В.М. Лелевкин

МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Бишкек 2021

МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Бишкек 2021

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

В.М. Лелевкин

МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Бишкек 2021

STATE EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
KYRGYZ-RUSSIAN SLAVIC UNIVERSITY
named after the first President of the Russian Federation B.N. Yeltsin

V.M. Lelevkin

MICROWAVE WATER HEATING

Bishkek 2021

УДК 53.072
ББК 32.86-01
Л 43

Рецензенты:

А.Ж. Жайнаков, д-р физ.-мат. профессор,
академик НАН Кыргызской Республики,
Г.С. Денисов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Рекомендовано к изданию Научно-техническим советом КРСУ

Лелевкин В.М.

Л 43 МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ: монография. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2021. – 211 с. DOI: 10.36979/978-9967-19-768-8-2021

ISBN 978-9967-19-768-8

В монографии рассматриваются некоторые уникальные свойства воды. Большое внимание уделяется исследованию фундаментального направления современной физики: взаимодействию электромагнитного излучения с жидкими средами. Моделирование микроволнового нагрева воды в стеклянной емкости в виде плоского слоя, цилиндра или сферы проводится на основе решения уравнений магнитной гидродинамики с учетом нелинейного изменения электромагнитных и теплофизических свойств воды при взаимодействии с электромагнитным излучением. Получены некоторые закономерности изменения характеристик воды в зависимости от частоты и мощности электромагнитного поля, геометрии и размеров стеклянной емкости с водой.

Для широкого круга научных работников, инженеров и технологов, занимающихся проблемами взаимодействия электромагнитных излучений с веществом. Книга может быть полезна в качестве учебного пособия преподавателям, аспирантам и студентам вузов, специализирующимся в данном направлении.

УДК 53.072
ББК 32.86-01

ISBN 978-9967-19-768-8

© ГОУВПО КРСУ, 2021
© Лелевкин В.М., 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	7
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	10
ВВЕДЕНИЕ	11
Глава 1. ВОДА, СВОЙСТВА ВОДЫ, МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ.....	14
1.1. Основные свойства воды	14
1.2. Строение воды	20
1.3. Химические свойства воды	23
1.4. Физические свойства воды	25
1.5. Коэффициенты воды	28
1.6. Микроволновой нагрев воды.....	32
1.7. Уравнения магнитной гидродинамики	36
1.8. Движение ионов воды в периодическом электрическом поле	40
1.9. Уравнение теплопроводности и уравнения газовой динамики.....	43
Глава 2. ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВОДЫ.....	46
2.1. Моделирование микроволнового нагрева воды.....	46
2.2. Взаимодействие излучения с изотермическим слоем воды	48
2.3. Нагрев плоского слоя воды при симметричном подводе мощности электромагнитного излучения.....	61
2.4. Анализ микроволнового нагрева плоского слоя воды	66
2.5. Теплоизоляция стенок микроволновой печи и емкости с водой.....	83
2.6. Влияние толщины и материала стенок керамической емкости	87
2.7. Модель однородных коэффициентов.....	92
2.8. Нагрев воды в поле «слабого» микроволнового излучения	94
2.9. Модель интенсивного нагрева плоского слоя воды	98
2.10. Односторонний подвод мощности микроволнового излучения.....	101
2.11. Нагрев воды в стеклянной цилиндрической емкости	108
2.12. Нагрев воды в сферической емкости	118
2.13. Влияние пузырьков газа на характеристики нагрева воды	127
2.14. Линейное изменение подводимой мощности электромагнитного излучения.....	128
Глава 3. ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВОДЫ	132
3.1. Нагрев воды в круглом волноводе	132
3.2. Микроволновой нагрев воды с учетом динамики течения.....	143
3.3. Нагрев воды в прямоугольном волноводе	150
ВЫВОДЫ.....	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	171

ПРИЛОЖЕНИЕ	176
1. Метод численного решения дифференциальных уравнений	176
2. Обобщенное решение волнового уравнения	179
3. Нагрев керамической пластины в микроволновой печи.....	190
ЛИТЕРАТУРА.....	197
REVIEWERS	201
CONTENTS.....	202
OPINION	204
LITERATURE (TRANSLITERATION).....	208

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время нагрев чашки чая, кофе или других продуктов в микроволновой печи стало обычным явлением в нашей жизни наряду, например, с телевидением или со-товой связью. Все происходит быстро, удобно и главное – экологически чисто. Микро-волновой, или, как его называют в российской научной литературе, сверхвысоко-частот-ный (СВЧ) нагрев, находит широкое применение в технологиях получения керамических материалов, таких как нитрид или карбид кремния, в медицине при абляции опухолей, в промышленном производстве при сушке пористых материалов, стерилизации пищевых продуктов и т. д. [1–12].

Несмотря на большое практическое применение число работ, посвященных изуче-нию физических явлений, происходящих при микроволновом нагреве жидкостей, даже обыкновенной воды, относительно невелико. Это связано с нелинейными процессами, возникающими при взаимодействии электромагнитного излучения с жидкими средами, сложной техникой эксперимента и трудностями математического моделирования.

Цель данной работы:

- обратить внимание на уникальные свойства обыкновенной воды и её структуру, рассмотреть физику взаимодействия электромагнитного излучения с жидкими средами и термический нагрев воды микроволновым излучением;
- провести на основе уравнений магнитной гидродинамики (МГД) математическое моделирование микроволнового нагрева воды в стеклянной емкости в виде плоского слоя, цилиндра и сферы;
- разработать аналитические и численные методы решения МГД уравнений с учетом нелинейного изменения электромагнитных и теплофизических свойств воды;
- установить закономерности изменения теплофизических и электромагнитных ха-рактеристик при термическом нагреве воды в зависимости от частоты и мощности электро-магнитного излучения, размеров и геометрии стеклянной емкости с водой и свойств воды.

Основу монографии составляют теоретические исследования по взаимодействию электромагнитного излучения с твердыми, жидкими, газообразными и плазменными со-стояниями вещества, проводимые на кафедре «Физики и микроэлектроники» Кыргы-зско-Российского Славянского университета [13–26].

Интерес к изучению микроволнового нагрева воды возник на семинаре в Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук в результате обсуждения эффекта «самопросветления воды», обнаруженного в экспериментах [8] при исследова-нии распространения электромагнитного излучения в воде. Для подтверждения данного эффекта, на основе уравнений магнитной гидродинамики были разработаны математиче-ские модели, позволяющие описать физику распространения в воде электромагнитного излучения и микроволновой нагрев воды. В результате численных расчетов установлено, что с повышением температуры наблюдается усиление прохождения электромагнитного излучения через слой воды, что подтверждает эффект «самопросветления» воды.

Теоретические исследования по нагреву воды электромагнитным излучением показали, что число работ, посвященных данному направлению в научной литературе не так много. Поэтому в монографию включены основные результаты теоретических исследований, проводимых при расчетах микроволнового нагрева воды [13–18], а также материалы лекций, читаемых для студентов университета. Были расширены разделы, связанные с уникальными свойствами воды и дополнены результатами анализа полученных результатов по взаимодействию и нелинейным изменениям характеристик воды и электромагнитного излучения.

Монография состоит из четырех глав, приложения и списка литературы.

В *первой главе* рассмотрены общие и в большинстве случаев известные вопросы, характеризующие некоторые свойства воды, физику взаимодействия электромагнитного излучения с жидкими средами, примеры использования уравнений магнитной гидродинамики для описания микроволнового нагрева воды, ее теплофизические, переносные и электромагнитные свойства.

Во *второй главе* представлены результаты расчета одномерных аналитических и численных моделей для исследования распространения и взаимодействия микроволнового излучения с водой, заключенной в стеклянную или керамическую ёмкость в форме плоского слоя, цилиндра или сферы, установлены некоторые закономерности микроволнового нагрева воды в зависимости от геометрии и размеров стеклянной ёмкости, частоты и мощности подводимого электромагнитного излучения.

В *третьей главе* приведены численные расчеты двух- и трехмерных уравнений магнитной гидродинамики с учетом электромагнитного взаимодействия излучения с водой в круглых и прямоугольных волноводах на волне типа E_{10} и H_{10} , сделана оценка влияния гидродинамических характеристик течения на нагреве воды микроволновым излучением.

В *приложении* представлена методика решения уравнения баланса энергии и волнового уравнения для плоского слоя воды, приведено обобщенное решение уравнений электродинамики для оценки взаимодействия электромагнитного излучения с твердыми, жидким и плазменными состояниями вещества в виде плоского слоя, цилиндра, сферы и расчет нагрева плоской керамической пластины микроволновым излучением.

Монография рассчитана на научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в области взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Предлагаемые математические модели, методика решения и анализ полученных результатов носят в ряде случаев подробный, а иногда и качественный характер. Некоторые предложения, выводы и интерпретация результатов, возможно, не являются общепринятыми, а выражают точку зрения автора и подлежат дополнительному обсуждению.

Большая часть информации по уникальным свойствам воды, уравнениям магнитной гидродинамики, коэффициентам электромагнитных, переносных и теплофизических характеристик воды, стекла, керамики и воздуха была заимствована из известных литературных источников: справочников, монографий, Википедии, интернета и ряда других работ [25–30].

Каждый раздел монографии предваряется фотографиями красивой природы Кыргызстана, в которых всегда присутствует вода, как уникальное вещество в нашем Мире. На обложке монографии приведены: озеро Иссык-Куль, иллюстрация кластеров в воде, структура молекулы воды, а также изменение коэффициента поглощения микроволнового

излучения в зависимости от толщины плоского слоя воды и частоты электромагнитного излучения.

Автор выражает большую благодарность **Н.Ж. Кайрыеву, И.А. Коссому, Э.Б. Кулумбаеву** за участие в проведении численных исследований и обсуждении полученных результатов.

Все замечания и предложения по содержанию, интерпретации и анализу результатов работ, представленных в монографии, направлять по адресу:

720000, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Киевская, 44, КРСУ;

e-mail: lelevkin44@mail.ru,

факс: +(996.312) 431169, т. +(996.312) 431175.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

t – время

T – температура

p – давление

$\vec{V}$ – скорость

$Q_I = Q_n, Q_r, Q_T, Q_d$ – мощность электромагнитного поля: подводимая, отраженная, прошедшая, диссипируемая (поглощаемая)

ρ – плотность

λ – теплопроводность

η – вязкость

σ – электропроводность

C_p – теплоемкость

α – температуропроводность

K_r, K_p, K_d – коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения

ϵ, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь

$\vec{A}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B}$ – напряженность и индукция электрического и магнитного поля

ω, f – круговая и циклическая электромагнитная частота

ϵ_0, μ_0 – абсолютные электрическая и магнитная постоянные

$\epsilon_k, \epsilon_r, \epsilon_i$ – комплексная, действительная и мнимая диэлектрическая проницаемость

x, y, z – прямоугольные координаты

r, φ, z – цилиндрические координаты

r, φ, q – сферические координаты

i – мнимая единица

$\tilde{N}$ – дифференциальный оператор (набла)

МГД – магнитная гидродинамика

СВЧ – сверхвысокочастотное (микроволновое) излучение

Индексы:

O, R – на оси, и стенках камеры микроволновой печи

c, r – стеклянная емкость и газовая среда

r, i – действительная и мнимая составляющая комплексного числа

$*$ – комплексно-сопряженная величина

Водопад Белая горка, Кыргызстан.
Переход воды из жидкого состояния в газообразное (водяной пар)

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие электромагнитного излучения с твердыми, жидкими, газообразными и плазменными состояниями вещества – это довольно сложная проблема современной физики. Начало этим исследованиям было положено более 100 лет назад в работах [31, 32], хотя интенсивное изучение данных явлений, началось, скорее всего, с открытием радио, использованием электрических разрядов, плазмы, а также быстрым развитием физики распространения радиоволн в атмосфере Земли [33–39]. Было установлено, что с помощью электромагнитного излучения можно передавать информацию на большие расстояния, получать и нагревать плазму, формировать и поддерживать горение электрических разрядов, воздействовать на твердые, жидкие и газообразные состояния вещества, изменять их свойства и состояние [33–39].

В связи с широким практическим применением плазмы в различных областях науки и техники, были достигнуты большие успехи в понимании механизма взаимодействия высокочастотных, сверхвысокочастотных (СВЧ) и оптических разрядов с электромагнитным излучением [33–39].

Большой научный интерес вызывают исследования воздействия электромагнитных излучений на биологические объекты, злокачественные опухоли, клетки головного мозга [30, 11–12].

Разрабатываются технологии получения керамических материалов, очистки сточных вод, сушки пористых материалов, стерилизации пищевых продуктов [1–23]. Но,

несмотря на широкое практическое применение, число работ, посвященных изучению физики взаимодействия электромагнитного излучения, например, с керамикой и даже с обыкновенной водой, относительно невелико [1–28].

Термический нагрев жидкости электромагнитным излучением – это сложное и малоизученное физическое явление, связанное с нелинейными процессами, происходящими при взаимодействии излучения с веществом. Поскольку сама жидкость обладает различными нелинейными физико-химическими свойствами, имеет различную электрическую проводимость и диэлектрическую проницаемость, то она может быть хорошим проводником, например, ртуть или жидкие расплавленные металлы типа золота, серебра, меди, алюминия, а может быть полупроводником или диэлектриком, в зависимости от полярных (дистиллированная вода) или не полярных (масла) свойств.

В данной работе проводится исследование физики взаимодействия микроволнового излучения с жидкими средами. Из большого набора жидких сред основной упор сделан на изучении микроволнового нагрева дистиллированной воды, поскольку вода широко применяется в науке, технике, промышленности, медицине и быту. Дистиллированная вода или сокращенно дистиллят – это вода без вкуса, цвета, запаха, очищенная от органических и неорганических примесей, состоит из молекул H_2O и не содержит других химических элементов. Кроме того, хорошо известны ее теплофизические, переносные и электромагнитные свойства. Это существенно упрощает теоретическую задачу по математическому моделированию взаимодействия воды с электромагнитным излучением, так как отпадает необходимость определять состав воды, коэффициенты переноса и электромагнитные характеристики с учетом содержания в них солей и других примесей с их сложными и не всегда известными свойствами. Поэтому взаимодействие дистиллированной воды с электромагнитным излучением является хорошим приближением к описанию физики микроволнового нагрева обыкновенной воды, текущей, например, из водопроводного крана.

В настоящее время, в нашей повседневной жизни широко применяется нагрев воды в микроволновой печи, и мы даже не задумываемся о физических процессах, происходящих при взаимодействии электромагнитного излучения с водой. Поэтому на лекциях студенты часто задают вопрос: *как происходит нагрев стакана воды в микроволновке?* Традиционный ответ преподавателя: *в микроволновой печи происходит взаимодействие электромагнитного излучения с водой, в результате которого энергия микроволнового излучения идет на нагрев жидкости и материала стакана.*

Как правило, такой ответ вызывает у студентов множество вопросов:

- *как взаимодействуют вода с электромагнитным излучением?*
- *в микроволновке стеклянный стакан нагревает воду, или наоборот – вода нагревает стакан?*
- *какая часть микроволнового излучения отражается или поглощается водой?*
- *меняются ли свойства воды при воздействии электромагнитного излучения?*
- *опасно ли для человека излучение микроволновой печи?*

Теперь уже преподавателю приходится задумываться над тем, как ответить на эти любопытные вопросы. Возникшая дискуссия обычно начинается с элементарных понятий: *а что такое вода или микроволновое излучение и как взаимодействует излучение с водой?* На вопрос: *что такое вода*, как правило, студенты отвечают:

- вода – это бесцветная и без запаха жидкость, которую мы ежедневно пьем, с помощью которой умываемся, готовим пищу;

- вода – это обычное вещество, которое течет в ручьях, каналах, реках, содержится в озерах, морях и океанах;
- вода – это известное химическое соединение H_2O , которое состоит из атома кислорода и двух атомов водорода.

Если первые ответы очевидны, то для обсуждения последнего ответа преподаватель приводит несколько цитат из книги «Самое необыкновенное вещество в мире» академика И.В. Петрянова [28]. «В чистом виде такой воды, как H_2O , в природе нет, но её можно получить с большим трудом в специальных лабораториях. Вода в каждой точке Земли различна и зависит от состава почвы, наличия аэрозоля в воздухе и дождевых осадках, содержит соли и соединения многих химических элементов, например, в морской воде присутствуют практически все химические элементы периодической системы Д.И. Менделеева. Вода, которую мы ежедневно пьем, бывает легкой и тяжелой, кислой и сладкой, содержит соли и различные коллоидные осадки, соединения хлора, озона, железа».

Вода обыкновенная оказывается всегда необыкновенной.

Поэтому в данной монографии рассматриваются некоторые уникальные свойства воды, физические явления, возникающие при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, предлагаются теоретические модели микроволнового нагрева воды на основе уравнений магнитной гидродинамики с учетом нелинейного изменения теплофизических, переносных и электромагнитных свойств воды и электромагнитного излучения. Приводятся результаты изменения характеристик воды в зависимости от геометрии емкости, в которой она находится, подводимой мощности и частоты электромагнитного излучения.

Озеро Кёль-Когур, Кыргызстан.

Вода в трех состояниях: твердое (ледники), жидкое (озеро),
газообразное (водяной пар, находящийся в прозрачном воздухе)

Глава 1

ВОДА, СВОЙСТВА ВОДЫ, МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Рассматриваются некоторые свойства, состояние и структура воды, физика взаимодействия электромагнитного излучения с жидкими средами, уравнения магнитной гидродинамики, теплофизические, переносные и электромагнитные характеристики воды, воздуха, стеклянной и керамической емкости.

1.1. Основные свойства воды

Вода – это самое известное и привычное для нас вещество на Земле, но в то же время самое сложное и необыкновенное [28]. Имеется большое количество научных и популярных работ, много информации можно найти в интернете и Википедии о свойствах, структуре, агрегатных состояниях и уникальных особенностях воды.

Прежде чем приступить к изучению характеристик воды и электромагнитного излучения, к решению сложных задач математического моделирования взаимодействия воды

с микроволновым излучением, рассмотрим некоторые свойства вода и начнем с данных по довольно интересной статистике:

1. Сколько всего воды на Земле? На основе геологических, гидрофизических, гидрологических и других исследований, установлено:

1. В мантии Земли на глубине порядка 3000 км находится $1,3910^9\text{ км}^3$ воды. В земной коре содержится $1,510^9\text{ км}^3$ воды в составе горных пород, гидратах и других соединениях;

2. В гидросфере Земли в океанах, морях, озёрах, реках и ручьях находится около $\sim 1,510^9\text{ км}^3$ воды. Большая часть воды $\sim 97,5\%$ в океанах и морях вода солёная, а на материках солёной воды всего $\sim 0,007\%$. Пресная вода $\sim 1,8\%$ содержится в ледниках, в подземных водах $0,63\%$, а в реках и озёрах всего $0,009\%$.

Ежегодно с поверхности земли испаряется $0,5210^6\text{ км}^3$ воды, которая затем выпадает обратно на землю в виде осадков: дождя, снега и града. Причем обратно в океаны и моря возвращается $\sim 0,410^6\text{ км}^3$ количества осадков, на сушу поступает $\sim 10^5\text{ км}^3$, из которых по руслам рек стекают обратно в моря и океаны $3,710^4\text{ км}^3$ воды, а $1/3$ воды испаряется растениями. Человек использует для своих нужд около 150 км^3 воды, на водоснабжение идет $\sim 500\text{ км}^3$.

3. На поверхности земли находится 910^7 км^3 воды: под землей 610^7 км^3 ; в ледниках $2,510^7\text{ км}^3$; в вечной мерзлоте $0,510^6\text{ км}^3$; в озерах и болотах $0,510^6\text{ км}^3$; в атмосфере (облака, влажность, дождь, снег) 1410^3 км^3 .

Каждую секунду под действием солнечных лучей на Земле испаряется $\sim 10^{10}\text{ т}$ воды. Водяной пар поднимается вверх вместе с восходящими потоками воздуха и на высоте порядка ~ 5 километров конденсируется и превращается в капельки воды, которые формируют облака. Каждый грамм водяного пара уносит с поверхности земли в атмосферу 537 калорий или 2265 джоулей электромагнитной энергии, полученной от Солнца. При конденсации водяного пара энергия Солнца порядка $2,210^{10}$ джоулей выделяется и нагревает окружающий воздух. Круговорот воды в природе происходит за счет энергии электромагнитного излучения Солнца.

Таким образом, на Земле почти 75% поверхности занято водой: реки, озера, моря, океаны (жидкое состояние воды), что составляет порядка $1,3910^{18}\text{ т}$. В атмосфере Земли находится $1,310^{13}\text{ т}$ водяного пара (газообразное состояние воды), а снегом и льдом покрыто $\sim 20\%$ суши (твёрдое состояние воды).

Вода – это основа биологической жизни на Земле. Поэтому нужно знать свойства воды и особенности ее взаимодействия с электромагнитным излучением.

2. Какая бывает вода. В процессе знакомства со структурой, составом, теплофизическими параметрами, переносными и электромагнитными свойствами воды выяснилось, что самая обыкновенная вода, которую мы ежедневно пьем, используем для бытовых, промышленных и других нужд – обладает уникальными особенностями [27, 28]. Рассмотрим некоторые обычные, но как оказывается – весьма необычные и удивительные свойства воды.

