(t) \sim 1/t^{0.5}$ и $\Delta W \sim t^{0.5}$. Относительные уходы тепла в ребристые входные окна $\Delta W/W$ (рис. 9, *c, d*) рассчитаны на основании данных, представленных на рис. 9, *a, b*. В отличие от случая плоских окон замечен более резкий относительный спад тепловых потоков за время около 1 s. Кроме того, через 1.7 s для нагрузки на 3 GHz и через 0.5 s для нагрузки на 10 GHz начинаются продолжительные (не менее 15 s) слабые возвратные потоки тепла от нагретых диэлектрических поверхностей в рабочую жидкость, в возникновении которых может играть роль конвекция, хотя и имеющая, согласно результатам расчетов, малые скорости, но тем не менее способная в отличие от случая плоских окон отводить тепло от поверхности ребер.

С учетом экстраполяций относительный уход тепла для нагрузки на 3 GHz достигает 11.5%, а для нагрузки на 10 GHz — 13%. Эти величины более, чем в 2 раза превышают относительный уход тепла в случае плоских

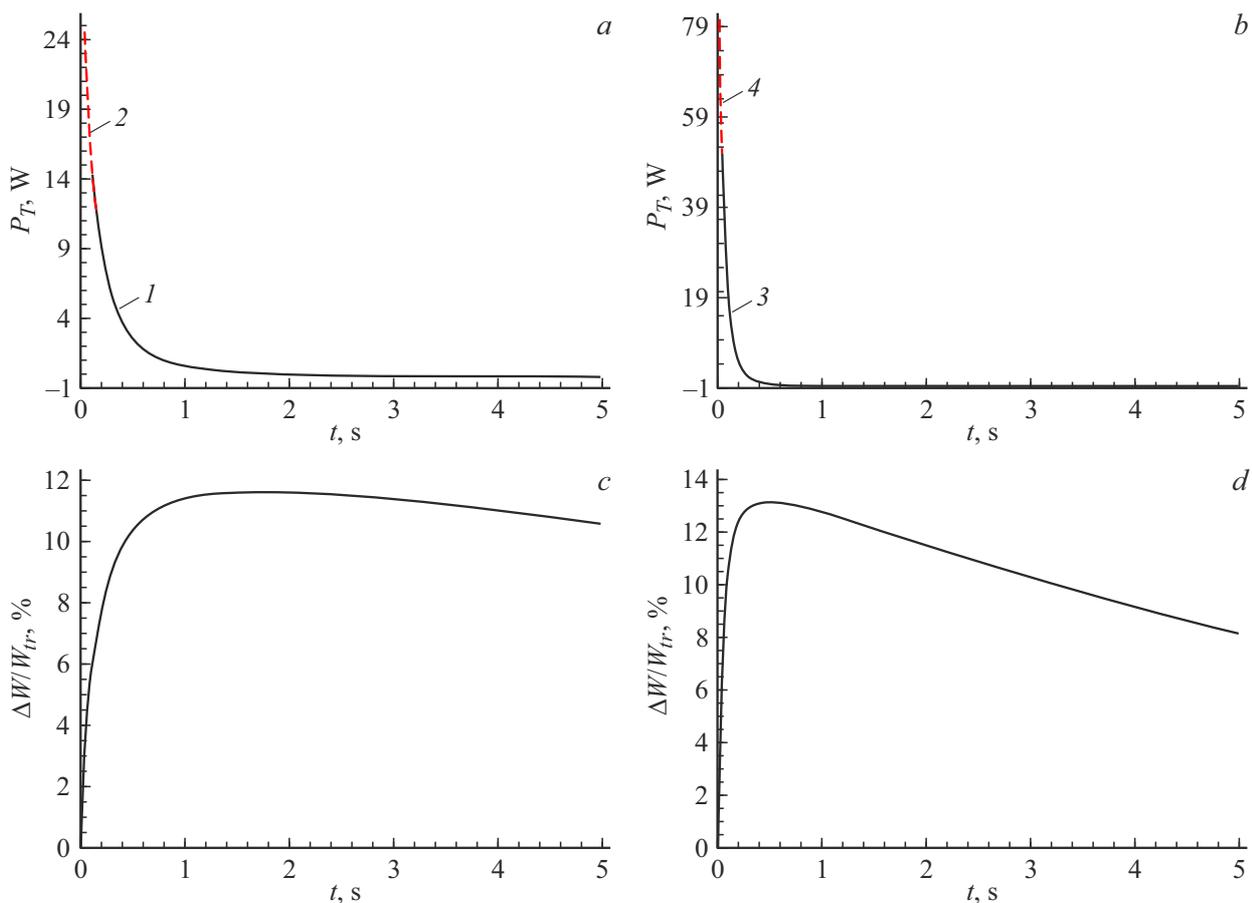


Рис. 9. Зависимости от времени тепловых потоков (*a, b*) и относительного ухода тепла (*c, d*) из рабочей жидкости в ребристые входные окна для частоты 3 (*a, c*) и 10 GHz (*b, d*): 1 и 3 — компьютерное моделирование, 2 — экстраполяция по формуле $P_T(t) = 4.5/t^{0.5}$ для $0 < t < 0.1278$ s, 4 — экстраполяция по формуле $P_T(t) = 10.38/t^{0.5}$ для $0 < t \leq 0.04$ s.