Вода – уникальное и необычное вещество в нашем Мире. Только вода на Земле может одновременно находиться в трёх агрегатных состояниях: твёрдом (лед), жидком (вода) и газообразном (водяной пар). Ещё одно удивительное свойство воды – вода в твёрдом состоянии становится легче, чем в жидком, и лед плавает на ее поверхности. Вода уплотняется до температуры $T = 4^\circ\text{C}$, становится белее тяжелой и опускается на дно водоемов, а выше четырех градусов плотность воды уменьшается и «теплая вода» всплывает.

Благодаря этому явлению водоемы не промерзает до самого дна и дают возможность существования биологической жизни на Земле.

Обыкновенная вода в природе содержит растворенные соли и соединения различных химических элементов. Если отфильтровать все находящиеся в воде соли и примеси, атомы металлов и других химических элементов, то вода все равно будет представлять собой сложное соединение различных изотопов: H_2O – двух атомов водорода и одного атома кислорода.

Вода бывает мягкой и жесткой, свободной и связанной, легкой и тяжелой, бесцветной и безвкусной, радиоактивной и минеральной. Вода может быть мокрой, так как смачивает поверхности твердых тел и сухой, если не смачивает. Вода становится сыпучей, как песок, когда в ней растворить немного порошка кремниевой кислоты. После добавления полиэтилен-оксида вода становится очень скользкой и течет по трубам в три раза быстрее, чем обычная вода. Это свойство воды можно рекомендовать спортсменам саночникам и конькобежцам для установления новых рекордов в спорте.

Вода горит в атмосфере фтора. При пропускании воды через сильное магнитное поле она становится омагниченной, и при кипении осадки различных примесей и солей выпадают в виде «рыхлого снега», а не оседают на стенках труб как твердая и плотная накипь. Если поместить воду в нанотрубку, то она вытягивается в длинную молекулу, становится сверхтекучей и не замерзает даже при температуре $-269^\circ C$.

Благодаря капиллярному эффекту, характерному для воды, растения всасывают воду через корневые волоски и осуществляют подъём минеральных солей, растворенных в воде, от корней к другим частям растения. Вода практически несжимаема и служит гидростатическим скелетом клеток растений, животных и человека. За счет осмоса вода создает избыточное давление внутри растительных и животных клеток и обеспечивает упругость клеточной стенки и тем самым, например, поддерживает форму листьев.

Вследствие большой теплоёмкости вода обеспечивает постоянство температуры внутри клетки или организма и с помощью конвективных и кондуктивных потоков переносит тепло от областей с высокой температурой в области с низкой. При испарении воды происходит понижение температуры, связанное с затратами энергии на разрыв водородных связей между молекулами воды при переходе из жидкого агрегатного состояния (вода) в газообразное (водяной пар).

Вода сильно поглощает инфракрасное излучение и поэтому водяной пар в атмосфере Земли является одним из основных естественных компонент парниковых газов, который способствует созданию более чем на 60 % парникового эффекта.

Поверхность воды обладает отрицательным электрическим потенциалом, поэтому вода может быть источником электромагнитного излучения, интенсивность и частота которого будут зависеть от состава и скорости течения воды, колебания и распространения волн, метеорологических и других условий.

3. Кластеры. Молекула воды обладает большим электрическим дипольным моментом и прочными связями между атомами водорода и кислорода. В результате исследований установлено, что вода представляет собой не хаотическое движение молекул H_2O , а упорядоченную и динамически меняющуюся структуру, состоящую из водных кластеров и молекул воды. Благодаря своим молекулярным водородным или водородно-кислородным связям, молекулы воды соединяются в различные кластеры. Полностью соответствовать формуле H_2O могут только молекулы воды, находящиеся в газообразном (парообразном)

состоянии. Отметим, следуя литературным источникам, что концентрация молекулы воды H_2O не превышает всего нескольких процентов от общего количества воды, вплоть до температуры кипения.

Водные кластеры образуют собой группу молекул воды, объединенных в единую структуру и сохраняющую свои индивидуальные свойства (рисунок 1.1). Размер кластера воды не превышает 10 нм. Каждый кластер живет короткое время $\sim 10^{-10}$ с и распадается на отдельные молекулы воды, которые затем вновь объединяются в другие кластеры. Кластеры образуют ассоциаты молекул воды различной степени сложности $(H_2O)_x$. Например, при температуре $T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x = 7$ и общая формула кластера воды равна $(H_2O)_7$, а при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x = 4$ формула кластера: $(H_2O)_4$. В обычной воде за счет водородных связей между атомами водорода и кислорода образуется $\sim 60\%$ молекул деструктурированной воды, не имеющей упорядоченной структуры, и $\sim 40\%$ кластеров-ассоциатов, обладающих определенной элементарной структурой (структурированная вода).

4. Структурированная вода – это вода, в которой под воздействием внешних факторов молекулы и атомы воды образуют определенную структуру. Поэтому свойства и качество такой воды зависит уже не только от химического состава и физических свойств воды, но и от самой ее структуры.

Для визуализации изменения свойств воды при воздействии внешних факторов, таких как электромагнитные поля, акустические колебания, в том числе человеческие слова и эмоции, Масару Эмото путем быстрого замораживания воды исследовал структуру кристалликов льда [27]. Классическая музыка, позитивные слова, такие как любовь, дружба или молитва благоприятно воздействовали на воду, а полученные кристаллики льда или снежинки имели красивую и гармоничную форму (рисунок 1.1). Слова, произнесенные с негативным содержанием, или музыкальный тяжелый металлический рок разрушали гармонию кристалликов льда, и она теряла свою естественную привлекательность. В водопроводной (не структурированной) воде кристаллики льда почти никогда не образуются, тогда как в природной воде, всегда получаются кристаллы необыкновенной красоты и формы.

В настоящее время в открытой печати и в интернете стала появляться информация об уникальных свойствах структурированной воды, которая может обладать памятью и восстанавливать свою предыдущую структуру. Во многих странах проводятся различные исследования воды: воду замораживают, нагревают, воздействуют на неё звуковыми колебаниями и электромагнитным излучением с определенной частоты и интенсивностью.

Рисунок 1.1 – Молекула воды, водяные кластеры, кристаллик льда, образовавшийся после воздействия на воду симфонии Моцарта № 40. Фото из фильма «Великая тайна воды» (2006, ФГУП телеканал «Россия»)

Установлено, что вода реагирует на данные возмущения: в ней образуются кластеры (см. рисунок 1.1), вода переходит в особые метастабильные состояния и меняет свои свойства. Уникальные свойства воды определяются ещё и тем, что она представляет собой сложную меняющуюся структуру кластеров и молекул. С.В. Зенин построил геометрическую модель основного стабильного структурного образования из молекул воды и показал изображение её структуры с помощью контрастно-фазового микроскопа [40].

Структурированная вода является источником слабого электромагнитного и акустического излучения, при помощи которых взаимодействует с природными объектами и, возможно, может передавать информацию об изменении характеристик своего состояния. Исследования биохимика Ли Лорензена показали, что вода может воспринимать, накапливать и сохранять сообщаемую ей информацию. Поэтому многие ученые считают, что вода – это естественный природный компьютер, в котором кластеры образуют своеобразные ячейки памяти, а в каждой ячейке памяти воды находятся сотни тысяч информационных панелей.

Тем не менее, поставленные вопросы остаются открытыми: *обладает ли вода памятью, может ли вода восстанавливать свою предыдущую структуру и взаимодействовать с человеком на информационном уровне?* Как показывают эксперименты, некоторые предпосылки к этому есть: вода, например, в течении ~700 дней «помнит» воздействие сильного магнитного поля, а необычные свойства талой воды сохраняются через ~17 часов после размораживания.

5. Пара-орто вода. В результате исследований, проводимых в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, было установлено, что в зависимости от направления спинов атомов водорода молекулы воды могут находиться в двух состояниях. Если в молекуле воды у атомов водорода направления спинов одинаковы, то такая молекула называется *пара-водой*, а если направления спинов противоположные, то это – *орто-вода*.

В любом стакане воды присутствуют оба состояния молекул, причем концентрация изомеров в состояниях орто- и пара-молекул в воде составляет примерно 3:1. Направления спинов у атомов водорода заметно влияют на свойства воды, например, химические реакции с участием молекул пара-воды идут в растворе на 25 % быстрее, чем с орто-водой.

6. Изотопные модификации воды заметно влияют на её свойства. Для рассмотрения изотопного состава молекулы воды предварительно познакомимся с изотопами химических элементов водорода и кислорода, которые образуют молекулу воды. Атомные массы изотопов химических элементов различны, так как содержат одинаковое число протонов и электронов, но разное количество нейтронов.

6.1. Водород. В периодической системе элементов Д.И. Менделеева под номером 1 расположен водород, самый легкий и распространенный элемент во Вселенной. На Земле существуют три изотопных разновидности водорода (рисунок 1.2): *легкий* водород, который в научной литературе называется *протием* – ${}_1H^1$, тяжелый водород (*дейтерий*) – ${}_1H^2 = {}_1D^2$ и сверхтяжелый водород – *третий* ${}_1H^3 = {}_1T^2$. Третий является радиоактивным химическим элементом с периодом полураспада 12,32 года. Отметим также, что на 6700 атомов протия приходится один атом дейтерия.

6.2. Кислород. В природе имеются три изотопных устойчивых разновидности кислорода (*легкий* кислород – ${}_8O^{16}$, *тяжелый* кислород – ${}_8O^{17}$ и *сверхтяжелый* кислород – ${}_8O^{18}$). В воздухе при нормальных стандартных условиях ($T = 0^\circ C = 273,15^\circ K$, $P = 101325$

Рисунок 1.2 – Модели атомов водорода (протий, дейтерий, тритий) и молекулы воды H_2O

$Pa = 1 \text{ атм}$) на 10 атомов тяжелого кислорода ${}^8O^{17}$ приходится 55 атомов сверхтяжелого – ${}^8O^{18}$ и 26000 атомов легкого кислорода – ${}^8O^{16}$.

В верхних слоях атмосферы под действием солнечного и космического излучения, а также в ускорителях элементарных частиц и в атомных реакторах образуются нестабильные изотопы атомов водорода ${}^1H^4$, ${}^1H^5$ и кислорода ${}^8O^{13}$, ${}^8O^{14}$, ${}^8O^{15}$, ${}^8O^{19}$, ${}^8O^{20}$, которые быстро распадаются и практически не влияют на изотопный состав молекулы воды на Земле.

6.3. Молекула воды состоит двух атомов водорода и одного атома кислорода. С учетом изотопного состава атомов водорода и кислорода можно сделать оценку, сколько различных молекул воды H_2O образуется в природе [28]. Нетрудно подсчитать, что возможно образование 48 различных соединений воды, из которых только 18 являются относительно устойчивыми и стабильными: H_2O^{16} , H_2O^{17} , H_2O^{18} ; HDO^{16} , HDO^{17} , HDO^{18} ; D_2O^{16} , D_2O^{17} , D_2O^{18} ; TDO^{16} , TDO^{17} , TDO^{18} ; THO^{16} , THO^{17} , THO^{18} ; T_2O^{16} , T_2O^{17} , T_2O^{18} .

7. Дистиллированная вода – это вода без вкуса, цвета, запаха, очищенная от органических и неорганических примесей, не содержит других химических элементов, а представляет собой смесь разных по изотопному составу молекул воды. В природе нет чисто дистиллированной воды, также как нет легкой (протиевой) воды H_2O^{16} , тяжелой (дейтериевой) воды D_2O^{16} , полутяжелой HDO^{16} (дейтерий-протиевой) или THO^{16} (тритий-протиевой) вод, сверхтяжелых (тритий-дейтериевой) TDO^{16} и (тритиевой) T_2O^{16} вод, кислой воды H_2O^{17} или сверхкислой воды H_2O^{18} . Такие воды в чистом виде можно получить только в лаборатории.

На Земле в любой капле, даже дистиллированной воды, всегда присутствуют разные по изотопному составу молекулы воды. Вода всегда различна, а её состав и свойства зависят от истории образования воды и места её нахождения [28, 29]:

- в озерах вода содержит больше дейтерия, чем вода в горных реках;
- при испарении вода обогащается легким водородом – протием;
- при замерзании в воде уменьшается содержание тяжелого водорода дейтерия и повышается количество тяжелого кислорода.

На одну тонну обычной водопроводной воды, которую мы ежедневно пьем, приходится 150 грамм тяжелой воды D_2O^{16} и 1800 грамм кислой и сверхкислой воды ($H_2O^{17} + H_2O^{18}$).

Тритиевая вода T_2O^{16} выпадает на землю в малом количестве вместе с осадками: один грамм на миллиард килотонн воды. Несмотря на то, что содержание трития на Земле составляет порядка одного килограмма, тем не менее, он присутствует практически в каждой капле воды [28].

1.2. Строение воды

Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, которые соединены между собой ковалентной связью. Поэтому прежде чем рассматривать строение и структуру воды, нужно вначале рассмотреть особенности строения химических элементов водорода и кислорода, которые являются составными элементами воды.

1. Атом водорода. Независимо от изотопного состава, атом водорода содержит в ядре один положительный протон, вокруг которого вращается отрицательно заряженный электрон (рисунок 1.2). Водород, как самый уникальный химический элемент в нашем Мире, обладает подобными свойствами с элементами первой группы в периодической системе Д.И. Менделеева – щелочными металлами (литий, натрий, калий) и в то же время, водород является родственником с элементами из седьмой группы химических элементов – газами галогенами (фтор, хлор, бром). Водород способен относительно легко отдавать свой единственный электрон как щелочные металлы, превращаясь в катион водорода H^+ и может присоединять один недостающий электрон на свой внешний электронный уровень, как газы галогены, образуя анион водорода H^- .

Поскольку число электронов на заполненных электронных оболочках химических элементов благородных инертных составляет 2, 8, 8, 18, 18, 32, то поэтому два атома водорода для полного заполнения первой электронной оболочки, объединяются в одну устойчивую молекулу водорода H_2 .

2. Атом кислорода в отличие от атома водорода, содержит в восемь раз больше протонов и электронов. Электроны в атоме кислорода, благодаря действию электрических сил, ближе и сильнее притягиваются к положительному ядру. Из восьми электронов атома кислорода два электрона заполняют первую внутреннюю оболочку, а шесть электронов располагаются на второй внешней оболочке. Поскольку для полного заполнения внешней электронной оболочки остаются два «вакантных места», то атом кислорода легко присоединяет электроны двух атомов водорода и образует вместе с ними уникальную молекулу воды H_2O (рисунки 1.2, 1.3).

3. Молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода (рисунок 1.2). Высокая стабильность молекулы воды определяется тем, что положительное ядро атома кислорода притягивает электроны двух атомов водорода в две незаполненные электронные вакансии, и образует полную устойчивую восьми электронную внешнюю оболочку.

В молекуле воды положительные ядра (протоны) атомов водорода располагаются по одну сторону от ядра атома кислорода. Отрицательные электрические заряды (электроны или электронное облако) распределяются неоднородно по всему объему молекулы и смещены, благодаря действию электрических сил, большей частью в сторону положительного ядра атома кислорода (рисунок 1.3). Такая структура распределения электрических зарядов и определяет полярность молекулы воды, которая представляет собой диполь, содержащий положительный и отрицательный заряды на полюсах, и обладающий дипольным моментом равным $1,84$ дебая ($1 \text{ дебай} = 3,33 \cdot 10^{-30} \text{ Кл.м}$). Отметим согласно работе [30], что дипольный момент молекулы воды не равен строго $1,84$ дебая, а изменяется относительно среднего значения $\sim 2,5$ дебая.

Положительные ядра атомов водорода отталкиваются друг от друга электрическими силами, но удерживаются благодаря электронным связям (двум электронам) молекулы водорода и электронам, соединяющим ядра атомов водорода и кислорода. Поэтому в молекуле воды положительные ядра атомов водорода находятся друг от друга не на 180° , а совместно с положительным ядром атома кислорода образуют тупоугольный треугольник с углом при вершине $104^\circ 27'$ (см. рисунок 1.3). Эпицентры положительных и отрицательных зарядов формируют объемную геометрическую фигуру в виде правильного тетраэдра.

Поскольку электрические силы, создаваемые отрицательными зарядами электронов и положительными зарядами-ядрами атомов водорода и кислорода, компенсируют друг друга не полностью, то пространственная молекула воды имеет отрицательный заряд вблизи ядра атома кислорода и положительный заряд вблизи атомов водорода (см. рисунок 1.3). Это приводит к тому, что молекула воды взаимодействует с электронами и ядрами атомов кислорода и водорода соседних молекул благодаря электронным и водородным (водородно-кислородным) молекулярным связям. Поскольку противоположные заряды притягиваются, то молекулы воды имеют тенденцию соединяться в кластеры (рисунок 1.4).

Отметим, что в самой молекуле воды между атомами водорода и кислорода устанавливаются электронные связи, которые в 25 раз сильнее, чем связи между соседними молекулами воды. Поэтому при нагревании воды, с увеличением кинетической энергии движения молекул, становится легче отделить одну молекулу воды от другой, чем разрушить саму молекулу воды.

4. Структура воды. Связи в молекуле воды $H-O$ ковалентные, полярные, электронная плотность смещена к ядру атома кислорода. Каждая молекула воды имеет до четырёх электронно-водородных связей: две отрицательные электронные связи образуют электроны вблизи ядра атома кислорода и две положительные водородные связи – два ядра атомов водорода (см. рисунок 1.3). Как уже отмечалось, благодаря электронно-водородным

Рисунок 1.3 – Различные схемы строения молекулы воды (из интернета)

Рисунок 1.4 – Структура молекулы воды (из интернета)

Рисунок 1.5 – Различные схемы структуры молекул воды (из интернета).
Красные шарики – кислород, синие и белые – водород и водородные связи

связям молекулы воды образуют кластеры различной степени сложности типа $(H_2O)_x$, где $(x = 2, 3, 4, \dots)$. Например, две молекулы воды объединяются в самый простейший водяной кластер или его ещё называют – **димер воды** $2(H_2O) = (H_2O)_2$.

Поскольку каждая молекула воды находится в окружении четырех, шести и более ближайших молекул воды, то образуются кластеры в форме четырех или шестигранников. Молекулы воды могут принимать и объемную форму в виде треугольной пирамиды тетраэдра, у которого четыре грани, каждая из которых имеет три ребра, а кислород находится в вершине пирамиды (рисунок 1.4). Кластеры соединяются в воде в более сложные подвижные конфигурации: многогранники, эллипсы, сферы, спиральные цепочки и в своеобразные полимеры [27–30, 40]. Данные конфигурации кластеров объединены электронными и водородными связями в единую пространственную систему или гигантскую молекулу, сохраняющую при этом индивидуальные свойства единичной молекулы воды (рисунок 1.5). Анализируя эти уникальные свойства воды, И. Ленгмюр произнес свой знаменитый афоризм: океан – это одна большая молекула воды.

В настоящее время учеными обсуждается новая точка зрения на структуру воды [28–30, 40], в которой молекулы воды объединяются в группы кластеров, входящих друг в друга по принципу голографичности или матрешки. Причем данные группы кластеров подразделяются на следующие пять форматов:

- 1) 5 молекул воды составляют пирамиду, сохраняющую свою структуру в течении 10–16 секунд;
- 2) 57 молекул воды, как было впервые обнаружено С.В. Зениным [40], представляют собой правильные объемные структуры, в основе которых лежит кристаллоподобный «квант воды», сохраняющий свою форму целые минуты, которые взаимодействуют друг с другом за счет свободных водородных связей и образуют структуры в виде шестигранников;
- 3) 912 молекул воды формируют пять квантов в виде звездочки и 6 квантов в виде снежинки, которые вместе образуют ромбический шестигранник, сохраняющий свою структуру несколько часов. Причем кластеры воды, похожие на кристаллики льда, состоят из шести ромбических граней, не взаимодействуют и легко скользят друг относительно друга, создавая, возможно, основную структуру и текучесть воды;
- 4) 22800 молекул воды при взаимодействии образуют кластеры в форме нескольких ромбических неустойчивых шестигранников;
- 5) 526224 молекул воды образуют большую, сложную и нестабильную структуру.

Правильна ли данная точка зрения и почему образуются определенные структуры воды, кластеры и возникают уникальные свойства воды? Эти вопросы пока остаются открытыми. По-видимому, для ответа на них нужно переходить на совершенно иной – наноразмерный или атомно-молекулярный, а может быть даже на квантовый уровень исследования.

1.3. Химические свойства воды

1. Вода – это бесцветная жидкость без вкуса и запаха. Химическая формула воды H_2O – это *оксид водорода* (окись водорода) или *гидрид кислорода*. Молекула воды H_2O состоит из одного атома кислорода, связанного ковалентной связью с двумя атомами водорода.

Весовой состав «совершенно чистой воды»: кислород – 88,81 %, водород – 11,19 %, молекулярная масса составляет 18,016 атомных единиц массы [28, 29].

2. Химические реакции. Под воздействием высокой температуры или пропускания через воду электрического тока при электролизе, вода разлагается на молекулярный кислород и две молекулы молекулярного водорода:

Вода – это химически активное вещество, способное распадаться на ионы и растворять другие вещества. Данные свойства воды определяются полярностью молекул воды, смещением центров, положительных и отрицательных зарядов, приводящих к высокой диэлектрической проницаемости воды ($\epsilon = 81$). Поэтому в природе вода является сильным растворителем, легко растворяет, например, сахар, соль и может разрушать даже горные породы, выщелачивая из них легко растворимые составные части и примеси. Поддерживать воду в совершенно чистом состоянии чрезвычайно трудно.

Поскольку молекулы любого вещества, находящегося в воде, притягиваются друг к другу в ϵ раз слабее, чем в воздухе, то и сама молекула воды в результате химической реакции диссоциации, распадается на ионы водорода, гидроксидона (отрицательные гидроксильные ионы) и положительную молекулу гидроксония (H_3O^+):

Например, при нормальных условиях ($T = 20^\circ C$, $P = 1 \text{ атм}$) из миллиарда молекул воды образуются две молекулы гидроксония, а уже при ($T = 900^\circ C$, $P = 15 \text{ ГПа}$) вода практически полностью распадается на ионы и в растворе не остается ни одной ее молекулы.

Химическая реакция разложения воды на ион водорода и гидроксид водорода, согласно формуле (*), является довольно упрощенной схемой реальных процессов, протекающих в воде. В водных растворах ион (протон) водорода не может долго существовать изолированно и сразу соединяется с ближайшей к нему молекулой воды, образуется ион гидроксония. Далее, ассоциаты водных молекул распадаются на более тяжелые ионы [28, 29, 40]:

Вода участвует во многих химических реакциях и в качестве реагента, например, при фотосинтезе растений:

При фотолизе воды водород используется для создания мембранного градиента протонов в синтезе АТФ, свободный кислород выделяется в атмосферу, а транспорт продуктов фотосинтеза происходит перемещением по ситовидным трубкам водного раствора сахарозы.

Водные растворы, обработанные сильными магнитными полями, становятся активированными и ведут себя иначе, чем растворы обычной воды. Простая реакция осаждения коллоидных растворов (эффект Дж. Пиккарди) реагирует на ритмы Солнца, солнечную активность, магнитные бури и выбросы протуберанцев [41]. Это указывает на то, что характер протекания химических реакций в воде определяется ритмом Солнца и, следовательно, зависит от времени года, и даже суток.

3. Качество воды. Одним из критериев качества воды является водородный показатель $pH = n$, который при постоянной температуре определяет количество ионов водорода (H^+) равное 10^{-n} моль/литр.

Используется ещё и такой показатель, как жёсткость воды, отражающий количество в воде солей кальция и магния. Чем более жёсткая вода, тем больше образуется накипи в трубах и нагревательных элементах.

Минерализация воды представляет собой суммарный количественный показатель (за рубежом TDS – *total dissolved salts*) содержания растворенных в воде твердых веществ в виде солей.

4. Какая бывает вода. В повседневной жизни для практических целей широко используется вода с разными свойствами и качеством [27–29]. Рассмотрим для интереса некоторые из них:

- **кислая вода.** Если измеряемый водородный показатель в воде $pH < 7$, то вода считается кислой. Кислотность воды определяется содержанием в воде веществ, способных вступать в реакцию со щелочами или гидроксид-ионами (OH^-);
- **щелочная вода.** Если измеряемый водородный показатель в воде $pH \geq 7$, то вода является щелочной. Щёлочность воды показывает содержание в воде веществ, которые могут взаимодействовать с ионами водорода (H^+). Например, морская вода представляет собой щелочной раствор с $pH \sim 8$;
- **дистиллированная вода** – это вода без вкуса, цвета, запаха, очищенная от органических и неорганических примесей, не содержит других химических элементов, имеет средний водородный показатель $pH \sim 7$ и является хорошим изолятором;
- **питьевая вода** представляет собой воду из какого-либо природного источника, реки, озера, очищенную от микроорганизмов и вредных примесей. Пригодность воды для питья оценивается по количеству кишечных палочек, которые не должны превышать 3 на литр воды. При нормальных условиях водородный показатель воды $pH = 7$. В воде всегда присутствуют положительные и отрицательные ионы растворенных солей и других примесей, благодаря чему вода проводит электрический ток, а по значениям электропроводности можно определять чистоту воды;
- **анолит и католит.** В медицине для лечения людей и других профилактических целей применяются растворы воды: анолит – кислая вода с $pH < 6$ и католит – щелочная вода с $pH \geq 8$. Анолит, или как её еще называют *мертвая вода*, представляет собой раствор, полученный в результате электролиза, обладающий большим положительным зарядом, антибактериальными и противовирусными свойствами. Католит или *живая вода*, в отличие от мертвой, обладает отрицательным зарядом

и является природным биостимулятором, восстанавливающим иммунитет и антиоксидантную защиту организма человека;

- **амфолиты** (амфотерные электролиты) – это вода, сохраняющая одновременно свойства кислот и щелочей: катион водорода (H^+) и анион гидроксида водорода (OH^-). В воде, при отсутствии посторонних веществ, одинакова концентрация гидроксид-ионов и ионов водорода (гидроксония);
- **талая вода** образуется в результате таяния льда, имеет оптимальные значения минерализации, жесткости и показателя $pH = 7,3$ (вода слабощелочная). Это объясняется тем, что при фазовом переходе лёд-вода разрушается гексагональная кристаллическая решётка льда (см. рисунок 1.4), а структура неравновесного состояния воды меняется постепенно. Через некоторое время возрастает концентрация ионов (H^+ , OH^-) и талая вода принимает свое обычное равновесное состояние. По данным литературных источников, время перехода талой воды в обычное состояние составляет порядка 17 часов, так как при $T = 20^\circ C$ скорость реакции диссоциации воды на ионы (*) составляет $\sim 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [29].

Предполагается, что талая вода обладает целебными свойствами «живой воды», поскольку в процессе замораживания восстанавливается и сохраняется «правильная гексагональная структура» воды. Такими же свойствами обладает вода из горных источников, которая образуется у кромки таяния снега и льда. Если структура обычной бутилированной воды или воды из-под водопроводного крана представляют собой крупномолекулярные связи, то размеры молекул талой воды меньше пор клеточных мембран, и она легко проходит в межклеточную жидкость.

1.4. Физические свойства воды

1. Поверхность воды. На молекулы воды в поверхностном слое толщиной ~ 1 нанометр действует сила поверхностного натяжения. Если внутри воды электрические силы притяжения между молекулами воды взаимно компенсируют друг друга, то в поверхностном слое на молекулы воды действует результирующая электрическая сила (сила поверхностного натяжения), направленная внутрь жидкости и стремящаяся уменьшить поверхность воды до минимума. Поэтому капельки воды, например, капельки росы принимают сферическую форму.

Согласно модели, предложенной в работе [51], поверхность воды имеет отрицательный электрический потенциал, обусловленный накоплением гидроксильных ионов HO^- . Положительные ионы гидроксония H_3O^+ притягиваются к отрицательно заряженной поверхности воды, формируя двойной электрический слой. В кислой среде, при $pH \leq 5,5$ поверхность воды может иметь положительный заряд, обусловленный снижением концентрации гидроксильных ионов и увеличением концентрации ионов гидроксония.

Есть и другая точка зрения на формирование отрицательного потенциала поверхности воды. Как показали экспериментальные исследования, разность потенциала между положительно заряженной ионосферой и отрицательной поверхностью Земли составляет $\sim 300 \text{ кВ}$ (аналог гигантского сферического конденсатора емкостью $\sim 1,8 \text{ Ф}$). Естественная величина изменения напряженности электрического поля от поверхности Земли составляет $\sim 150 \text{ В/м}$. Поэтому более легкие и отрицательно заряженные гидроксильные ионы располагаются в электрическом поле Земли на поверхности воды, а более тяжелые

положительные ионы гидроксония располагаются ниже и образуют с ними двойной электрический слой поверхности воды.

Вода – аномальное вещество на Земле, её структура и свойства изменяются в зависимости от температуры, давления, воздействия звуковых колебаний, электромагнитных полей, наличия примесей и солей. У воды очень высокая температура кипения, плавления и парообразования, так как нужно затратить дополнительную энергию на разрыв водородных, электронных связей между молекулами воды.

2. Агрегатные состояния воды. Вода может находиться в четырех агрегатных состояниях: твердое (лёд), жидкое (вода), газообразное (водяной пар) и плазменное (водородно-кислородная плазма) (рисунок 1.6). При изменении температуры и давления все агрегатные состояния определяются соотношениями между кинетической энергией движения молекул воды и энергией электронных, водородных (кислородно-водородных) связей между молекулами и атомами воды. Данные связи способствуют образованию в воде определенных структур, соединений кластеров, а механические колебания, движение и столкновение молекул и кластеров воды разрушают данные связи. Поэтому одна часть кластеров сохраняется в воде, а другая распадается.

При атмосферном давлении и температуре $T = T_{пл} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит плавление льда (удельная теплота плавления $317,6\text{ Дж/г}\cdot\text{K}$) и вода из твердого состояния переходит в жидкое. При нагревании воды до температуры кипения $T_{к} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит переход воды из жидкого состояния в газообразное (водяной пар), удельная теплота парообразования воды равна 2258 кДж/кг [42–44]. Поскольку у воды очень высокая температура кипения, плавления и парообразования, то необходимо затратить дополнительную энергию на разрыв водородных связей между молекулами воды.

При нагреве воды до 100 градусов, кинетическая энергия движения молекул становится такой большой, что разрушает электрические связи притяжения молекул воды друг с другом. Молекулярные связи уже не в состоянии удерживать структурированные молекулы воды вместе и в результате, структура кластеров, а затем и сами молекулы воды распадаются. В результате жидкое состояние воды полностью переходит в газообразное – водяной пар. При дальнейшем нагревании газообразного состояния воды (водяной пар), она переходит в четвертое агрегатное состояние – водородно-кислородную плазму.

При охлаждении воды наоборот, энергия движения молекул уменьшается и при соударении их друг с другом кинетической энергии недостаточно, чтобы разрушить водородные и электронные связи между молекулами, что приводит к образованию кластеров, а при замерзании воды – к формированию кристаллической гексагональной структуры льда.

Рисунок 1.6 – Структура молекул воды в трех агрегатных состояниях. Красные шарики – атомы кислорода, белые – водорода (из интернета)

2.1. Вода в твердом состоянии – это лёд, снег, иней. При нормальных условиях ($T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ атм}$) вода переходит из жидкого состояния в твердое – лёд. Правильная тетраэдрическая форма кластера молекул воды (см. рисунок 1.4) повторяется в кристаллической структуре льда: четыре близлежащие молекулы воды во главе с кислородом располагаются в вершинах трехгранной пирамиды, а в центре пирамиды находится пятая молекула воды. Это определяется тем, что угол Н-О-Н молекулы почти равен тетраэдрическому углу 109° в направлении О-Н. Трехмерная гексагональная (шестиугольная) структура из тетраэдров распространяется на весь объем льда.

При замерзании молекулы воды кристаллизуются, расстояние между молекулами увеличивается, лед становится менее плотным и занимает на $\sim 11\%$ больше объема, чем вода. Увеличение объема льда при замерзании воды, приводит к разрушению, например, водопроводных труб, скальных пород. Удивительная аномалия воды: в твердом состоянии вода легче, чем в жидком. Поскольку вода в водоёмах (озера, реки, моря, океаны) замерзает сверху, то образовавшийся слой льда имеет меньшую плотность, всплывает на поверхность воды и препятствует дальнейшему промерзанию водоёма. В результате на земле все живые организмы в водоеме не погибают зимой.

Присутствие в легкой воде (H_2O^{16}) молекул тяжелой воды (D_2O^{16}) приводит к тому, что температура замерзания воды повышается и для чисто дейтериевой тяжелой воды она составляет $T = 3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимум плотности тяжелой воды смещается в сторону высоких температур и реализуется при $T = 11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наличие солей в воде также увеличивает температуру замерзания.

2.2. Вода в жидком состоянии встречается на нашей планете в реках, морях и океанах, облака состоят из крошечных капелек воды и кристалликов льда, дождь – это тоже вода. При атмосферном давлении и температуре от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, вода находится в жидком состоянии. Молекулярные связи молекул воды образуют с другими молекулами различные структуры и кластеры, которые спонтанно движутся, разрушаются и вновь объединяются. Такое представление объясняет высокую степень подвижности жидкой воды и ее низкую вязкость. Вода в жидком состоянии проявляет свои необычайные свойства: смачивает поверхности твердых тел, прилипает к различным твердым веществам. Сама по себе вода не является «влажной», но легко делает влажными большинство твердых материалов.

При температуре выше 0°C происходит плавление трехмерной гексагональной кристаллической структуры льда, объем воды уменьшается на 11% . В талой воде сохраняются свойственные льду водородные и электронные связи каждой молекулы воды с четырьмя соседними молекулами (гексагональная структура). При повышении температуры происходит дальнейшее разрушение «кристаллической» гексагональной структуры воды, которая полностью исчезает при температуре кипения воды.

Высокая температура кипения воды и её удельная теплота парообразования объясняется большим количеством молекулярных связей между молекулами воды, которые необходимо разорвать. Если бы не было такого количества водородных связей, то на основании свойств гидридов, аналогичных кислороду (химические элементы: сера, селен, теллур), вода при атмосферном давлении закипала бы при температуре $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а замерзала при $T = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате этого в океанах и морях вода полностью бы испарилось, не было бы снега и льда, а на Земле не осталось бы ни одной капли воды.

2.3. Вода в газообразном состоянии – это водяной пар, который образуется при нагревании воды до температуры кипения ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ атм}$) и выше. При фазовом переходе воды из жидкого состояния в газообразное (испарение воды) разрушаются все водородные связи, на разрыв которых потребовалось затратить большое количество энергии. Это объясняет наличие у воды большой удельной теплоёмкости, например, для нагрева одного литра воды на один градус требуется затратить $4,1868\text{ кДж}$ энергии. Благодаря этому свойству вода нередко в нашей жизни используется как теплоноситель.

В газообразном состоянии водородная связь между молекулами воды полностью отсутствует, нет кластеров, водяной пар состоит только из молекул воды, соответствующей формуле H_2O . Водяной пар прозрачный и невидим.

Видимый пар или туман представляет собой аэрозоль водяных капель, образующихся при конденсации водяного пара. В зависимости от температуры, давления и влажности (точка росы) водный пар конденсируется в водяные капли и образуется роса. Вода из газообразного состояния переходит в жидкое состояние. Отметим, что вода в газообразное состояние может переходить из твердого состояния (лед, снег, иней), минуя жидкое.

2.4. Водородно-кислородная плазма. При нагревании водяного пара возрастает кинетическая энергия движения молекул воды, которые при соударении друг с другом разрушают свои молекулярные связи. Например, при нагревании водяного пара до температуры выше $T = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, молекулы воды начинают распадаться (диссоциировать) и образуется водородно-кислородная плазма или гидроплазма – смесь молекул воды, ионов и атомов водорода и кислорода.

При дальнейшем увеличении температуры $T > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ водородно-кислородной плазмы, кроме диссоциации молекул воды, водорода и кислорода, начинает происходить ионизация атомов водорода и кислорода. В такой плазме вначале постепенно исчезают молекулы воды, затем и атомы водорода и кислорода, образуются ионы и появляются свободные электроны.

1.5. Коэффициенты воды

Теплофизические (теплоемкость, плотность), переносные (теплопроводность, вязкость) и электромагнитные (электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости) свойства воды являются нелинейными функциями температуры и давления, а электрические и магнитные свойства изменяются ещё и от частоты электромагнитного поля. В таблице 1.1 приведены коэффициенты теплоемкости, плотности, теплопроводности и вязкости воды в зависимости от температуры при атмосферном давлении, которые взяты из работ [42, 43], а коэффициенты диэлектрической проницаемости и электропроводности воды заимствованы из источников [10, 42–48].

1. Теплоемкость. Вода имеет высокую удельную теплоемкость (таблица 1.1). При постепенном нагревании воды от $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплоемкость воды снижается и достигает минимального значения при температуре $T \sim 37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее при увеличении температуры выше $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ удельная теплоемкость воды начинает возрастать и достигает своего максимального значения при температуре кипения воды (см. таблицу 1.1). Если при нагревании воды необходимо затратить большое количество энергии, то при остывании воды требуется много

Таблица 1.1 – Коэффициенты воды при атмосферном давлении

Диэлектрическая проницаемость								
$T, ^\circ\text{C}$	$f = 0,3 \text{ ГГц}$		$f = 3 \text{ ГГц}$		$f = 10 \text{ ГГц}$		$f = 25 \text{ ГГц}$	
	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$
1.5	86.5	0.0320	80.5	0.3100	38.0	1.03	15.0	0.425
5.0	85.2	0.0273	80.2	0.2750	41.0	0.95	17.5	0.395
15	81.0	0.0210	78.8	0.2050	49.0	0.70	25.0	0.330
25	77.5	0.0150	76.7	0.1570	55.0	0.54	34.0	0.265
35	74.0	0.0125	74.0	0.1270	58.0	0.44	41.0	0.215
45	71.0	0.0105	70.7	0.1060	59.0	0.40	46.0	0.275
55	68.0	0.0092	67.5	0.0890	60.0	0.36	49.0	0.245
65	64.5	0.0084	64.0	0.0765	59.0	0.32	50.5	0.125
75	61.0	0.0077	60.5	0.0660	57.0	0.28	51.5	0.105
85	57.0	0.0073	56.5	0.0547	54.0	0.26	-	-
95	52.0	0.0070	52.0	0.0470	-	-	-	-

$T, ^\circ\text{C}$	$f = 0,1 \text{ МГц}$		$f = 1 \text{ МГц}$		$f = 10 \text{ МГц}$		$f = 100 \text{ МГц}$	
	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$	ε_r	$\text{tg}\delta$
1.5	87.0	0.19	87.0	0.019	87.0	0.0020	87.0	0.007
5.0	-	-	85.5	0.022	-	-	-	-
15	-	-	81.7	0.031	-	-	-	-
25	78.2	0.40	78.2	0.040	78.2	0.0046	78.0	0.005
35	-	-	74.8	0.049	-	-	-	-
45	-	-	71.5	0.059	-	-	-	-
55	-	-	68.2	0.072	-	-	-	-
65	-	-	61.8	0.087	-	-	-	-
75	-	-	61.5	0.103	-	-	-	-
85	58.2	1.24	58.0	0.124	58.0	0.0125	58.0	0.003
95	-	-	55.0	0.143	-	-	-	-

$T, ^\circ\text{C}$	Теплопроводность	Теплоемкость	Вязкость	Плотность
	$\lambda, \text{Вт/м.к}$	$C_p, \text{Дж/к}$	$\eta, \text{Н.с/м}^2$	$\rho, \text{кг/м}^3$
0	0.569	4217	0.001753	999.8
4	0.570	4208	0.001615	1000.0
10	0.586	4193	0.001299	999.6
20	0.603	4182	0.001001	998.2
30	0.617	4179	0.000797	995.6
35	0.621	4178	0.000751	994.7
37	0.622	4178	0.000740	994.0
40	0.630	4179	0.000651	992.2
50	0.643	4181	0.000544	988.0
60	0.653	4185	0.000463	983.2
70	0.662	4190	0.000401	977.7
80	0.669	4197	0.000351	971.9
90	0.675	4205	0.000311	965.3
100	0.680	4216	0.000279	958.3

времени, чтобы вода потеряла все накопленное тепло. Поэтому вода в повседневной жизни широко применяется в системах отопления и охлаждения.

Поскольку температура здорового человека $36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует минимальному значению удельной теплоемкости воды, то это свойство воды защищает организм человека от перегрева и переохлаждения. Вода в организме человека переносит тепло, отдавая её там, где температура тканей ниже, и забирая там, где температура более высокая.

Вода способствует выравниванию температуры на Земле, вследствие своей высокой теплоемкости она интенсивно нагревается в экваториальных областях и отдает тепло в средних и полярных широтах. Молекулы водяного пара предохраняют атмосферу Земли и от космического холода [28].

2. Плотность. Как следует из данных таблицы 1.1, при атмосферном давлении с увеличением температуры воды от $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T = 3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ плотность воды возрастает, а при дальнейшем повышении температуры начинает уменьшаться практически обратно пропорционально температуре. При нагревании воды до критической температуры $T = 374,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ исчезает граница раздела между жидким состоянием воды и водяным паром.

Тот факт, что плотность воды достигает своего максимального значения ($\rho = 1\text{ г/см}^3$) при $T = 3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$, а не в точке замерзания воды $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет большое значение для создания необходимых условий существования биологической жизни на Земле. Из-за особых химико-физических свойств воды при замерзании водоемов на поверхности воды образуется лёд, плотность которого ($\rho = 0,9998\text{ г/см}^3$) меньше, чем плотность воды. Поэтому лёд плавает по поверхности воды, не опускается на дно и препятствует промерзанию до дна озер, рек, морей и океанов в средних и высоких широтах Земли.

3. Теплопроводность воды возрастает с увеличением температуры от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как увеличивается кинетическая энергия движения молекул воды (см. таблицу 1.1). При атмосферном давлении и температуре кипения воды $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент теплопроводности воды достигает своего максимального значения – $0,68\text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$.

4. Вязкость воды уменьшается с увеличением температуры от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. таблицу 1.1). Относительно высокая вязкость воды обусловлена наличием водородных связей между молекулами воды, которые и затрудняют их движение. При увеличении температуры возрастает кинетическая энергия движения молекул воды, происходит разрушение электронных и водородных связей между молекулами, что приводит к уменьшению вязкости воды.