окон. Подобное отличие, по-видимому, может быть обусловлено тем, что поверхность контакта рабочей жидкости и диэлектрика в случае ребристых окон больше, чем в случае плоских окон. Кроме того, необходимо принимать во внимание нижеописанные особенности более сложного по сравнению со случаем плоских входных окон распределения температуры рабочей жидкости вблизи поверхностей ребристых входных окон.

Учет экстраполированных зависимостей дает прибавку относительного ухода тепла для обеих нагрузок около 22% по сравнению с чисто компьютерным моделированием.

К сожалению, так же, как и в случае плоских окон, можно предполагать, что, в силу вышеуказанных особенностей работы модуля Thermal, рассчитанные значения ухода тепла в диэлектрик входного окна представляют собой несколько заниженные величины по сравнению с действительными.

На рис. 10 показаны распределение температуры и потоки конвекции после воздействия СВЧ импульса для обеих поглощающих нагрузок с ребристыми входными окнами.

Видно, что выделение СВЧ энергии происходит вблизи диэлектрической поверхности ребер. Максимальная конвекционная скорость рабочей жидкости меньше, чем в случае плоских окон, и составляет $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ м/с для нагрузки на частоту 3 GHz и $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ м/с — для нагрузки на частоту 10 GHz. За время 5 s соответствующие смещения жидкости могут составлять всего 1 и 3.5 мм. Поэтому можно предполагать слабое влияние конвекции рабочей жидкости в случае ребристых окон на процессы теплообмена.

В табл. 3 приведены приращения ΔT температуры рабочей жидкости в нагрузках с ребристыми входными окнами в некоторых точках рабочей жидкости сразу после воздействия СВЧ импульса. Наибольшее приращение температуры рабочей жидкости, как следует из данных табл. 3, имеет место в пазах ребер, что, по-видимому, обусловлено более высокой напряженностью электрического поля в результате интерференции. Такие локально повышенные приросты ΔT температуры рабочей жидкости вблизи поверхностей ребристых входных окон могут давать более высокий по сравнению с плоскими окнами относительный уход тепла в диэлектрик.