5. Электропроводность. Вода – это слабый электролит, в котором всегда присутствует некоторое количество положительных и отрицательных ионов. Электропроводность воды зависит от растворенных в ней солей и других примесей. Поэтому специально очищенная и «совершенно чистая вода» является хорошим диэлектриком и практически не проводит электрического тока. Например, при атмосферном давлении и температуре $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ электропроводность «совершенно чистой воды» равна $\sigma = 3,8 \cdot 10^{-6}\text{ 1/ом}\cdot\text{м}$, а дистиллированная вода имеет электропроводность на три порядка больше: $\sigma = 2 \cdot 10^{-3}\text{ 1/ом}\cdot\text{м}$. Наличие незначительной электропроводности даже у «совершенно чистой воды», объясняется частичной диссоциацией ее на ионы (H^+ , OH^-), концентрация которых, например, при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $\sim 10^{-7}$ грамм-ионов на литр воды.

Электропроводность воды сложным образом зависит от температуры и частоты электромагнитного поля [10, 39] (см. таблицу 1.1):

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \nu_e}{m_e (\omega^2 + \nu_e^2)} = \varepsilon_o \varepsilon_i \omega = \varepsilon_o \varepsilon_r \omega \operatorname{tg} \delta, \quad (1.1)$$

где m_e , n_e – масса и концентрация иона; ν_e – частота соударения иона с молекулами воды; e – заряд иона; ω – круговая частота электромагнитного поля. При циклической частоте $f < 10$ МГц ($\omega = 2\pi f$) электропроводность растет с увеличением температуры, при $f = 100$ МГц – $\sigma(T)$ уменьшается, а при $f = 25$ ГГц электропроводность $\sigma(T)$ нелинейным образом зависит от температуры [10].

В переменных электромагнитных полях существенную роль играет отношение активной составляющей электрического тока к реактивной. При увеличении циклической частоты электромагнитного поля $f \geq 1$ ГГц свойства воды при температурах ($T < 50$ °C) становятся больше похожими на проводник, чем на диэлектрик.

6. Диэлектрическая проницаемость ε определяется как отношение напряженности электрического поля в вакууме $\vec{E}_A$ к напряженности среднего макроскопического электрического поля в однородной изотропной среде $\vec{E}$. С другой стороны, диэлектрическая проницаемость характеризует, насколько уменьшается сила $\vec{F}$ взаимодействия электрических зарядов при переносе их из вакуума (сила $\vec{F}_B$) в данную однородную среду при сохранении расстояния между зарядами:

$$\varepsilon = \left| \vec{E}_B \right| / \left| \vec{E} \right| = \left| \vec{F}_B \right| / \left| \vec{F} \right|.$$

Диэлектрическая проницаемость является одной из основных электрических характеристик воды и связана с ее строением и свойствами атомов, молекул и ионов. В молекуле воды центры положительных и отрицательных зарядов сильно смещены друг относительно друга и поэтому вода обладает аномально большой диэлектрической проницаемостью. Силы взаимодействия молекул и атомов на поверхности любых твердых тел, помещенных в воду, уменьшаются в $\varepsilon = 81$ раз, по сравнению с вакуумом ($\varepsilon = 1$) или в воздухе ($\varepsilon = 1,0006$). Если энергия связи между атомами или молекулами твердого тела, помещенного в воду, будет меньше энергии теплового движения молекул воды, то вследствие соударения с молекулами воды, данные электронные связи на поверхности твердого тела разрываются, и атомы или молекулы с поверхности твердого тела растворяются в воде. Поэтому вода является химически активным растворителем.

Диэлектрическая проницаемость воды возрастает с увеличением числа атомов, молекул, ионов и зависит от поляризации молекул воды и их взаимного расположения (см. рисунок 1.4). В переменных гармонических электромагнитных полях диэлектрическая проницаемость воды является комплексной величиной $\varepsilon_k(\omega)$ и нелинейным образом зависит от частоты ω :

$$\varepsilon_k = \varepsilon_r - i\varepsilon_i, \quad \varepsilon_r = \operatorname{Re}(\varepsilon_k), \quad \varepsilon_i = \operatorname{Im}(\varepsilon_k), \quad (1.2)$$

где ε_r , ε_i – действительная (вещественная) и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости. Действительная часть диэлектрической проницаемости обусловлена деформационной и ориентационной поляризацией молекул воды. Мнимая часть диэлектрической проницаемости определяет процесс установления ориентационной дипольной

поляризации и связана с электропроводностью среды. Величина $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ определяет фактор диэлектрических потерь, которые характеризуются тангенсом угла δ :

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e (\omega^2 + \nu_e^2)}, \quad \varepsilon_i = \sigma / \omega \varepsilon_0, \operatorname{tg} \delta = \varepsilon_i / \varepsilon_r. \quad (1.3)$$

Введение ε_k заключается в том, что вектор индукции электрического поля имеет две составляющие: одна $\varepsilon_r E$ находится в фазе с электрическим полем, вторая $\varepsilon_i E$ отстает от нее на 90° . Поэтому помимо тока проводимости, связанного с реактивной составляющей ε_r , ток смещения имеет активную составляющую. Частотная зависимость ε_r и ε_i может быть представлена в следующем виде [30, 44]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_n - \varepsilon_\infty) / (1 + (\omega\tau)^2), \quad \varepsilon_i = ((\varepsilon_n - \varepsilon_\infty)\omega\tau) / (1 + (\omega\tau)^2),$$

$$\varepsilon_n = 1 + 4\pi(x_1 + x_2), \quad \varepsilon_\infty = 1 + 4\pi x_1,$$

где x_1, x_2 – диэлектрические восприимчивости; τ – время релаксации.

В общем виде диэлектрическая проницаемость воды является нелинейной функцией частоты электромагнитного поля, давления и температуры $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, P, \omega)$ [10, 44–48] (рисунки 1.7, таблица 1.1). Видно, что $\varepsilon_r, \operatorname{tg} \delta$ сложным нелинейным образом зависят от ω и T . С увеличением частоты электромагнитного поля действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε_r уменьшается, а $\operatorname{tg} \delta$ вначале уменьшается, достигает минимального значения, затем возрастает, достигает максимального значения и вновь уменьшается. С увеличением температуры диэлектрическая проницаемость воды уменьшается, а минимум $\operatorname{tg} \delta$ смещается в сторону высоких электромагнитных частот.

7. Магнитная проницаемость. Коэффициент магнитной проницаемости определяется из выражения $\mu = \mu_0 \mu_c$, где абсолютная магнитная проницаемость $\mu_0 = 4\pi 10^{-6} \text{ Гн/м}$, а μ_c – представляет собой магнитную проницаемость среды.

Для рассматриваемых режимов микроволнового нагрева воды и проведения численных расчетов, полагаем, что магнитная проницаемость среды (вода, стеклянная или керамическая емкость, воздух) практически не зависит от частоты электромагнитного поля, температуры и давления и задается постоянной величиной: $\mu_c = 1$.

Сдерживающим фактором проведения теоретических расчетов нагрева, например, водопроводной воды микроволновым излучением, является отсутствие в специальной литературе данных, характеризующих свойства воды путем задания её коэффициентов в зависимости от температуры, давления и частоты электромагнитного поля, с учетом наличия солей и других примесей. Поэтому расчеты микроволнового нагрева проводятся для дистиллированной воды, для которой в научной литературе имеются достаточно полные данные по теплофизическим, переносным и электромагнитным свойствам (коэффициентам) [10, 42–47] (см. таблицу 1.1).

1.6. Микроволновой нагрев воды

Большинство бытовых микроволновых (СВЧ) печей работают от источников электромагнитного излучения – магнетронов мощностью от 500 Вт и выше на частоте $2,45 \text{ ГГц}$.

Рисунок 1.7 – Зависимость действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемостей от температуры и частоты электромагнитного поля

В некоторых странах, например, в России, США, разработаны микроволновые печи и другие устройства на частоте электромагнитного излучения 915 МГц .

1. Электромагнитное поле. Электромагнитное поле характеризуется векторами напряженности электрического поля $\vec{E}$ и поля магнитной индукции $\vec{B}$, которые ортогональны друг к другу и к направлению скорости распространения излучения (рисунок 1.8). Микроволновое или СВЧ-излучение – это распространяющиеся в пространстве возмущение электромагнитного поля с частотой ультракоротких радиоволн гигагерцевого диапазона частот ($\omega = 1\text{--}1000\text{ ГГц}$) [30]. Благодаря действию электромагнитного поля осуществляется взаимодействие с ионами и молекулами-диполями воды. Отметим, что частота микроволнового излучения лежит внутри спектра поглощения молекулы воды.

В микроволновой печи от магнетрона электромагнитное излучение практически «свободно» проходит через газовую среду (воздух) и диэлектрические стенки стеклянной или керамической емкости взаимодействует с водой и проводящими металлическими стенками микроволновой печи. Вследствие диссипации (поглощения) мощности подводимого электромагнитного излучения происходит термический объемный нагрев воды. В процессе взаимодействия и нагрева воды часть излучения частично проходит через воду, а часть отражается от неё на стенки микроволновой печи.

2. Поляризация молекул воды. Процесс взаимодействия электромагнитного излучения с водой обусловлен тем, что в воде всегда присутствует некоторое количество положительных и отрицательных ионов, а молекулы воды обладают большим дипольным моментом. Каждая молекула воды представляет собой диполь с двумя разноименными электрическими полюсами, так как положительное ядро атома кислорода подтягивает к себе отрицательно заряженные электроны и создает избыточный отрицательный заряд ($e_i = -q$), а у атомов водорода, наоборот, образуется такой же положительный заряд (см. рисунок 1.3). Несмотря на то, что молекула воды в целом электрически нейтральна, дипольная структура молекулы воды во многом определяет ее свойства. В электрическом поле $\vec{E}$ возникают кулоновские силы:

$$\vec{F}_1 = +q\vec{E}, \quad \vec{F}_2 = -q\vec{E},$$

которые ускоряют движение ионов воды и ориентируют (поворачивают) молекулы-диполи воды вдоль направления внешнего электрического поля (рисунок 1.8).

Рисунок 1.8 – Электромагнитное поле и электрические силы, действующие на молекулу-диполь воды вдоль направления электрического поля (из интернета)

В обычном состоянии воды электрические моменты полярных молекул-диполей имеют произвольные изотропные направления, обусловленные тепловым движением молекул (рисунок 1.9). При воздействии электромагнитного поля дипольная структура молекул воды изменяет свое положение в пространстве, что приводит к полярности воды. В результате поляризации молекул воды на одной внешней стороне жидкости возникает слой связанных положительных зарядов, на другой – отрицательных (рисунок 1.9). Внутри воды заряды противоположных знаков компенсируют друг друга при взаимодействии с соседними молекулами диполями воды.

Поляризация или электрический момент воды характеризуется вектором поляризации $\vec{P}_p$ и током поляризации $\vec{j}_p$:

$$\vec{P}_p = \sum e_i \vec{r}_i, \sum e_i = 0, \vec{j}_p = \partial \vec{P}_p / \partial t, \quad (1.4)$$

где $\vec{r}_i$ – радиус-вектор заряда e_i .

При воздействии на жидкость электромагнитного излучения происходит периодическая **поляризация** воды, связанная с колебаниями ионов и вращениями молекул диполей воды под действием внешнего электрического поля. Поляризация не изменяет суммарного электрического заряда внутри воды, а сопровождается появлением дополнительного электрического поля поляризации, направленного против внешнего электрического поля. Действие электрического поля приводит к смещению электронных оболочек атомов относительно положительных ядер кислорода и водорода (**электронная поляризация**), которая быстро устанавливается за характерное время: $t \sim 10^{-15}$ с [42]. Дипольный электрический момент молекулы воды пропорционален напряженности действующего электрического поля. Дипольная поляризация связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле и приводит к потерям энергии на преодоление сил электрического взаимодействия водородных и электронных связей между молекулами воды и внутренним трением молекул.

На электронную поляризацию воды накладывается дипольная **ориентационная тепловая поляризация** или ее еще называют **релаксационной поляризацией** [30, 42]. Дипольные моменты молекул ориентируются по направлению внешнего электрического поля, тогда как тепловое движение молекул и ионов воды пытаются разрушить эту ориентацию. В результате устанавливается динамическое равновесие, при котором средняя

Рисунок 1.9 – Распределение полярных молекул-диполей в электрическом поле: слева $E_0 = 0$, справа $E_0 \neq 0$ (из интернета)

составляющая дипольного момента вдоль электрического поля отлична от нуля. Время установления ориентированной тепловой поляризации сравнительно велико и быстро уменьшается с увеличением температуры. Наложение данной поляризации на электронную поляризацию приводит к увеличению общей диэлектрической проницаемости воды.

Если время релаксации воды близко к периоду изменения колебаний электрического поля $\omega\tau \sim 1$, то релаксационная поляризация воды приводит к заметным диэлектрическим потерям. При $\omega\tau = 1$ имеет место значительный сдвиг фаз между электрическим полем и полем поляризации, приводящим к максимуму диэлектрических потерь. В случае $\omega\tau \ll 1$ релаксационная поляризация устанавливается за время полупериода колебаний электрического поля, а при $\omega\tau \gg 1$, она практически отсутствует [42].

1.7. Уравнения магнитной гидродинамики

При воздействии на воду электромагнитного излучения электрические силы изменяют напряжения и связи внутренних заряженных структур (диполей) молекул воды (рисунки 1.8). Это приводит к движению ионов и вращению молекул-диполей воды в переменных электрических полях, которое влияет на внутренние (водородные, электронные) электрические связи между молекулами воды (рисунок 1.9). Вследствие соударения ионов и молекул диполей воды между собой, уменьшаются электрические напряжения внутренних молекулярных связей между заряженными частицами, происходит увеличение кинетической энергии движения молекул воды. Энергия микроволнового излучения идет на сообщение кинетической энергии движения ионам и вращению молекул-диполей воды, которые в результате столкновений передают её другим частицам воды и в результате происходит термический объемный нагрев воды.

Следует отметить, что для поглощения (диссипации) электромагнитного излучения не обязательно наличие в воде свободных зарядов ионов, а достаточно, чтобы она имела небольшую электропроводность (мнимую составляющую диэлектрической проницаемости), которая связана с колебаниями молекул-диполей при воздействии электрического поля.

1. Система уравнений. Для теоретического моделирования макроскопического теплового нагрева воды, да и любой жидкости электромагнитным излучением необходимо, чтобы характерный масштаб неоднородностей микроструктуры воды r_c был намного меньше длины волны электромагнитного поля: $\lambda(r_c / \lambda \ll 1)$, а её электрические и магнитные свойства определялись эффективными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости.

Для математического описания микроволнового нагрева воды электромагнитным излучением воспользуемся следующими уравнениями магнитной гидродинамики (МГД): энергии, движения, непрерывности и Максвелла [25, 26, 38, 39], которые запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T \right) &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \vec{j} \cdot \vec{E} / 2; \\ \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right) &= \nabla \cdot (\eta \nabla \vec{V}) - \nabla P + \vec{j} \times \vec{B} / 2, \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0;$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t; \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t;$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

При описании процессов микроволнового нагрева воды в уравнении теплопроводности учитывается источник тепла $Q_d = \vec{j} \cdot \vec{E} / 2$, обусловленный диссипацией мощности электромагнитного излучения.

Связи между векторами плотности электрического тока, вектором поляризации, напряженности и индукции электрического и магнитного полей определяются уравнениями электрического состояния с практически статическими (стационарными) значениями коэффициентов электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемостью (σ , ε , μ) [38–39]:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_i \vec{E} + 4\pi \vec{P}_p. \quad (1.6)$$

При рассмотрении распространения гармонических электромагнитных волн в воде, диэлектрической ёмкости или в газовой среде при

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \cdot \exp(i\omega t), \quad \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) \cdot \exp(i\omega t),$$

определим выражения, связывающие полный электрический ток в жидких средах с токами проводимости, смещения и поляризации:

$$\vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t = \vec{j} + \varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t + \partial \vec{P}_p / \partial t = \vec{j} + \vec{j}_{cm} + \vec{j}_p.$$

Ток проводимости $\vec{j}$ связан с движением свободных заряженных частиц – ионов воды, ток смещения (фиктивный ток) $\vec{j}_{cm}$ определяется изменением вектора напряженности электрического поля, а ток поляризации $\vec{j}_p$ обусловлен движением и вращением «связанных» электрических зарядов – молекул диполей воды (изменение вектора поляризации). Причем ток проводимости находится в фазе с изменением вектора электрического поля $\vec{E}$, а ток поляризации, как и ток смещения, сдвинут по фазе на $\pi/2$ по отношению к изменению электрического поля:

$$\begin{aligned} \vec{j}_p &= \partial \vec{P}_p / \partial t = \partial(\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\vec{E}) / \partial t = \\ &= \varepsilon_0(\varepsilon - 1)i\omega \vec{E}_0 \exp(i\omega t) = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)\omega \vec{E}_0 \exp(i(\omega t - \pi/2)). \end{aligned}$$

2. Уравнение энергии электромагнитного поля выводится из уравнений Максвелла (1.5) и путем ряда математических преобразований и приводится к виду [39]:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) + \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{j} \cdot \vec{E}.$$

При усреднении (интегрировании) данного уравнения за период гармонических колебаний электромагнитного поля и учета закона Ома (1.6), следует:

$$\nabla \vec{W} = \frac{1}{2} \vec{j} \cdot \vec{E} = \frac{1}{4} (\vec{j} \cdot \vec{E}^* + \vec{j}^* \cdot \vec{E}) = \frac{\sigma}{2} \vec{E} \cdot \vec{E}^* = \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \vec{W} = \vec{E} \times \vec{H}.$$

Здесь при интегрировании учитывается, что первое слагаемое в уравнении является нечетной функцией и обращается в ноль, а остальные слагаемые являются четными функциями и при комплексном произведении учитываются с коэффициентом 1/2, так как произведение равно действительной части одного из сомножителей на комплексно-сопряженное значение * другого [38, 39].

При воздействии на воду электромагнитного излучения изменяется внутренняя энергия, связанная с колебанием, вращением, движением и соударением частиц, дипольных зарядов ионов, атомов и молекул, приводящая к нагреву жидкости путем выделения «джоулева тепла», эквивалентного работе электрических сил $\vec{j} \cdot \vec{E}$ по перемещению заряда в электрическом поле. Перенос потока мощности электромагнитного излучения (вектор Умова–Пойнтинга $\vec{W}$) происходит в направлении распространения излучения, перпендикулярном векторам напряженностей электрических и магнитных полей, и равен количеству энергии диссипации, выделяющейся в воде в виде «джоулева тепла» [38, 39].

3. Волновое уравнение. Первая пара уравнений Максвелла (1.5) приводится к симметричному виду путем учета уравнений состояния (1.6) и введения комплексной диэлектрической проницаемости ε_k :

$$\varepsilon_e = \varepsilon_r - i\varepsilon_i, \quad \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \mu \partial \vec{H} / \partial t, \quad \nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_k \partial \vec{E} / \partial t.$$

Для однородных жидких сред из данных уравнений, путем исключения $\vec{H}$, получается волновое уравнение относительно напряженности электрического поля $\vec{E}$:

$$\partial^2 \vec{E} / \partial t^2 = V^2 \nabla^2 \vec{E}, \quad V = c / \sqrt{\mu \varepsilon_k}, \quad c = 1 / \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0},$$

где V , c – скорость распространения электромагнитной волны в жидкой среде и скорость света в вакууме. Аналогично, исключая $\vec{E}$, можно получить волновое уравнение относительно напряженности магнитного поля $\vec{H}$.

При распространении гармонических электромагнитных волн, волновые уравнения относительно $\vec{E}$ или $\vec{H}$ преобразуются к одному обобщенному **приведенному** волновому уравнению вида:

$$\nabla^2 \vec{E} + K_\omega^2 \vec{E} = 0, \quad \nabla^2 \vec{H} + K_\omega^2 \vec{H} = 0, \quad K_\omega = k_0 \sqrt{\mu \varepsilon_k}, \quad (1.7)$$

где K_ω – волновое число в рассматриваемой среде (вода, воздух, стекло или керамика), $k_0 = \omega/c$ – волновое число в вакууме.

4. Преломление и поглощение электромагнитных волн. В силу комплексности диэлектрической проницаемости ε_k , волновой вектор K_ω также является комплексным числом [39]:

$$K_\omega = \frac{\omega}{c} (n - i\kappa) = k_0 \sqrt{\mu \varepsilon_k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu (\varepsilon_r - i\varepsilon_i)},$$

где n, k – вещественные значения, обозначающие показатель преломления и коэффициент поглощения электромагнитного излучения в воде, которые определяются соотношениями между амплитудами и фазовым сдвигом у колебаний электромагнитного поля [38–39]:

$$\vec{H} = (n + i\kappa) \vec{E} = \sqrt{n^2 + \kappa^2} e^{i\psi} \vec{E}, \quad \psi = \arctg(\kappa / n).$$

Показатель преломления характеризует изменения фазовой скорости и длины электромагнитной волны в жидкой среде по отношению к скорости света и длине волны в вакууме:

$$V = c / n, \quad \lambda = \lambda_0 / n.$$

Показатель преломления воды в оптическом диапазоне равен $n = 1,33$. Коэффициент поглощения определяет затухание электромагнитной волны, который показывает уменьшение амплитуды волны в e раз вдоль пути распространения излучения в воде:

$$\Delta x = c / \omega \kappa = \lambda_0 / 2\pi \kappa.$$

Значения n, k определяются из дисперсионного соотношения K_ω :

$$n^2 - \kappa^2 = \mu \varepsilon_r, \quad 2n\kappa = \mu \varepsilon_i, \quad \tg \delta = \varepsilon_i / \varepsilon_r,$$

$$n^2 = \frac{1}{2} \mu \varepsilon_r \left(1 + \sqrt{1 + \tg^2 \delta} \right), \quad \kappa^2 = \frac{1}{2} \mu \varepsilon_r \left(-1 + \sqrt{1 + \tg^2 \delta} \right).$$

Для обеспечения вещественности значений n, k внутренний корень всегда считается положительным [39]. Связь между коэффициентами поглощения k и затухания мощности потока энергии η_ω , характеризующим изменение мощности энергии электромагнитного излучения при распространении в жидкости, устанавливается из выражения:

$$\eta_\omega = \kappa \omega / c = \kappa k_0.$$

Рассмотрим частные случаи распространения электромагнитного излучения в жидких средах, в частности в воде, с предельными электрическими свойствами:

1. $\sigma = 0$ – жидкость является **идеальным диэлектриком** (прозрачная «совершенно чистая вода», которая практически не проводит электрический ток):

$$\varepsilon_i = 0, \quad \varepsilon_k = \varepsilon_r, \quad n^2 = \mu \varepsilon_r, \quad \kappa = 0, \quad \mu_\omega = 0, \quad \delta = 0.$$

В данной жидкости нет токов проводимости и поляризации, электромагнитная волна поддерживается токами смещения и распространяется в жидкости без затухания, нет диссипации мощности электромагнитного излучения и, соответственно, нет нагрева жидкости;

2. $\sigma \ll 1$ – жидкость является **диэлектриком**, но обладает **малой электрической проводимостью** (дистиллированная вода):

$$\varepsilon_i \neq 0, \quad \varepsilon_i / \varepsilon_r \ll 1, \quad n^2 \approx \mu \varepsilon_r, \quad \kappa \ll 1, \quad \delta \approx 0.$$

В такой жидкости электромагнитная волна слабо поглощается (затухает) по пути распространения. Небольшая величина мнимой составляющей диэлектрической проницаемости, связанная, по-видимому, с внутренним дипольным моментом, который создают

молекулярные электроны при колебаниях [38, 39]. Поляризация приводит к изменениям электрического напряжения молекулярных связей, движению и вращению ионов в электромагнитном поле. По характерному тангенсу угла диэлектрических потерь можно определить, какая часть энергии электрического поля идет на объемный нагрев жидкости.

3. $\sigma \gg I$ – жидкость является «хорошим проводником» электрического тока (морская вода, щелочные и соляные растворы воды с большой концентрацией ионов, а также ртуть и расплавленные металлы):

$$\varepsilon_i / \varepsilon_r \gg 1, \quad \varepsilon_r > 0, \quad n^2 = \kappa^2 \approx \mu \varepsilon_i / 2, \quad \delta \approx \pi / 2.$$

В данной жидкости электромагнитная волна практически не распространяется, а быстро затухает на расстоянии, равном толщине скин-слоя. Размеры скин-слоя определяют глубину проникновения электромагнитной волны в данную жидкость, на котором ее амплитуда уменьшается в e раз:

$$\delta_c = c / \omega \kappa.$$

Электромагнитная волна распространяется в поверхностном скин-слое жидкости, где происходит диссипация мощности электромагнитного излучения и выделяется «джоулево тепло». В данном случае происходит фактически не объемный, а поверхностный нагрев жидкости электромагнитным излучением. Причем нагрев воды реализуется вследствие переноса энергии конвективными и кондуктивными потоками тепла с поверхностного скин-слоя вглубь жидкости.

5. Применимость макроскопического описания. Линейная зависимость уравнений состояния (1.6) нарушается при заметном проявлении *дисперсии* диэлектрической и магнитной проницаемости $\varepsilon(\omega)$ и $\mu(\omega)$ для частот электромагнитного поля, сравнимых с собственными частотами электронных колебаний молекул жидкости. Например, в дистиллированной воде поляризация связана с ориентацией молекул и атомов с дипольными моментами и поэтому дисперсия диэлектрической проницаемости от частоты $\varepsilon(\omega)$ наступает при больших частотах: $\omega > 100 \text{ ГГц}$ [38].

Распространение электромагнитных волн в жидких средах, определяемых на основе уравнений Максвелла (1.5) или приведенного волнового уравнения (1.7), допустимо для частот $\omega \sim c/a$, когда длина электромагнитной волны ($\lambda = 2\pi c / \omega$) соизмерима с атомными размерами молекул жидкости ($R \sim a$) [38]. В этом случае установление электрической поляризации вещества не успевает следовать за изменениями электромагнитного поля. Для оптических, ультрафиолетовых и более высоких частот электромагнитного излучения фактически исчезают даже количественные отличия в свойствах жидких сред, расплавленных металлов и диэлектриков.

1.8. Движение ионов воды в периодическом электрическом поле

Рассмотрим движение ионов воды в периодическом электрическом поле: $\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(-i\omega t)$. На ион, движущийся со скоростью $\vec{V}_a$ и массой m_e , действует электрическая сила и сила сопротивления (трения) воды. Полагаем, что при движении иона сила электрического взаимодействия равна: $F_a = -e\vec{E}$, а сила сопротивления воды соответствует

среднему изменению импульса в единицу времени с учетом столкновений иона с ионами и молекулами воды:

$$F_c = -m_e \nu_e \bar{V}_e.$$

Сила сопротивления движению иона учитывает через частоту столкновения ν_e , кроме силы сопротивления в соответствии с законом Стокса, также электроосмотические и релаксационные силы [30]. Это в итоге приводит к тому, что изменение характеристик воды зависит не только от частоты столкновения частиц, но и от частоты изменения внешнего электромагнитного поля.

Для определения скорости $\bar{V}_e$ и перемещения $\bar{r}_e$ иона в воде, с учетом действующих сил, воспользуемся уравнением движения Ньютона:

$$m_e \frac{d\bar{V}_e}{dt} = -e\bar{E} - m_e \nu_e \bar{V}_e.$$

При решении уравнения движения полагается, что в начальный момент ион находился в начале координат и начальная скорость равна нулю. Тогда в результате решения уравнения движения получим [39]:

$$\bar{V}_e = -i \frac{e}{m_e (\omega - i\nu_e)} \bar{E}, \quad \bar{r}_e = \frac{e}{m_e \omega (\omega - i\nu_e)} \bar{E}.$$

Умножая данные выражения на $e n_e$, определим значения вектора электрического тока и вектора поляризации:

$$\vec{j} = -i \frac{e^2 n_e}{m_e (\omega - i\nu_e)} \bar{E} = \frac{e^2 n_e \nu_e}{m_e (\omega^2 + \nu_e^2)} \bar{E} + i \frac{e^2 n_e \omega}{m_e (\omega^2 + \nu_e^2)} \bar{E},$$

$$\vec{P}_p = \frac{e^2 n_e}{m_e \omega (\omega - i\nu_e)} \bar{E} = i \frac{e^2 n_e}{m_e (\omega^2 + \nu_e^2)} \bar{E} + \frac{e^2 n_e \nu_e}{m_e \omega (\omega^2 + \nu_e^2)} \bar{E}.$$

Видно, что в воде полный ионный ток обусловлен токами проводимости и поляризации. Из уравнений состояния электромагнитных характеристик среды (1.6) определяется значение вектора поляризации:

$$\vec{P}_p = \varepsilon_i (\varepsilon - 1) \bar{E} / 4\pi.$$

При сравнении закона Ома (1.6) и $\vec{P}_p$ с полученными выше решениями уравнения движения, находятся коэффициенты электропроводности и диэлектрической проницаемости воды:

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \nu_e}{m_e (\omega^2 + \nu_e^2)}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e (\omega^2 + \nu_e^2)}.$$

Рассмотрим предельные случаи движения ионов воды в электромагнитном поле при различных значениях частоты столкновения иона с молекулами воды:

а) $\nu_e = 0$ (отсутствуют столкновения ионов с молекулами воды). В этом случае электропроводность и диэлектрическая проницаемость воды соответственно будут равны:

$$\sigma = 0, \quad \varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}.$$

Это означает, что при отсутствии столкновений ионов с молекулами воды нет диссипации мощности электромагнитного поля, и вода не нагревается микроволновым излучением.

б) $\nu_e \ll \omega$ (частота столкновений иона с молекулами воды незначительна по сравнению с изменением частоты электромагнитного поля). В этом случае электропроводность и диэлектрическая проницаемость воды зависят от частоты электромагнитного поля и частоты столкновения иона с молекулами воды:

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \nu_e}{m_e \omega^2}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}.$$

Из данных выражений видно, что даже при незначительных столкновениях иона с молекулами воды происходит диссипация мощности электромагнитного поля и вода нагревается микроволновым излучением. Причем диссипация энергии электромагнитного поля («джоулево тепло» $\sigma E^2/2$) уменьшается с ростом частоты ω .

С увеличением частоты электромагнитного поля амплитуда колебания ионов и вращение дипольных молекул воды, вследствие своей инерции, начинают уменьшаться. Для больших частот электромагнитного поля ионы, молекулы воды начинают совершать колебания около положения равновесия и не успевают столкнуться с другими ионами, молекулами воды и передать им энергию, полученную от электромагнитного поля. В предельном случае при стремлении электромагнитной частоты $\omega \rightarrow \infty$ следует:

$$\sigma \rightarrow 0, \quad \varepsilon \rightarrow 1.$$

в) $\nu_e \gg \omega$ – (очень большая частота столкновений иона с молекулами воды). В этом случае σ , ε определяются следующими формулами:

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_e}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \nu_e^2}.$$

Из полученных выражений видно, что электропроводность и диэлектрическая проницаемость воды практически не зависят от частоты электрического поля и соответствуют значениям σ , ε для случая постоянного электрического поля ($\omega = 0$). Следовательно, физические процессы, протекающие в воде при прохождении постоянного электрического тока (электролиз), аналогичны процессам нагрева воды микроволновым излучением при большой частоте столкновения ионов с молекулами воды.

Отметим, что в постоянном электрическом поле исчезает ток поляризации, но некоторая средняя поляризация воды всё же остается.

1.9. Уравнение теплопроводности и уравнения газовой динамики

В микроволновой печи термический объемный нагрев воды, заключенной в диэлектрическую стеклянную или керамическую емкость, осуществляется путем воздействия на нее потоком мощности электромагнитной энергии, излучаемой магнетронными или гиготронными комплексами. При увеличении температуры воды, благодаря теплопроводности, происходит термический нагрев стеклянных или керамических стенок ёмкости, которые в свою очередь отводят тепло от воды в окружающий воздух и на «холодные» стенки микроволновой печи.

Диссипация мощности электромагнитного излучения в диэлектрической стеклянной емкости отсутствует, а в керамической емкости, изготовленной из материалов оксида алюминия, нитрида кремния и кремния, наблюдается незначительное выделение «джоулева тепла», вследствие диссипации мощности микроволнового излучения. Нагрев стенок керамической емкости электромагнитным излучением снижает потоки тепла, отводимого теплопроводностью от воды к газу, что способствует дополнительному нагреву воды. В некоторых случаях, благодаря действию электромагнитного излучения, стенки емкости сами становятся источниками нагрева воды.

1. Уравнение теплопроводности. Нагрев стеклянных или керамических стенок емкости осуществляется путем переноса тепла теплопроводностью от внутренних нагретых водой поверхности стенок емкости к внешним. Распределение температуры и другие теплофизические характеристики ёмкости находятся из решения уравнения теплопроводности (энергии) [39]:

$$\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (1.8)$$

Для решения уравнения энергии (1.8) задаются теплоемкость, плотность и теплопроводность стекла или керамического материала:

$$(C_\theta = C_c, \rho = \rho_c, \lambda = \lambda_c).$$

Теплообмен между жидкостью и стеклянной или керамической емкостью учитывается путем задания граничных условий на контактной поверхности раздела двух сред (жидкость – стекло или керамика): непрерывностью изменения температуры и кондуктивных потоков тепла.

2. Уравнения газовой динамики. Отвод тепла от нагретой внешней поверхности стенки емкости и дальнейший термический нагрев окружающего газа (воздуха) осуществляется конвективными и кондуктивными потоками тепла в воздухе. Нагретый газ, в свою очередь, отводит данное тепло на «холодные» охлаждаемые металлические стенки микроволновой печи.

Определение тепловых и газодинамических характеристик воздуха проводится на основе решения уравнений газовой динамики [25, 26]:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\partial T / \partial t + (\vec{V} \nabla) T \right) &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) , \\ \rho \left(\partial \vec{V} / \partial t + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right) &= \nabla \cdot (\eta \nabla \vec{V}) - \nabla P , \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0.$$

Для решения системы уравнений (1.9) задаются теплофизические параметры (теплоемкость, плотность – $C_p, \rho = \rho_r$) и переносные свойства (вязкость, теплопроводность – $\eta = \eta_A, \lambda = \lambda_A$) воздуха при атмосферном давлении.

Теплообмен между стеклянной или керамической емкостями и газом в микроволновой печи учитывается заданием граничных условий на контактной поверхности раздела двух сред (стекло, керамика – газ): непрерывность изменения температуры и кондуктивных потоков тепла. На стенках емкости и микроволновой печи скорость газа равна нулю, а на «холодных» охлаждаемых стенках микроволновой печи температура постоянна.

3. Стекло и керамические материалы. Нагрев воды в микроволновой печи проводится в диэлектрической стеклянной ёмкости и в ёмкостях, изготовленных из различных керамических материалов: оксид алюминия (Al_2O_3), нитрид кремния (Si_3N_4), кремний (Si), иглообразный пористый кварц (ТЗМК–10).

Теплофизические и переносные свойства стекла ($\rho_c, \eta_c, \lambda_c, C_c$) берутся из справочных данных [44]. Для случая нагрева воды в ёмкостях, изготовленных из других керамических материалов: оксид алюминия, нитрид кремния, кремний, иглообразный пористый кварц, коэффициенты переноса и теплофизические параметры используются из тех же источников, что и в монографии [23] (таблица 1.2).

4. Воздух. При атмосферном давлении теплофизические и переносные свойства газовой среды – воздуха в зависимости от температуры ($\rho_A, \tilde{N}_p, \lambda_A, \eta_A$) задаются из тех же источников, что и в работах [43, 26] (таблица 1.3).

Таблица 1.2 – Теплофизические, переносные и электромагнитные характеристики керамических материалов, $P = 1 \text{ атм}$

Т °С	λ Вт/м.к	C_p Дж/кг.к	ρ г/см ³	ϵ_r	ϵ_i
Стекло					
27	0,756	670	2,50	4,0	0
100	1,75		2,50		
Оксид алюминия (Al_2O_3)					
27	8,5	800	3,97	9,4	0,001
100	8,0	850	3,97	9,5	0,0011
Нитрид кремния (Si_3N_4)					
27	40	23,9	3,19	9,4	0,06
100	44	24,4	3,19	9,4	0,0003
Кремний (Si)					
27	156,9	730	2,33	11,7	0,001
100	140	750	2,33	11,8	0,001
Иглообразный пористый кварц (ТЗМК–10)					
27	0,06	947	0,144	1,0	0

Таблица 1.3 – Теплофизические и переносные коэффициенты воздуха, $P = 1$ атм

T °K	λ Вт/м.к	C_p Дж/кг.к	ρ кг/см²	η г/м.с	α см²/с
290	0,026	1010	1,16	0,0185	0,222
500	0,041	1080	0,87	0,0270	0,436

Озеро Кель-Когур, Кыргызстан.
Взаимодействие воды с электромагнитным излучением Солнца

Глава 2

ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВОДЫ

На основе решения уравнений магнитной гидродинамики разработаны математические модели микроволнового нагрева воды в стеклянной емкости в форме плоского слоя, цилиндра и сферы. Проведен численный анализ изменения характеристик электромагнитного излучения и воды с учетом нелинейной зависимости коэффициентов от температуры, мощности и частоты электромагнитного поля.

2.1. Моделирование микроволнового нагрева воды

Результаты изучения физических явлений взаимодействия электромагнитного излучения с плазмой и керамическими материалами на основе уравнений магнитной газодинамики, приводятся в работах [13–26]. В данной работе подобный подход используется для исследования физических процессов нагрева воды электромагнитным излучением в микроволновой печи с применением уравнений магнитной гидродинамики [13–18].

Теоретическое исследование взаимодействия электромагнитного излучения с водой связано с большими математическими трудностями, обусловленными сложными электродинамическими процессами и нелинейными изменениями характеристик воды

в зависимости от температуры, мощности и частоты электромагнитного поля. Поэтому моделирование микроволнового нагрева воды и теоретический анализ протекающих теплофизических процессов в данной главе проводится на основе решения простейших одномерных уравнений магнитной гидродинамики. Такой подход устраняет влияние двух- и трехмерных геометрических эффектов, позволяет выявить физику микроволнового нагрева воды и распространения электромагнитного излучения с учетом изменения теплофизических, переносных и электромагнитных свойств. Это дает возможность получить достаточно полную информацию о качественных изменениях характеристик микроволнового нагрева воды и подводимого к ней электромагнитного поля в зависимости от внешних регулируемых параметров и определить оптимальные режимы нагрева воды [14, 18].

2.1.1. Геометрические модели емкости с водой. Для теоретического исследования процессов нагрева воды электромагнитным излучением в микроволновой печи используются стеклянные или керамические емкости с дистиллированной водой. В качестве упрощения математического моделирования и последующих расчетов микроволнового нагрева воды, данные диэлектрические емкости с водой рассматриваются в виде следующих геометрических фигур: протяженный плоский слой, цилиндр, сфера (рисунок 2.1).

2.1.2. Постановка задачи микроволнового нагрева воды: определить характеристики нагрева воды и электромагнитного излучения в микроволновой печи в зависимости от внешних регулируемых параметров: геометрические размеры микроволновой печи и емкости с водой, подводимая мощность и частота электромагнитного излучения.

Для определения характеристик нагрева воды и электромагнитного излучения:

- *решаются* уравнения магнитной гидродинамики, газодинамики и уравнения энергии (теплопроводности);
- *считаются известными:* размеры и геометрия диэлектрической емкости (плоский слой, цилиндр, сфера) и микроволновой печи, подводимая мощность и частота электромагнитного излучения, коэффициенты переноса, теплофизические и электромагнитные свойства воды, диэлектрической емкости, окружающего воздуха, как функции от температуры и частоты электромагнитного поля;
- *предполагается,* что электромагнитная волна в микроволновой печи проходит без поглощения через воздух и диэлектрическую емкость, давление атмосферное, вода и окружающий воздух неподвижны;

Рисунок 2.1 – Геометрия стеклянной или керамической емкости с водой: плоский слой, цилиндр, сфера. Координаты: прямоугольные (x, y, z) , цилиндрические (r, ϕ, z) , сферические (r, ϕ, θ) . Размеры стеклянной емкости и камеры микроволновой печи – R_c, R . Волновыми стрелками показано направление распространения электромагнитного излучения

- *определяются* характеристики воды (температура, потоки тепла, время нагрева) и электромагнитного излучения (напряженность электрических и магнитных полей, коэффициенты отражения, прохождения и диссипации мощности потока излучения), температура диэлектрической емкости и окружающего воздуха.

Задаются: $R, R_c, \omega, Q_n(t)$; находятся: $T, \vec{E}, \vec{B}, k_d, k_p, k_r$; считаются известными:

$$\lambda = \lambda(T), \rho = \rho(T), C_p = C_p(T), \sigma = \sigma(T, \omega), \varepsilon_r = \varepsilon_r(T, \omega),$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i(T, \omega); P = 1 \text{ атм}, \vec{V} = 0.$$

Нагрев воды в микроволновой печи рассматривается в диэлектрической емкости с относительно «тонкими» ($\delta_0/R_c \ll 1, \delta_0 \approx 0$) или «толстыми» ($\delta_0/R_c \sim 1$) стенками. В случае «толстых» стенок на границах поверхности диэлектрической емкости учитывается теплообмен с водой и воздухом. Теплофизические и электромагнитные свойства диэлектрической емкости (стекло и керамические материалы: оксид алюминия, нитрид кремния, кремний) берутся из справочных источников (таблица 1.2):

$$\lambda = \lambda_n, \rho = \rho_n, C_p = C_n, \varepsilon_r = 4, \varepsilon_i = 0 (s = 0).$$

Теплофизические и переносные коэффициенты воздуха задаются функциями температуры, а электромагнитные характеристики считаются постоянными (таблица 1.3):

$$\lambda = \lambda_a, \rho = \rho_a, C_p = C_a, \varepsilon_r = 4, \varepsilon_i = 0 (s = 0).$$

2.2. Взаимодействие излучения с изотермическим слоем воды

Моделирование микроволнового нагрева воды и анализ протекающих физических процессов начинается с решения простейшей *электродинамической задачи*: определить изменение характеристик электромагнитной волны, распространяющейся в воде в зависимости от температуры и толщины плоского слоя воды, мощности и частоты микроволнового излучения.

В этом случае достаточно большую информацию о распространении электромагнитного излучения и взаимодействия его с плоским изотермическим слоем воды можно получить непосредственно из решения волнового уравнения электродинамики (1.7) на основе изменения характеристик комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от температуры и частоты электромагнитного излучения: $\varepsilon_k = \varepsilon(T, \omega)$ (см. таблицу 1.1). Данный теоретический анализ дает возможность оценить физику распространения и взаимодействия микроволнового излучения с изотермическим слоем воды, характер изменения поглощения, отражения и прохождения электромагнитных волн в воде в зависимости от температуры и толщины плоского слоя воды, мощности и частоты электромагнитного излучения.