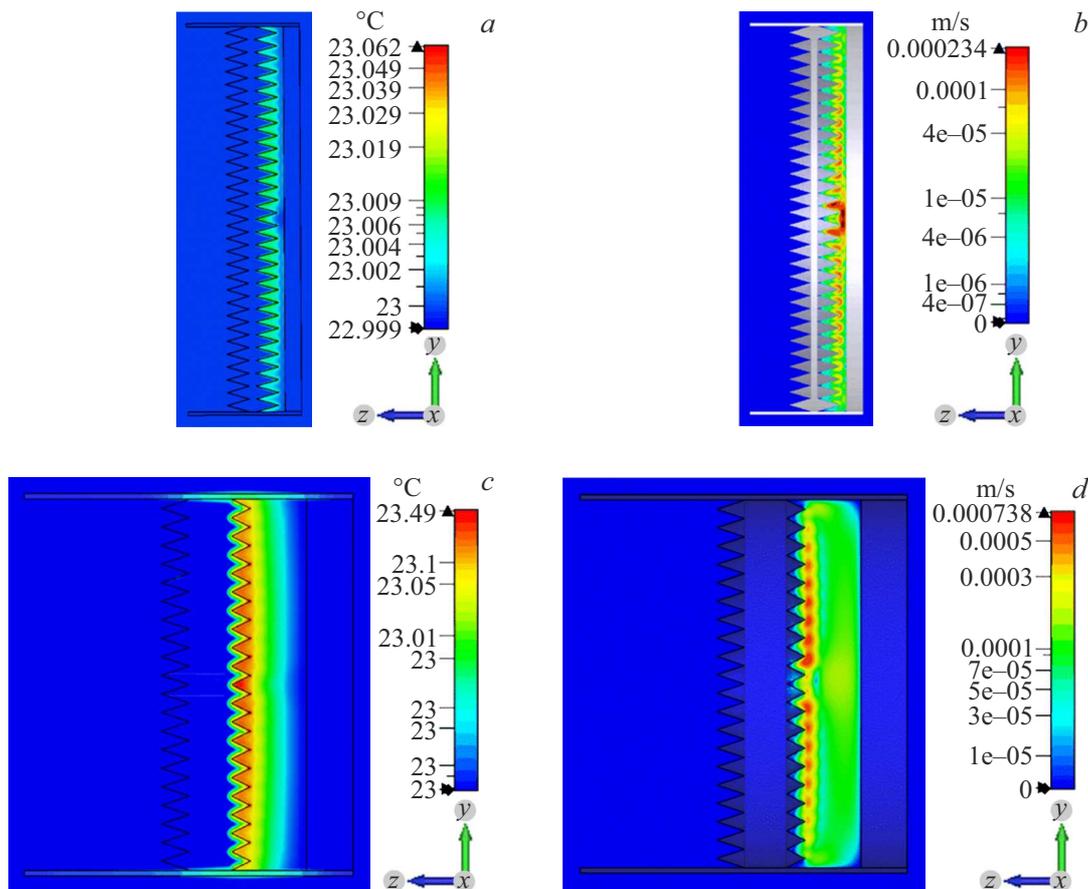


Рис. 10. Распределение температуры через 1 s (*a, c*) и потоки конвекции (*b, d*) через 5 s после воздействия СВЧ импульса для поглощающих нагрузок на 3 (*a, b*) и 10 GHz (*c, d*) с ребристыми входными окнами.

Таблица 3. Приращения температуры в различных точках поглощающих нагрузок, представленных на рис. 5

	Рис. 5, <i>a</i> , 3 GHz			Рис. 5, <i>b</i> , 10 GHz			
	I	II	III	I	II	III	IV
N_0	1	2	3	1	2	3	4
r , mm	0	10	30	0	0	5	20
z , mm	13	41	41	13.5	15	23	15
ΔT , K	0.0102	0.00104	0.00478	1.84	0.374	0.0553	0.178

Заключение

Выполненные исследования показали, что распределения удельной поглощенной СВЧ энергии и прироста температур рабочей жидкости, полученные в аналитических оценках и электродинамических расчетах пакета CST Microwave Studio для плоских входных окон, удовлетворительно совпадают. Рассчитанные приращения температур с максимумом на границе раздела между рабочей жидкостью и диэлектриком входного окна, связанные с плотностью потока СВЧ мощности, имеют практическое значение для определения предельной СВЧ энергии, которая может быть подана на поглощающую нагрузку калориметра. Превышение температуры рабочей жидкости критического значения может

приводить к возникновению пузырей и существенному ухудшению работоспособности калориметра вплоть до полной ее потери. В случае ребристых входных окон аналогичное значение имеет результат, связанный с данными о местах с наибольшим приростом температуры и его величине.

На характер теплообмена между рабочей жидкостью и диэлектриком входного окна, наряду с начальным распределением поглощенной энергии и теплопроводностью, может оказывать влияние конвекция.

Характерные времена процессов теплообмена лежат в пределах нескольких секунд, что соответствует типичному времени механической реакции поглощающей нагрузки и времени срабатывания измерительной системы калориметра.

Относительный уход тепла в диэлектрический материал ребристых окон широкоапертурных дискообразных поглощающих нагрузок калориметров с рабочей жидкостью на основе этилового спирта, характеризующий систематическое занижение измеряемой энергии мощного СВЧ импульса, может быть сопоставим с типичной погрешностью калориметра $\pm(10-20)\%$, обусловленной в основном влиянием окружающей среды.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0002).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.И. Климов. Изв. вузов. Физика, **62** (7), 153 (2019). DOI: 10.17223/00213411/62/7/153 [A.I. Klimov. Rus. Phys. J., **62** (7), 1260 (2019). DOI: 10.1007/s11182-019-01843-4]
- [2] A.I. Klimov, V.Yu. Konev. *Proc. 8th Int. Cong. Energy Fluxes Rad. Effects* (Tomsk, Russia, 2022), p. 275. DOI: 10.56761/EFRE2022.S3-P-016807
- [3] А.Г. Шкварунец. ПТЭ, **4**, 72 (1996). [A.G. Shkvarunets. Instr. Exp. Tech., **39** (4), 535 (1996).]
- [4] Д.В. Сивухин. *Курс общей физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика* (Физматлит, М., 2005)
- [5] *Engineering ToolBox. The density of ethyl alcohol vs temperature* [online]; https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2028.html
- [6] *Engineering ToolBox. Heat capacity of ethyl alcohol as a function of temperature* [online]; https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-ethanol-Cp-Cv-isobaric-isochoric-ethyl-alcohol-d_2030.html
- [7] *Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru. Этиловый спирт, этанол — свойства.* [online]; <https://dpva.ru/Guide/GuideMedias/Spirits/EtanolPrperties1999/>
- [8] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред* (Физматлит, М., 2005)
- [9] J.-Z. Bao, M.L. Swicord, C.C. Davis. *J. Chem. Phys.*, **104** (12), 4441 (1996). DOI: 10.1063/1.471197
- [10] И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ* (Высш. школа, М., 1970), т. 1.
- [11] А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. *Справочник по элементам волноводной техники* (Сов. радио, М., 1967)