2.2.1. Решение волнового уравнения. Рассматривается распространение электромагнитного излучения в плоском изотермическом слое воды, толщиной $d = 2R_c$, которая находится в стеклянной емкости с тонкими стенками ($\delta_0/R_c \ll 1$) в центре микроволновой печи с размерами $2R$ (рисунок 2.2).

Температура плоского слоя воды задается постоянной и равной температуре стеклянных стенок емкости и окружающего газа (воздуха) в микроволновой печи:

$$T(x) = T_R = \text{const.}$$

Для исследования влияния температуры изотермического слоя воды на распространение и характеристики электромагнитного излучения, при численных расчетах температура $T(x)$ изменяется вплоть до температуры кипения.

Рассматриваются односторонний и симметричный подводы мощности электромагнитного излучения к плоскому слою воды (рисунок 2.2). Предполагается, что в воде вдоль оси x распространяется плоская электромагнитная волна с компонентами:

$$\vec{E}(0, 0, E_z = E(x)) \exp(i\omega t), \quad \vec{B}(0, B_y = B(x), 0) \exp(i\omega t).$$

Стеклянная емкость с водой достаточно протяженная и при распространении микроволнового излучения в воде не учитываются изменения характеристик электромагнитного поля в направлениях координат y, z : $\partial/\partial y = 0$, $\partial/\partial z = 0$. В результате взаимодействия с водой часть электромагнитного излучения от магнетрона в микроволновой печи отражается от воды обратно, часть излучения проходит сквозь плоский слой воды и частично поглощается по пути распространения.

Для моделирования процесса распространения и взаимодействия электромагнитной волны с плоским изотермическим слоем воды, воспользуемся приведенным волновым уравнением электродинамики относительно напряженности электрического поля (1.7). С учетом сделанных выше предположений, волновое уравнение (1.7) запишется в направлении оси x :

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0. \quad (2.1)$$

Поскольку данное уравнение (2.1) линейно относительно напряженности электрического поля, то изменение амплитуды напряженности электрического поля, с точностью до константы E_0 , можно представить в виде:

$$E(x, t) = E_0 e(x, t).$$

Рисунок 2.2 – Схема сечения x, z плоского слоя воды в стеклянной емкости с характерными областями: I, III – газовая среда, II – емкость с водой, R_c, R, δ_0 – размеры емкости, камеры микроволновой печи и тонкого слоя стекла. Волновыми стрелками показано распространение электромагнитного излучения

Тогда уравнение (2.1) относительно безразмерной функции $e(x,t)$ будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2 e}{dx^2} + k_{\omega}^2 e = 0. \quad (2.2)$$

Такой прием дает возможность аналитически решить волновое уравнение (2.2) относительно функции $e(x,t)$. Запишем общее решение данного уравнения в каждой из рассматриваемых областей I, II, III (рисунок 2.2) так:

$$\begin{aligned} e_1 &= A_1 \exp(ik_0 x) + B_1 \exp(-ik_0 x), \\ e_2 &= A_2 \exp(ikx) + B_2 \exp(-ikx), \\ e_3 &= A_3 \exp(ik_0 x) + B_3 \exp(-ik_0 x). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Постоянные интегрирования $A_{1,2,3}$, $B_{1,2,3}$ определяются из условия непрерывности электрических и магнитных полей на границах раздела двух сред (вода – воздух). При одностороннем подводе мощности электромагнитного излучения к плоскому слою воды в области III (рисунок 2.2) распространяется только прошедшая волна, и в выражениях (2.3) коэффициент $B_3 = 0$.

В результате преобразований, коэффициенты k_d , k_p , k_r – отражения, прохождения и поглощения (диссипации) электромагнитного излучения в плоском изотермическом слое воды толщиной $d = 2R_c$ будут определяться следующими выражениями:

$$\kappa_r = \left| \frac{B_1}{A_1} \right|^2 = \left| \frac{(k^2 - k_0^2)(-1 + e^{2idk})}{-(k - k_0)^2 + e^{2idk}(k + k_0)^2} \right|^2, \quad \kappa_p = \left| \frac{A_3}{A_1} \right|^2 = \left| \frac{4e^{id(k_0 + k)}k_0 k}{-(k - k_0)^2 + e^{2idk}(k + k_0)^2} \right|^2. \quad (2.4)$$

$$\kappa_d = 1 - \kappa_r - \kappa_p.$$

2.2.2. Результаты расчета. Проводится численный анализ изменения характеристик распространения электромагнитного излучения в зависимости от толщины плоского слоя при различных значениях частоты микроволнового излучения, температуры воды и способов подвода мощности электромагнитного излучения.

Исходные данные. Расчет коэффициентов k_r , k_p , k_d – отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения в изотермическом плоском слое воды проводится в зависимости от изменения частоты электромагнитного поля: $f = 0,1, 0,3, 1, 2, 3, 5, 10$ ГГц, и толщины слоя воды: $d = 1, 2, 4, 8, 16$ см. В области изменения координаты $x[-R \leq x \leq R]$ температура воды, стеклянной емкости и воздуха в микроволновой печи задается постоянной и равной следующим значениям: $T(x) = 20, 40, 50, 80, 90$ °C.

Выражения между подводимой мощностью микроволнового излучения, коэффициентами и мощностями отражения, прохождения, поглощения (диссипации) электромагнитных волн, и КПД (коэффициентом полезного действия), имеют следующий вид:

$$Q_n = Q_d + Q_p + Q_r = (\kappa_d + \kappa_p + \kappa_r)Q_n, \quad \text{КПД} = Q_d / Q_n = \kappa_d.$$

1. Изменение толщины плоского слоя воды. Проводится расчет распространения микроволнового излучения в изотермическом слое воды $T(x) = 20^\circ\text{C}$ в зависимости от толщины плоского слоя при постоянной частоте микроволнового излучения: $f = \text{const}$.

Как следует из результатов расчета (рисунки 2.3, 2.4), электромагнитное излучение с частотой $f = 0,1 \text{ ГГц}$ практически полностью отражается от поверхности воды для относительно больших толщин плоского слоя: $d > 2 \text{ см}$. При толщине $d \leq 1 \text{ см}$ излучение наоборот, свободно проходит сквозь «тонкие» слои воды и его поглощение несущественно. Поэтому, для нагрева такого слоя воды необходимо длительное время воздействия электромагнитного излучения или существенное увеличение его подводимой мощности Q_n .

С увеличением частоты микроволнового излучения в три раза ($f = 0,3 \text{ ГГц}$), наблюдается практически такая же картина взаимодействия электромагнитного поля с водой, но только со сдвигом в область больших толщин плоского слоя (рисунок 2.3). При толщине плоского слоя $d \leq 4 \text{ см}$ электромагнитное излучение относительно свободно проходит сквозь слой воды, а при $d > 7 \text{ см}$ – излучение практически полностью отражается от него обратно. Максимумы коэффициентов поглощения ($k_d = 0,2$) и прохождения ($k_p = 0,8$) реализуются при толщине плоского слоя $d = 5,6 \text{ см}$. В этом случае коэффициент отражения достигает минимального значения ($k_r = 0,005$). Для данной частоты электромагнитного излучения подобные условия соответствуют оптимальному режиму нагрева плоского слоя воды с коэффициентом полезного действия (КПД) $\sim 20 \%$.

При дальнейшем увеличении частоты электромагнитного поля ($f = 1 \text{ ГГц}$) наблюдается сложная и нелинейная зависимость изменения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения в зависимости от толщины плоского слоя воды (рисунок 2.4).

Периодическую последовательность изменения максимумов коэффициентов поглощения, прохождения и минимумов коэффициента отражения электромагнитного излучения по толщине плоского слоя воды можно приближенно представить в следующем виде:

$$d_m = md_0,$$

где $d_0 = 1,7 \text{ см}$, $m = 1, 2, 3, \dots$ – число максимумов и минимумов. С ростом числа m амплитуда минимумов коэффициента отражения уменьшается. При больших значениях m , соответственно и d_0 и коэффициент k_r выходят практически на постоянное значение. Максимумы коэффициента поглощения наоборот: вначале возрастают, достигают максимального значения при $m_{\text{max}} = 3$, $d_3 = 5,1 \text{ см}$, а далее выходят на асимптотические постоянные значения. Режим оптимального нагрева воды с КПД $\sim 50 \%$ реализуется при условиях ($f = 1 \text{ ГГц}$, $d_{1,2,3,4}$) и температуры воды $T(x,t) = 20^\circ\text{C}$.

При дальнейшем увеличении частоты электромагнитного излучения ($f = 2 \text{ ГГц}$), практически в два раза уменьшается период и амплитуда колебания коэффициентов отражения, прохождения и поглощения электромагнитного поля (рисунок 2.4). С увеличением толщины плоского слоя воды, данные коэффициенты стремятся к своим асимптотическим значениям: $k_{ra} = 0,64$, $k_{da} = 0,36$, $k_{pa} = 0$ – которые не зависят от значений d, f , а определяются, в основном, температурой воды (см. ниже).

То же самое происходит при увеличении частоты колебаний электромагнитного поля: $f = 3, 5, 10 \text{ ГГц}$. Причем с ростом микроволновой частоты коэффициенты k_r, k_d, k_p достигают своих асимптотических значений при уменьшении толщины плоского слоя воды и амплитуды электромагнитных колебаний (рисунок 2.4).

Рисунок 2.3 – Изменение коэффициентов отражения (пунктирные линии), поглощения (сплошные) и прохождения (точки) в зависимости от толщины плоского слоя и частоты: $f = 0,1$ (верхний график), $0,3$ (средний), 1 (нижний) ГГц, температура воды 20°C

Рисунок 2.4 – Изменение коэффициентов отражения (пунктирные линии), поглощения (сплошные) и прохождения (точки) в зависимости от толщины плоского слоя воды и частоты электромагнитного поля: $f = 2$ (верхний график), 3 (средний), 5 (нижний) ГГц, температура воды 20°C

2. Изменение частоты электромагнитного поля. Проводится расчет распространения излучения в изотермическом слое воды $T(x) = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от частоты микроволнового излучения при постоянной толщине плоского слоя: $d = \text{const}$.

Как показали результаты (рисунки 2.5, 2.6), при заданной толщине плоского слоя воды наблюдаются периодические изменения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения в зависимости от частоты электромагнитного поля. С увеличением толщины плоского слоя воды максимумы коэффициентов поглощения и прохождения k_a , k_p и минимумы коэффициента отражения k_r смещаются в область малых электромагнитных частот. Это происходит при достижении данными коэффициентами постоянных асимптотических значений. Причем амплитуда асимптотических значений в зависимости от частоты электромагнитного поля остается такой же, как и при изменении толщины плоского слоя воды (рисунок 2.5): $k_{ra} = 0,64$, $k_{da} = 0,36$, $k_{pa} = 0$.

Изменения между микроволновой частотой, толщиной плоского слоя воды и максимальными-минимальными значениями коэффициентов k_r , k_a , k_p (рисунок 2.5), можно представить в виде следующего выражения:

$$mfd = \text{const}, \quad (2.5)$$

где число максимальных-минимальных значений коэффициентов k_r , k_a , k_p изменяется как целый натуральный ряд чисел $m = 1, 2, 3, \dots$. Выражение (2.5) позволяет определить максимальное значение коэффициента поглощения для оценки оптимального режима нагрева воды микроволновым излучением и КПД.

3. Влияние температуры плоского слоя воды. Проводится расчет распространения электромагнитного излучения в изотермическом плоском слое воды в зависимости от изменения температуры: $T(x) = 20, 40, 50, 80, 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ при постоянных значениях $(f, d) = \text{const}$.

На рисунке 2.7 видно, что с увеличением температуры воды происходит сдвиг фазы колебаний электромагнитного поля. Это приводит к смещению по толщине плоского слоя пучностей (области выделения тепла) электромагнитного излучения и постепенному распространению фронта электромагнитной волны. Например, при $f = 0,3\text{ ГГц}$, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимум коэффициентов поглощения и прохождения k_a , k_p и минимум коэффициента отражения k_r соответствует $d = 5,6\text{ см}$, а при температуре $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ – k_a , k_p достигают своих максимальных значений при $d = 6,5\text{ см}$, а $k_r \approx 0$.

С увеличением температуры воды уменьшается амплитуда коэффициента диссипации электромагнитного излучения и увеличивается амплитуда коэффициента прохождения: при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k_a = 0,2$, $k_p = 0,8$; а при повышении температуры $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k_a = 0,1$, $k_p = 0,9$. Это указывает на то, что при температуре плоского слоя воды, равном $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшается в два раза диссипация мощности электромагнитного излучения, снижается выделение «джоулева тепла» и почти на 12 % возрастает прохождение (просветление) воды электромагнитным излучением, сквозь слой «горячей» воды. С повышением температуры воды увеличивается область периодических колебаний и амплитуд коэффициентов микроволнового излучения k_r , k_a , k_p в зависимости от толщины плоского слоя и частоты электромагнитного поля (рисунки 2.6, 2.7).

Число максимумов коэффициента поглощения увеличивается в зависимости от частоты электромагнитного излучения и толщины плоского слоя. С повышением температуры воды возрастают амплитуды k_r , k_a , k_p , которые смещаются в сторону больших значений f , d (рисунок 2.7). Следует отметить, что максимум амплитуды коэффициента

Рисунок 2.5 – Изменение коэффициентов отражения (пунктирные линии), поглощения (сплошные) и прохождения (точки) в зависимости от частоты электромагнитного поля и толщины слоя воды: $d = 2$ (верхний график), 4 (средний), 8 (нижний) см, температура воды 20°C

Рисунок 2.6 – Изменения в масштабе 3D: коэффициент отражения (верхний рисунок), поглощения (средний) и прохождения (нижний) в зависимости от толщины плоского слоя и частоты электромагнитного излучения, температура воды $T_0 = 20^\circ\text{C}$

Рисунок 2.7 – Изменение коэффициентов отражения (пунктирные линии), поглощения (сплошные) и прохождения (точки) при $T_0 = 40^\circ\text{C}$ в зависимости от толщины плоского слоя воды и частоты электромагнитного излучения: $f = 0,3$ (верхний график), $f = 3$ (средний) ГГц; $d = 8 \text{ см}$ (нижний)

прохождения реализуется при значении $m = 1$, а далее при увеличении f и d – другие максимумы уменьшаются по экспоненциальному закону (рисунок 2.7). С увеличением температуры плоского слоя воды затухание амплитуды коэффициента прохождения электромагнитного излучения через воду наблюдается при больших значениях f , d .

Асимптотические значения коэффициентов поглощения, отражения и прохождения электромагнитного излучения определяются следующими выражениями:

$$\kappa_{da} = 1 - \frac{1 - 2n + n^2 + \kappa^2}{1 + 2n + n^2 + \kappa^2} \approx \frac{4\sqrt{\varepsilon_r}}{1 + 2\sqrt{\varepsilon_r} + \varepsilon_r} = \frac{4\sqrt{\varepsilon_r}}{(1 + \sqrt{\varepsilon_r})^2},$$

$$\kappa_{ra} = 1 - \kappa_{da} = \frac{(1 - \sqrt{\varepsilon_r})^2}{(1 + \sqrt{\varepsilon_r})^2}, \quad \kappa_{pa} = 0.$$

Здесь $\sqrt{\varepsilon_k} = n - i\kappa$, n , κ – соответствуют вещественным значениям показателя преломления и коэффициента поглощения воды (см. главу 1).

С повышением температуры воды асимптотические значения коэффициента диссипации мощности электромагнитного излучения возрастают не так существенно: $k_{da} = 0,36$ ($T = 20^\circ\text{C}$), $0,38$ ($T = 40^\circ\text{C}$), $0,4$ ($T = 80^\circ\text{C}$), а у коэффициента отражения они уменьшаются: $k_{ra} = 0,64$ ($T = 20^\circ\text{C}$), $0,62$ ($T = 40^\circ\text{C}$), $0,6$ ($T = 80^\circ\text{C}$) (рисунок 2.7).

4. Введение безразмерного параметра. Как было отмечено в работе [22], задача определения максимумов-минимумов коэффициентов отражения, поглощения и прохождения электромагнитного излучения (2.4) существенно упрощается при введении безразмерного параметра ς :

$$\varsigma = k_0 d \sqrt{\varepsilon_r} / \pi = \omega d \sqrt{\varepsilon_r} / \pi c = 2 f d \sqrt{\varepsilon_r} / c. \quad (2.6)$$

Причем зависимость коэффициентов $k_r(\varsigma)$, $k_d(\varsigma)$, $k_p(\varsigma)$ от параметра ς (рисунок 2.8) носит универсальный характер, так как определяет значения данных коэффициентов от комплексного изменения внешних параметров f , d и температуры воды.

Как показали результаты расчета, коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного поля $k_r(\varsigma)$, $k_d(\varsigma)$, $k_p(\varsigma)$ в зависимости от ς изменяются с периодом p . Отношение ς/p определяет число полувольт на толщине плоского слоя воды.

Максимумы коэффициентов $k_d(\varsigma)$, $k_p(\varsigma)$ и минимум $k_r(\varsigma)$ наблюдаются при целочисленных значениях ς , а минимумы коэффициентов $k_d(\varsigma)$, $k_p(\varsigma)$ и максимум $k_r(\varsigma)$, – при полупелых значениях (рисунок 2.8). Прослеживается экспоненциальное изменение коэффициента прохождения в зависимости от безразмерного параметра ς при различных температурах плоского слоя воды (рисунок 2.8). С увеличением температуры наблюдается эффект «просветления» воды, установленный в экспериментах [8]. По мере нагрева воды (рисунок 2.8), увеличивается амплитуда колебания коэффициента поглощения микроволнового излучения и расширяется область изменения параметра V – область реализации оптимальных режимов нагрева воды с максимальным КПД:

$$T = 20^\circ\text{C}, \text{ максимум } k_d(\varsigma) \sim 0,4, \quad 0 \leq \varsigma \leq 5;$$

$$T = 50^\circ\text{C}, \text{ максимум } k_d(\varsigma) \sim 0,45, \quad 0 \leq \varsigma \leq 8;$$

$$T = 80^\circ\text{C}, \text{ максимум } k_d(\varsigma) \sim 0,525, \quad 0 \leq \varsigma \leq 10.$$

Рисунок 2.8 – Распределения коэффициентов прохождения и поглощения электромагнитного излучения от безразмерного параметра $\zeta = k_0 d \sqrt{\varepsilon_r} / \pi$ для частоты $f = 3$ ГГц при температуре: $T = 20^\circ\text{C}$ (нижняя кривая), 50°C (средняя), 80°C (верхняя).
Нижний рисунок: изменение коэффициент поглощения при симметричном подводе излучения в зависимости от параметра $\zeta = k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} / \pi$

5. Симметричный подвод электромагнитного излучения. При симметричном подводе мощности микроволнового излучения к плоскому слою воды ($d = 2 R_c$) (см. рисунок 2.2) и прохождении электромагнитного излучения сквозь слой воды ($k_p = 0$), постоянные интегрирования в выражениях (2.3) соответственно равны: $A_2 = B_2$, $A_3 = B_1$, $B_3 = A_1$. Тогда распределение напряженности электрического поля, коэффициенты отражения и поглощения электромагнитного излучения определяются следующими формулами:

$$e(x) = A_2 \cos(kx), \quad k_r = \frac{\left| \cos(kR_c) - i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kR_c) \right|^2}{\left| \cos(kR_c) + i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kR_c) \right|^2}, \quad k_d = 1 - k.$$

Из данных выражений следует, что на оси симметрии плоского слоя воды всегда образуется стоячая электромагнитная волна с пучностью в центре.

Для теоретического анализа изменения коэффициентов поглощения и отражения, как и в предыдущем случае, переходим к следующему безразмерному параметру:

$$\varsigma = k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} / \pi,$$

который отличается от выражения (2.6) в два раза. Изменения коэффициентов $k_r(\varsigma)$, $k_d(\varsigma)$ происходит аналогично предыдущему случаю (п. 4).

При симметричном подводе мощности качественно изменяются распределения амплитуды колебаний коэффициентов отражения и поглощения (диссипации) электромагнитного поля (рисунок 2.8). Причем амплитуда коэффициента поглощения электромагнитного излучения достигает максимального значения при параметре $\varsigma = 2$, а далее, с увеличением ς коэффициент $k_d(\varsigma)$ уменьшается экспоненциально до своих асимптотических значений:

$$\kappa_{da} = \frac{4n}{1 + 2n + n^2 + \kappa^2} \approx \frac{4\sqrt{\varepsilon_r}}{1 + 2\sqrt{\varepsilon_r} + \varepsilon_r} = \frac{4\sqrt{\varepsilon_r}}{(1 + \sqrt{\varepsilon_r})^2}.$$

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.8), значение параметра $\varsigma = 2$ соответствует условию оптимального режима нагрева воды. Коэффициент поглощения, как и коэффициент отражения, выходит на такие же асимптотические значения при симметричном подводе электромагнитного излучения, как и в случае с односторонним подводом мощности излучения. При симметричном подводе мощности электромагнитного излучения, оптимальный нагрев плоского слоя (максимум $k_d(\varsigma)$) реализуется при значении параметра $\varsigma = 2$ и зависит ещё от температуры воды:

$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, максимум $k_d(\varsigma) \sim 0,6$;

$T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$, максимум $k_d(\varsigma) \sim 0,82$;

$T = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$, максимум $k_d(\varsigma) \sim 0,95$.

Аналогично проводится теоретический анализ изменения характеристик распространения электромагнитного излучения при постоянной температуре воды, находящейся в цилиндрической или сферической емкостях, расположенных в центре камеры микроволновой печи.

2.3. Нагрев плоского слоя воды при симметричном подводе мощности электромагнитного излучения

2.3.1. Математическая модель. Рассмотрим нагрев протяженного плоского слоя воды в микроволновой печи с симметричным подводом мощности микроволнового излучения вдоль оси x (рисунок 2.2). Это существенно упрощает решение уравнений магнитной гидродинамики (1.5)–(1.7) и анализ физических процессов, протекающих при микроволновом нагреве воды. Для этого определяем изменение температуры воды и характеристик электромагнитного поля при взаимодействии с водой (поглощение – диссипация мощности микроволнового излучения водой, отражение излучения от воды и прохождение излучения через слой воды). Стеклоянная емкость с водой расположена в центре микроволновой печи в поле плоской электромагнитной волны, распространяющейся вдоль оси x , с компонентами:

$$\vec{E}(0,0,E_z=E(x))\exp(i\omega t), \quad \vec{B}(0,B_y=B(x),0)\exp(i\omega t).$$

Предполагаем, что окружающая газовая среда неподвижна, а температура воды в стеклоянной емкости устанавливается за счет изменения баланса энергии между процессами диссипации мощности электромагнитного излучения в плоском слое воды и отводом тепла теплопроводностью между слоями воды и с поверхности стеклоянной емкости через окружающую газовую среду на охлаждаемые металлические стенки микроволновой печи.

Для моделирования физических процессов, протекающих при нагреве воды микроволновым излучением, воспользуемся уравнением баланса энергии и приведенным волновым уравнением (1.5)–(1.7). Вследствие симметричного подвода мощности электромагнитного излучения к емкости с водой (рисунок 2.2), размеры расчетной области в микроволновой печи $[-R \leq x \leq R]$ можно условно разбить на две характерные области:

1. Область, занятая водой. Теплофизические и электромагнитные характеристики плоского слоя воды при микроволновом нагреве в области $[t \geq 0, 0 \leq x \leq R_n]$ находятся из совместного решения уравнения баланса энергии (1.5) и приведенного волнового уравнения (2.1), которые для одномерного плоского слоя приводятся к следующему виду:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0. \quad (2.7)$$

Для случая гармонических электромагнитных полей индукция магнитного поля определяется из решения уравнения Максвелла (закон Фарадея) (1.5):

$$B = \frac{1}{i\omega} \frac{dE}{dx}.$$

2. Область, занятая стеклоянными стенками и воздухом. Теплофизические и электромагнитные характеристики стеклоянной емкости и окружающей ее неподвижной газовой средой (воздухом) в камере микроволновой печи в областях $[t \geq 0, R_n \leq x \leq R]$ находятся из решения уравнения баланса энергии и приведенного волнового уравнения:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k^2 E = 0. \quad (2.8)$$

3. Коэффициенты переноса и теплофизические параметры для воды, стекла и воздуха задаются из табличных данных (таблицы 1.1–1.3). Электромагнитные коэффициенты уравнений для воды берутся из таблицы 1.1, а для стекла и газа полагаются постоянными:

$$k^2 = k_0^2 \varepsilon_k = k_0^2 \varepsilon_r, \quad \sigma = 0, \quad \varepsilon_i = 0, \quad \varepsilon_k = \varepsilon_r = \text{const.}$$

4. Начальные и граничные условия. В начальный момент времени задается подводимая магнетроном в микроволновой печи к воде мощность электромагнитного излучения $Q_n(0) = Q_0$. Начальная температура воды, температура стеклянных стенок емкости и воздуха в микроволновой печи полагается постоянной. На оси выполняются условия симметрии, где температура и напряженность электрического поля достигают своих экстремальных значений. Внутренняя поверхность стенок камеры микроволновой печи поддерживается при постоянной заданной температуре путем внешнего охлаждения.

Тогда для решения уравнений (2.7), (2.8) начальные и граничные запишутся в таком виде:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq R: T(x, 0) = T_R;$$

$$t \geq 0, x = 0: \partial T / \partial x = 0, \quad \partial E / \partial x = 0;$$

$$x = R: T = T_R, \quad E = E_R(t).$$

На контактных поверхностях (вода – стеклянная емкость – газ) выполняется непрерывность температуры, тепловых потоков, напряженностей электрических и магнитных полей:

$$x = R_c: T = T_c, \quad (\partial T / \partial x) = (\partial T / \partial x)_c, \quad E = E_c, \quad H = H_c.$$

Это справедливо для относительно «тонких» стенок стеклянной емкости. Для относительно «толстых» стенок проводится решение уравнений (2.8) внутри стеклянных стенок. При этом дополнительно учитываются непрерывность изменения температуры, тепловых потоков и электромагнитных полей на контактных поверхностях различных сред: вода – стекло (индекс c) – воздух (индекс r):

$$x = R_c: T = T_c, \quad (\partial T / \partial x) = (\partial T / \partial x)_c, \quad E = E_c, \quad H = H_c.$$

$$x = R_c + \delta_0: T_c = T_r, \quad (\partial T / \partial x)_c = (\partial T / \partial x)_r, \quad E_c = E_r, \quad H_c = H_r.$$

5. Общее решение волнового уравнения. Решение приведенного волнового уравнения (2.7) в области изменения аргументов $[t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq R]$ (рисунок 2.2, области I, II) запишется в таком виде:

$$E(x, t) = E_0(t) \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq R_c;$$

$$E(x, t) = A(t) \exp(ik_0 x) + B(t) \exp(-ik_0 x), \quad R_c \leq x \leq R, \quad (2.9)$$

где $E_0(t)$ – напряженность электрического поля в центре плоского слоя; $A(t)$, $B(t)$ – амплитуды подводимой и отраженной электромагнитных плоских волн. Функция $\phi(x)$ находится в результате численного решения волнового уравнения (2.7), по методике, приведенной в приложении (1). Коэффициенты $A(t)$ и $B(t)$ в уравнении (2.9) определяются путем сшивки численного решения приведенного волнового уравнения $\phi(x)$ при $x \leq R_c$ и аналитического решения (2.9) при $x \geq R_c$ из условия непрерывности электрического поля на границе раздела двух сред $x = R_c$ (вода – воздух).

Значения напряженности электрического поля на оси симметрии и на охлаждаемых металлических стенках камеры микроволновой печи ($E_0(t)$, $E_R(t)$) выражаются через заданную подводимую мощность электромагнитного излучения $Q_n(t)$ (вектор Умова–Пойнтинга):

$$Q_n(t) = (E_R H_R^* + E_R^* H_R) / 2\mu_0 = |A(t)|^2 / c\mu_0. \quad (2.10)$$

Путем ряда математических преобразований, значения коэффициентов $A(t)$, $B(t)$, $E_0(t)$, $E_R(t)$ определяются из следующих выражений:

$$A(t) = [c\mu_0 Q_n(t)]^{0.5}, B(t) = A(t) \exp(2ik_0 R_c) f_1(R_c) / f_2(R_c),$$

$$E_0 = 2A(t) \exp(ik_0 R_c) f_1(R_c) / k_0 / f_2(R_c), f_1(x) = k_0 \phi(x) + i\phi'(x), f_2(x) = f_1^*(x),$$

$$E_R(t) = A(t) [\exp(ik_0 R) + \exp(i2k_0 R - ik_0 R_c) f_1(R_c) / f_2(R_c)].$$

Коэффициенты отражения и диссипации электромагнитного излучения находятся по следующим формулам:

$$k_r(t) = |B(t)|^2 / |A(t)|^2 = |f_1(R_c)|^2 / |f_2(R_c)|^2, k_d(t) = 1 - k_r(t). \quad (2.11)$$

2.3.2. Результаты расчета нагрева плоского слоя воды. На основе решения уравнений (2.7)–(2.11) проводится расчет нагрева плоского слоя воды с симметричным подводом мощности электромагнитного поля в микроволновой печи (рисунок 2.2).

Исходные данные. Задаются размеры камеры микроволновой печи $2R = 10$ см и температура охлаждаемых металлических стенок $T_R = 20$ °C. Вода находится в центре камеры микроволновой печи в плоской емкости толщиной $d = 2R_c = 4$ см с тонкими стеклянными стенками. Камера заполнена неподвижным газом (воздухом) при атмосферном давлении. Микроволновой нагрев воды проводится от начального значения температуры, равной температуре окружающей среды – воздуха $T(x, 0) = T_R = 20$ °C, до температуры кипения $T(x, t) = T_K = 100$ °C в какой-либо точке плоского слоя воды [$0 \leq x \leq R_c$] (рисунок 2.2). Циклическая частота электромагнитного излучения полагается равной $f = 3$ ГГц. Подводимая к воде мощность электромагнитного поля задается в зависимости от времени следующим образом:

$$t < 0: Q_n(t) = 0,$$

$$t \geq 0: Q_n(t) = Q_0 = 10 \text{ Вт/см}^2. \quad (2.12)$$

Влияние изменения $Q_n(t)$ от времени на характеристики нагрева воды в микроволновой печи рассматриваются ниже. Теплофизические, переносные и электромагнитные

коэффициенты уравнений (2.7), (2.8), (2.9) для воды, стекла и воздуха ($C_p, \lambda, \rho, \sigma, \varepsilon_r, \varepsilon_i$) при атмосферном давлении берутся из данных таблиц 1.1–1.3.

Физика микроволнового нагрева воды. Как следует из результатов расчета (рисунок 2.9), при нагреве плоского слоя воды с симметричным подводом мощности микроволнового излучения вследствие суперпозиции подводимой и отраженной электромагнитных волн в стеклянной емкости с водой, устанавливается стоячая волна с максимумом амплитуды в центре плоского слоя. Пучности электромагнитной волны распределены по всему объему жидкости и являются фактическими источниками тепла в уравнении энергии. Поскольку в пучностях происходит основная диссипация мощности электромагнитного поля, то это приводит к интенсивному выделению «джоулевого тепла» в уравнении баланса энергии ($Q_E = \sigma |E|^2/2$). Нагрев воды в данных точках (объемах) ведёт к образованию градиента температуры и возникновению, благодаря теплопроводности, кондуктивных потоков тепла, направленных из области источников в сторону узлов электрического поля и стенкам стеклянной емкости. Распределение температуры вдоль оси x имеет периодический характер, обусловленный интенсивным выделением тепла в пучностях напряженности электрического поля и «выравниванием» температуры теплопроводностью по сечению плоского слоя.

В начальные моменты времени нагрева воды для данной частоты электромагнитного поля, максимум температуры воды реализуется вблизи стенок стеклянной емкости. В течение первых пяти минут температура воды возрастает практически пропорционально времени и достигает значения $\sim 60^\circ\text{C}$. Далее, всего за $t = 1$ минуту, происходит быстрый, как бы резонансный, нагрев воды до температуры $T_0 \sim 90^\circ\text{C}$, а в дальнейшем, интенсивность нагрева воды, вплоть до температуры кипения, заметно снижается. В конце нагрева воды вследствие сдвига фазы $|E(x, t)|$, температура воды смещается ближе к поверхности стенок, где и начинается процесс кипения: $T(x \approx R_c, t_k) \approx T_c(t_k) = T_k = 100^\circ\text{C}$ (рисунок 2.9). Следует отметить, что уменьшение температуры воды от поверхности стеклянных стенок в направлении к оси симметрии обусловлена экранированием электромагнитного излучения слоем воды, подобно скин-слою. В течение времени нагрева, благодаря действию теплопроводности, потоки тепла, направленные от поверхности стеклянных стенок к оси симметрии, нагревают приосевые области воды.

Изменение температуры по сечению плоского слоя воды хорошо объясняется зависимостью от времени мощности диссипации электромагнитного излучения (рисунок 2.9). Видно, что в течение первых трех минут коэффициент $K_d(t)$ и диссипируемая мощность $Q_d(t) = K_d(t)Q_0$ незначительно уменьшаются ($\sim 5\%$) по отношению к своим первоначальным значениям ($K_d(0) = 0,3$, $Q_d(0) = 30 \text{ кВт/м}^2$). Затем в течение следующих трех минут наблюдается быстрый рост ($\sim 300\%$) до максимальных величин (при $t = 340 \text{ с}$: $K_d(t) \sim 0,9$; $Q_d(t) \sim 90 \text{ кВт/м}^2$), а далее, за одну последнюю минуту нагрева воды, происходит интенсивное, более, чем в два раза, уменьшение. Время нагрева воды, соответствующее температуре кипения $T(x, t_k) = T_k = 100^\circ\text{C}$, составляет $t_k = 375 \text{ с}$. Процесс кипения воды начинается вблизи стеклянных стенок ($x \approx R_c$), при котором $K_d(t_k) \sim 0,4$; $Q_d(t_k) \sim 40 \text{ кВт/м}^2$. Причем коэффициент отражения $K_r(t)$ изменяется противоположно по отношению к коэффициенту диссипации мощности электромагнитного излучения – $K_d(t)$ (рисунок 2.9).

Распределение модуля напряженности электрического поля по сечению камеры микроволновой печи имеет сложную периодическую структуру, состоящую из пяти пучностей и четырех узлов (рисунок 2.9). В воздухе амплитуда $|E(x, t)|$ в пять раз больше, чем

Рисунок 2.9 – Распределение характеристик плоского слоя воды в стеклянной емкости, воздуха и микроволнового излучения с симметричным подводом мощности электромагнитного поля: $f=3$ ГГц, $2R_c=4$ см, $Q_n=10$ Вт/см², для различных промежутков времени с шагом Δt

в воде и уменьшается в направлении к оси симметрии. С течением времени, начиная от значения $t = 0$, модуль напряженности электрического поля возрастает в слое воды практически в четыре раза, тогда как в воздухе амплитуда $|E(x,t)|$ незначительно уменьшается и смещается по фазе. Изменения $E_0(t)$, $E_c(t)$ от времени качественно повторяют зависимость значений: $K_d(t)$, $Q_d(t)$. Характер распределения $|E(x,t)|$ определяет фактическое изменение температуры по сечению плоского слоя в микроволновой печи (рисунок 2.9).

В воздухе, вследствие большего значения коэффициента теплопроводности $\alpha = \lambda/\rho C_p$ (таблица 1.3), реализуется монотонное линейное увеличение температуры от холодных металлических стенок камеры микроволновой печи $T_R = 20$ °С по направлению к стеклянным стенкам емкости с водой.

2.4. Анализ микроволнового нагрева плоского слоя воды

На основе разработанной математической модели (п. 2.3) проводится теоретический анализ изменения физических характеристик нагрева воды с симметричным подводом мощности микроволнового излучения в зависимости от изменения подводимой мощности и частоты электромагнитного поля, размеров плоского слоя и теплопроводности воды.

2.4.1. Влияние коэффициента теплопроводности. Расчет влияния теплопроводности на нагрев воды микроволновым излучением проводится при тех же условиях, что и в предыдущем случае (п. 2.3). Роль кондуктивных потоков тепла определяется в зависимости от изменения значения коэффициента теплопроводности воды путем его уменьшения в 100 раз и увеличения в 10 раз по отношению к табличным значениям (таблица 1.1). Для этого коэффициент теплопроводности воды представим в следующем виде:

$$\lambda = \lambda(T) = k_\lambda \lambda_{табл}(T),$$

где коэффициент k_λ изменяется следующим образом: $k_\lambda = 0,01, 1, 10$.

Как следует из результатов (рисунки 2.10–2.12), с уменьшением коэффициента теплопроводности воды в 100 раз картина распределения температуры $T(x,t)$ по сечению плоского слоя становится с четко выраженными периодическими изменениями температуры ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$), причем амплитуда колебаний изменения или перепада температуры доходит до значений $\Delta T \sim 50$ °С. Перепад температур возрастает с увеличением времени нагрева и смещается по направлению x от стеклянных стенок емкости к оси симметрии. Изменение $T(x,t)$ практически совпадает с характером распределения вдоль оси x модуля напряженности электрического поля, поскольку основным механизмом микроволнового нагрева воды в данном случае являются источники выделения «джоулева тепла» в уравнении баланса энергии ($Q_E = \sigma |E|^2/2$). Поэтому максимум температуры воды наблюдается в областях пучности микроволнового излучения. Амплитуды значений $|E(x,t)|$ в пучностях и узлах возрастают от оси симметрии к стеклянным стенкам, т. е. наблюдается слабое экранирование электромагнитного излучения слоем воды.

С увеличением коэффициента теплопроводности ($k_\lambda = 10$), роль кондуктивных потоков тепла становится определяющей в формировании распределения температуры по сечению плоского слоя. Теплопроводность воды способствует интенсивному «выравниванию» температуры по сечению плоского слоя: отводит тепло от областей пучности электромагнитного поля и увеличивает ее в узлах $|E(x,t)|$. Из-за экранирования электромагнитного излучения слоем воды, реализуется близкое к «линейному» изменению (уменьшению)

Рисунок 2.10 – Распределение температуры плоского слоя воды и воздуха для различных промежутков времени с шагом Δt при следующих значениях коэффициента: $k_\lambda = 0.01$ (верхний ряд), $k_\lambda = 1$ (средний), $k_\lambda = 10$ (нижний): $f=3 \text{ ГГц}$, $2R_c=4 \text{ см}$, $Q_n=10 \text{ Вт/см}^2$

Рисунок 2.11 – Изменение температуры и электромагнитных характеристик нагрева плоского слоя воды при различных значениях коэффициента теплопроводности:
 $f = 3 \text{ Гц}$, $2R_c = 4 \text{ см}$, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$

Рисунок 2.12 – Изменение напряженности электрического поля плоского слоя воды в зависимости от коэффициента теплопроводности: $k_\lambda = 0,01$ (верхний ряд), 1 (средний), 10 (нижний); $f = 3 \text{ ГГц}$, $2R_c = 4 \text{ см}$, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$; $t = 0$ (пунктирная линия), $t = t_k$ (сплошная)

профиля $T(x,t)$ от стеклянных стенок емкости к оси симметрии. Причем наклон профиля температуры уменьшается по мере прогрева плоского слоя воды микроволновым излучением. В конечном итоге, в момент закипания воды при $t = t_k$, наблюдается практически постоянное распределение температуры по сечению плоского слоя (рисунок 2.10).

Для коэффициента $k_\lambda = 10$ время нагрева воды микроволновым излучением до температуры кипения возрастает, по сравнению с вариантами при $k_\lambda = 0,01$ и 1 (таблица 2.1). Это связано с тем, что с течением времени (для значений $t > 10$ с) происходит постепенное изменение распределения $T(x,t)$ от профиля с периодическими колебаниями, реализуемые в начальные моменты времени нагрева, к практически постоянному распределению температуры по сечению плоского слоя в последующие моменты.

Несмотря на большие отличия в значениях коэффициента теплопроводности ($k_\lambda = 0,01, 1, 10$), в течение первых минут характер нагрева воды в микроволновой печи практически не изменяется и значения E_ρ, E_c, K_d, Q_d остаются близкими между собой. Прослеживается как бы «инертность» в действии кондуктивного теплопереноса и «интенсивная» роль электромагнитного механизма нагрева воды (рисунок 2.6). Влияние теплопроводности начинает проявляться для моментов времени $t > 3$ минут нагрева воды, причем для случаев ($k_\lambda = 1, 10$) их изменения и далее остаются близкими. Можно предположить, что с увеличением коэффициента теплопроводности $k_\lambda > 1$ скорость переноса тепла теплопроводностью по сечению плоского слоя воды становится соизмеримой со скоростью микроволнового механизма нагрева.

В микроволновой печи распределение температуры воздуха, практически для всех вариантов изменения теплопроводности, «линейно» уменьшается от значения температуры T_c на поверхности стеклянных стенок емкости до граничного значения T_R – на охлаждаемых стенках камеры.

2.4.2. Влияние толщины плоского слоя воды. Проводится расчет характеристик нагрева воды, помещенной в стеклянную емкость в микроволновой печи, в зависимости

Таблица 2.1 – Время микроволнового нагрева плоского слоя воды до температуры кипения в зависимости от параметров: $f, R_c, Q_\rho, k_\lambda$

$f, \text{ГГц}$	$R_c, \text{см}$	$Q_\rho, \text{Вт/см}^2$	k_λ	$t_k, \text{с}$
3	1	10	1	665
3	1	10	0,01	447
3	1	10	10	664
3	2	10	1	372
3	2	10	0,01	287
3	2	10	10	394
3	4	10	1	560
3	4	10	0,01	466
3	4	10	10	705
0,3	2	10	1	3374
1	2	10	1	198
3	2	10	1	372
10	2	10	1	231
3	2	1	1	3600
3	2	10	1	372
3	2	100	1	31

от толщины плоского слоя воды: $d = 2R_c = 2, 4, 8$ см. Остальные исходные данные берутся такими же, как и в п. 2.3.

Как следует из результатов (рисунки 2.13–2.15), при микроволновом нагреве воды, с изменением толщины плоского слоя, качественно изменяются распределения практически всех характеристик. Например, с уменьшением размеров плоского слоя воды в два раза ($d = 2$ см) по сравнению с $d = 4$ см (рисунок 2.4), коэффициент диссипации мощности электромагнитного излучения снижается в течение времени практически экспоненциально от начального значения $K_d(0) = 0,28$ до $K_d(t) = 0,06$ (рисунок 2.14). Подобным образом ведет себя распределение диссипируемой мощности потока излучения $Q_d(t)$, а коэффициент отражения электромагнитной волны наоборот, возрастает. С увеличением размеров плоского слоя воды в два раза ($d = 8$ см), зависимость коэффициента $K_d(t)$, в начале нагрева воды, увеличивается от 0,38 до 0,405 ($t \sim 3$ мин), затем уменьшается практически до 0,3 ($t \sim 6,6$ мин), а далее начинает быстро расти до значения 0,68 ($t \sim 9,3$ мин).

Для толщины плоского слоя воды $d = 2$ см температура максимальна в двух точках пучности напряженности электрического поля: $x = 0$, $x = R_c/2$, но минимальна вблизи узлов $|E(x,t)|$ при $x = R_c/4$, $x = R_c$ (рисунки 2.13 и 2.15). Наблюдается слабое «экранирование» электромагнитного излучения слоем воды, которое приводит к уменьшению $|E(x,t)|$ и, соответственно, температуры в направлении к оси симметрии (рисунок 2.15). С увеличением времени нагрева, теплопроводность (кондуктивный поток тепла) способствует выравниванию колебаний в распределении температуры воды по сечению плоского слоя и для $t > 5$ мин профиль $T(x,t)$ становится практически постоянным вдоль оси x ($d = 2$ см, рисунок 2.13). Это дает возможность применить методику однородного распределения коэффициентов по сечению плоского слоя воды для оценки характеристик воды при микроволновом нагреве, развитую в работе [23] при расчетах микроволнового нагрева керамических материалов.

С увеличением толщины плоского слоя воды от $d = 2$ до 4 см и тем более до 8 см, качественный характер распределения температуры по сечению плоского слоя с течением времени $T(x,t)$ не изменяется. Более заметным становится эффект «экранирования» электромагнитного поля слоем воды с реализацией максимального значения температуры вблизи стенок стеклянной емкости у границы $x \approx R_c$ (вода – стеклянная емкость). Амплитуда напряженности электрического поля увеличивается с ростом толщины плоского слоя, достигает максимума при $d = 4$ см, а затем вновь уменьшается.

С увеличением толщины плоского слоя в первые минуты нагрева воды, возрастает диссипация мощности электромагнитного поля. По мере нагрева воды ($t > 5$ мин) для $d = 4$ см наблюдается резкое (практически резонансное) увеличение $Q_d(t)$ (рисунок 2.14), а для $d = 8$ см подобная картина реализуется при $t > 9$ мин. Для «тонких» слоев воды ($d = 2$ см) происходит постепенное уменьшение диссипации мощности электромагнитного излучения.

При толщине плоского слоя $d = 4$ см наблюдается минимум времени нагрева воды от начальной температуры до её кипения, которое составляет $t_k = 372$ с. С уменьшением толщины плоского слоя $d = 2$ см, время кипения воды возрастает до $t_k = 665$ с. То же самое происходит с увеличением толщины плоского слоя воды: при $d = 8$ см время нагрева составляет $t_k = 560$ с (таблица 2.1). Это позволяет сделать вывод, что электромагнитное излучение с трудом нагревает относительно «тонкие» и относительно «толстые» слои воды. В первом случае микроволновое излучение как бы «свободно» проходит сквозь тонкий

слой воды ($k_r > 0,7$) и нет заметной диссипации мощности электромагнитного поля. По мере нагрева воды напряженность электрического поля растет от 1,5 до 1,75 кВ/м. Во втором случае микроволновое излучение с трудом нагревает относительно «толстые» слои воды, так как электромагнитные волны интенсивно поглощаются периферийными слоями воды у стенок стеклянной емкости и не достигают в полной мере приосевых областей. Заметное экранирование относительно «толстым» плоским слоем воды электромагнитного излучения ($d = 8$ см) приводит к тому, что осевое значение напряженности электрического поля возрастает в четыре раза от 0,5 до 2 кВ/м. С увеличением толщины плоского слоя происходит сдвиг фазы и положения минимумов $|E(x,t)|$ в направлении к оси симметрии.

2.4.3. Влияние частоты электромагнитного поля. Проводится расчет характеристик нагрева плоского слоя воды в микроволновой печи в зависимости от изменения частоты электромагнитного излучения: $f = 0,3, 1, 3, 10$ ГГц. За основу берутся исходные данные п. 2.3. Влияние частоты электромагнитного излучения на нагрев плоского слоя воды устанавливается:

- из решения волнового уравнения (2.4) при определении напряженности электрического поля с учетом изменения комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon_k(\omega, T)$ (таблица 1.1, рисунок 1.2);
- из решения уравнения энергии при вычислении распределения температуры с учетом выделения тепла в источниках диссипации мощности электромагнитного излучения: $Q_E = \sigma |E^2|/2$.

Как показали результаты расчета (рисунки 2.16–2.18), при частоте электромагнитного поля $f = 0,3$ ГГц отсутствует какое-либо экранирование микроволнового излучения плоским слоем воды. Происходит длительный микроволновой нагрев воды до температуры кипения ($t_k = 3374$ с) с реализацией в начале нагрева «параболического» профиля температуры по сечению плоского слоя, а в конце времени нагрева – для $t > 70$ с, практически «линейного» распределения $T(x,t)$ (рисунок 2.16). Это объясняется тем, что длина волны электромагнитного поля в воздухе равна 100 см, что намного превышает толщину плоского слоя воды и вода в микроволновой печи находится практически в постоянном осциллирующем электрическом поле.

С увеличением частоты электромагнитного поля ($f = 1$ ГГц) формируется профиль температуры с максимумом в центре и на периферии плоского слоя при $x = 0$ и $x = R_c$ и минимумом при $x = R_c/2$. Это соответствует характеру распределения $|E(x,t)|^2$ по оси x . Происходит интенсивный (резонансный) нагрев плоского слоя воды за время $t_k = 198$ с и вода закипает вблизи стеклянных стенок. За данный промежуток времени кондуктивный поток не успевает полностью отвести тепло от нагретого плоского слоя воды приосевой области и стеклянных стенок в область с минимальным значением температуры при $x \approx R_c/2$. Начинает проявляться эффект экранирования электромагнитного излучения слоем воды.

При частоте $f = 3$ ГГц наблюдается появление периодичности в распределении температуры $T(x,t)$ (рисунок 2.16) и заметное её уменьшение в соответствии с изменением $|E(x,t)|$, в направлении к оси симметрии. Время нагрева воды микроволновым излучением до температуры кипения возрастает почти в два раза ($t_k = 372$ с) по сравнению с предыдущим случаем. Для $t > 5$ минут реализуется «резонансный» нагрев плоского слоя воды, как отмечалось ранее для частоты $f = 1$ ГГц.

Рисунок 2.13 – Зависимость изменения температуры в микроволновой печи с симметричным подводом мощности электромагнитного поля от толщины плоского слоя воды: $d = 2$ (верхний ряд), 4 (средний), 8 (нижний) см: $f = 3 \text{ ГГц}$, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$

Рисунок 2.14 – Зависимость изменения характеристик воды и электромагнитного излучения в микроволновой печи с симметричным подводом мощности электромагнитного поля от толщины плоского слоя: $d = 2$ (пунктирная линия), 4 (сплошная), 8 (штриховая) см: $f = 3 \text{ ГГц}$, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$

Рисунок 2.15 – Распределение напряженности электрического поля с симметричным подводом мощности микроволнового излучения в зависимости от толщины плоского слоя воды: $d = 2$ (верхний ряд), 4 (средний), 8 (нижний) см: $f = 3$ ГГц; $Q_n = 10$ Вт/см², пунктир при $t = 0$, сплошная линия при $t = t_k$

Рисунок 2.16 – Распределение температуры по сечению плоского слоя воды и воздуха в зависимости от частоты электромагнитного поля: $f = 0,3$ (первая верхняя строка); 1 (вторая); 3 (третья); 10 (четвертая) ГГц; $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $d = 4 \text{ см}$

Рисунок 2.17 – Зависимость характеристик плоского слоя воды и микроволнового излучения от изменения частоты электромагнитного поля: $f = 1$ (пунктирная линия), $f = 3$ (сплошная), $f = 10$ (штрих-пунктирная) ГГц, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $d = 4 \text{ см}$

Рисунок 2.18 – Распределение напряженности электрического поля по сечению микроволновой печи в зависимости от частоты электромагнитного поля: $f = 0,3$ (верхний ряд), 3 (средний), 10 (нижний) ГГц, $Q_n = 10 \text{ Вм/см}^2$, $d = 4 \text{ см}$, пунктирная линия $t = 0$, сплошная $t = t_k$

Для случая больших частот ($f = 10 \text{ ГГц}$) длина электромагнитной волны в воздухе равна 3 см , что соизмеримо с толщиной плоского слоя воды. В этом случае воздействие электромагнитного поля не приводит к заметным периодическим изменениям распределения температуры воды вдоль x , как и для «малых» частот $f = 1$ и 3 ГГц . Для частоты $f = 10 \text{ ГГц}$ это связано с другим механизмом воздействия микроволнового излучения на нагрев воды: заметным «экранированием» плоским слоем воды электромагнитного излучения (рисунок 2.16). В результате этого уменьшается амплитуда напряженности электрического поля (рисунок 2.18). По-видимому, определенную роль играет и теплопроводность воды, а точнее – ее кондуктивные потоки тепла. Время нагрева плоского слоя воды уменьшается по сравнению с предыдущим случаем и составляет $t_k = 237 \text{ с}$. Температура воды достигает температуры кипения практически у границы стеклянной емкости плоского слоя воды при $x \approx R_c$, тогда как на оси симметрии за это время она нагревается всего до 40°C .

С изменением частоты электромагнитного поля качественно меняется характер распределения напряженности электрического поля в микроволновой печи (рисунок 2.18). Для малых частот, например, $f = 0,3 \text{ ГГц}$ реализуется один максимум $|E(x,t)|$ на оси симметрии, и нет четкого перехода модуля напряженности электрического поля на границе (газовая среда – вода). Для частот $f \geq 1 \text{ ГГц}$ в воде наблюдается система стоячих волн, амплитуда которых уменьшается с увеличением частоты электромагнитного поля (рисунок 2.18).

2.4.4. Изменение мощности электромагнитного поля. Проводится расчет характеристик нагрева плоского слоя воды в зависимости от изменения мощности электромагнитного излучения: $Q_n = 1, 10, 100 \text{ Вт/см}^2$. За основу берутся исходные данные, что и в п. 2.3.

Как следует из результатов (рисунки 2.19–2.21), при малых значениях подводимой мощности электромагнитного поля ($Q_n = 1 \text{ Вт/см}^2$) происходит медленный нагрев воды ($t_k = 3600 \text{ с}$) с реализацией однородного распределения температуры по сечению плоского слоя. В этом случае теплопроводность успевает перераспределить тепло, выделяемое в пучностях электрического поля $Q = \sigma|E^2|/2$, и сформировать практически постоянный по сечению плоского слоя воды профиль температуры: $T(x,t) \approx T_0(t)$.

С увеличением подводимой мощности электромагнитного поля для значения $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, и тем более для $Q_n = 100 \text{ Вт/см}^2$, скорость переноса тепла теплопроводностью не успевает за интенсивностью изменения выделения «джоулева тепла» в источниках энергии электромагнитного поля (области максимумов $|E(x,t)|$). Поэтому по сечению плоского слоя воды в распределении температуры наблюдаются периодические колебания с максимумами температуры в пучностях электрического поля (область источников тепла $Q = \sigma|E^2|/2$) и минимумами температуры в узлах ($|E(x,t)| = 0$). Данные изменения температуры вдоль оси x усиливаются по мере увеличения мощности микроволнового излучения. Например, для $Q_n = 100 \text{ Вт/см}^2$ амплитуда колебаний в изменении температуры достигает $\sim 20^\circ\text{C}$.

Из-за изменения мощности электромагнитного излучения меняется значение напряженности электрического поля (рисунок 2.20). С ростом Q_n практически пропорционально снижается время нагрева воды ($Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $t_k = 372 \text{ с}$; $Q_n = 100 \text{ Вт/см}^2$, $t_k = 31 \text{ с}$) и увеличивается эффект экранирования слоем воды воздействия электромагнитного излучения на приосевые области. Это приводит к заметному уменьшению температуры от поверхности стеклянных стенок емкости к оси симметрии.

Рисунок 2.19 – Распределение температуры по сечению микроволновой печи в зависимости от подводимой мощности электромагнитного поля:
 $Q_n = 1$ (верхняя строка), 10 (средняя), 100 (нижняя) Вт/см^2 , $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$

Рисунок 2.20 – Зависимость характеристик нагрева плоского слоя воды и микроволнового излучения от подводимой мощности электромагнитного поля: $Q_n = 1$ (точечная линия), 10 (сплошная), 100 (пунктирная) Bm/cm^2 , $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$

Рисунок 2.21 – Распределение напряженности электрического поля по сечению микроволновой печи в зависимости от подводимой мощности электромагнитного поля:
 $Q_n = 1$ (верхняя строка), 10 (средняя), 100 (нижняя) Вт/см^2 , $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$,
 пунктирная линия $t = 0$, сплошная $t = t_k$

Интересная информация следует из анализа характеристик нагрева воды и микроволнового излучения ($T(x,t)$, Q_d/Q_n , k_r , k_d) в масштабах относительного изменения времени к времени нагрева воды до температуры кипения t/t_k . Для интервалов времени $0 \leq t/t_k \leq 0,7$ характеристики ($T(x,t)$, Q_d/Q_n , k_r , k_d) практически не изменяются с увеличением подводимой мощности электромагнитного поля (рисунок 2.20). Для значений времени $t/t_k \geq 0,7$ начинают сказываться нелинейные эффекты в распределениях $T(x,t)$, Q_d/Q_n , k_r , k_d . Как только температура плоского слоя воды становится выше 60°C , происходит интенсивное поглощение водой мощности микроволнового излучения ($k_r \rightarrow 0,1$, $k_d \rightarrow 0,9$). Для масштаба времени $t/t_k > 0,9$ наблюдается подобие «резонансного» нагрева излучением плоского слоя воды. Причем быстрее это происходит для мощности подводимого электромагнитного излучения $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, чем для $Q_n = 100 \text{ Вт/см}^2$ (см. рисунок 2.20).

2.5. Теплоизоляция стенок микроволновой печи и емкости с водой

В проводимых выше численных расчетах полагается, что за все время нагрева воды электромагнитным излучением на внутренней стенке камеры микроволновой печи поддерживается постоянная температура: $T_R(t) = \text{const}$. При работе микроволновой печи через её стенки существует теплообмен между окружающей газовой средой и нагреваемой водой. В результате чего часть энергии электромагнитного поля идет не только на нагрев воды, воздуха и всех конструкций микроволновой печи, но частично и на нагрев окружающей среды. Поскольку максимальная температура нагрева воды полагается равной температуре кипения ($T_k = 100^\circ\text{C}$), то, как показали приведенные ниже результаты расчета, данные потери тепла не оказывают заметного влияния на изменение характеристик воды и электромагнитного излучения в микроволновой печи.

2.5.1. «Адиабатические» стенки. Практический интерес представляет нагрев воды в камере микроволновой печи с теплоизолированными (адиабатическими) стенками, когда отсутствует теплообмен между стенками камеры и окружающей средой. «Адиабатические» стенки должны быть сделаны из особого материала, который не отводит тепло из микроволновой печи и теплопроводность $\lambda \approx 0$.

Для моделирования теплоизоляции рабочей камеры от воздействия внешней окружающей среды при решении системы уравнений (2.2)–(2.8), на внутренней поверхности стенок микроволновой печи задаются следующие граничные условия:

$$x = R : \partial T / \partial x = 0.$$

В процессе решения уравнения энергии определяется температура на границе поверхности стенок микроволновой печи при $x = R : T_R = T_R(t)$, которая изменяется с течением времени, в отличие от граничного условия (2.6), где $T_R(t) = \text{const}$.

2.5.2. Результаты расчета. Для оценки влияния «адиабатических» граничных условий на характеристики микроволнового нагрева плоского слоя воды проводится расчет при следующих исходных данных: $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$, и сравнение результатов расчета с данными, полученными в случае охлаждаемых стенок камеры микроволновой печи: $T_R(t) = 20^\circ\text{C}$ (см. п. 2.3).

Как следует из результатов (рисунок 2.22), температура воды плоского слоя практически не изменяется при задании различных граничных условий на внутренней поверхности охлаждаемых или теплоизолированных стенках камеры микроволновой печи. Тогда как распределение температуры воздуха, окружающего стеклянную емкость с водой и стенки микроволновой печи, существенно зависит от задания граничных условий.

Вследствие относительно большего значения коэффициента температуропроводности воздуха ($\alpha = \lambda / \rho C_p = 0,25 \text{ см}^2/\text{с}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) по сравнению с водой ($\alpha = 0.00145 \text{ см}^2/\text{с}$), на охлаждаемых стенках камеры наблюдается практически линейное повышение температуры газа в микроволновой печи, которое изменяется от температуры поверхности стекла T_c до граничного значения T_R на стенках камеры (рисунок 2.22). Данное распределение температуры можно аппроксимировать в виде следующей аналитической функции:

$$T(x, t) = (T_c - T_R)(1 - x/R)/(1 - R_c/R) + T_R.$$

Из данного выражения определяется поток тепла, переносимый теплопроводностью на охлаждаемые стенки камеры микроволновой печи:

$$q_R = -(\lambda_R \partial T / \partial x)_{x=R} = \lambda_R (T_c - T_R) / (R - R_c).$$

В результате численного расчета получено, что $q_R = 0,088 \text{ Вт/см}^2$. Данное значение практически совпадает с оценками по предложенной выше формуле и составляет незначительную величину (менее 1 %) от подводимой к воде мощности электромагнитного излучения. Это, по-видимому, объясняет несущественное влияние граничных условий на нагрев плоского слоя воды в микроволновой печи.

На внутренней стороне теплоизолированных стенок камеры микроволновой печи температура воздуха повышается в течение всего времени нагрева воды (рисунок 2.22) и стремится к однородному распределению $T(x, t) \rightarrow T_{\text{макс}} = \text{const}$. При достижении температуры кипения воды вблизи плоских стеклянных стенок ($t = t_k$, $T_k = 100 \text{ }^\circ\text{C}$), в камере микроволновой печи у теплоизолированных стенок температура воздуха достигает значения $T_{\text{макс}} = T_R(t_{\text{макс}}) \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.5.3. Теплоизоляция стенок стеклянной ёмкости. Для уменьшения времени нагрева воды (так же, как и времени счета на ЭВМ) можно исключить область, занимаемую газовой средой в микроволновой печи ($R_c \leq x \leq R$). Для этого необходимо поставить теплоизолированные (адиабатические) стенки непосредственно на границе стеклянной ёмкости и воздуха. В этом случае будут отсутствовать потоки тепла, переносимые теплопроводностью воды к стеклянным стенкам емкости, и от нагретой емкости с водой в окружающую газовую среду и на охлаждаемые стенки камеры микроволновой печи ($x = R_c : \partial T / \partial x = 0$).

Тогда динамика нагрева воды микроволновым излучением в стеклянной ёмкости с теплоизолированными стенками, от начального постоянного значения T_R , определяется достаточно простым уравнением баланса энергии:

$$\rho_c C_p \frac{dT_0}{dt} = \frac{\eta Q_i}{2R_c}, \quad t = 0 : T(x, 0) = T_R.$$

«Адиабатические стенки» должны быть сделаны из диэлектрического материала со следующими специфическими свойствами: $\lambda \approx 0$, $\varepsilon_r = \text{const}$, $\varepsilon_i \approx 0$, т. е. стенки практически не отводят тепло от емкости с водой в процессе нагрева и не оказывают влияния на

Рисунок 2.22 – Распределение температуры по сечению плоского слоя в микроволновой печи: с охлаждаемыми стенкам (верхний ряд), с теплоизолированными «адиабатическими» стенками (нижний ряд). Нижние графики: (слева) изменение температуры на внутренней стороне теплоизолированных стенок; (справа) зависимость времени нагрева от изменения толщины стенок стеклянной емкости: $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$

распространение электромагнитного излучения. Этот подход используется в технологии получения нитрида кремния [23] и показал свою эффективность для ускорения процесса микроволнового нагрева керамических материалов практически в два раза снижением энергетических затрат и тепловых потерь.

Для коэффициентов отражения и поглощения (ρ , η) электромагнитной мощности при взаимодействии с водой, приближение однородного распределения коэффициентов дает следующие зависимости от температуры в центре емкости (приложение п. 2):

$$\rho = \left| \frac{\cos kR_c - i\sqrt{\varepsilon_K} \sin kR_c}{\cos kR_c + i\sqrt{\varepsilon_K} \sin kR_c} \right|^2, \quad \eta = 1 - \rho.$$

Для прозрачной воды $tg\delta \ll 1$, $k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} tg\delta \ll 1$, коэффициент поглощения определяется следующим выражением:

$$\eta = \frac{2F}{1+F}, \quad F = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} \xi tg\delta (1 + \frac{\sin 2\xi}{2\xi})}{1 + (\varepsilon_r - 1) \sin^2 \xi}, \quad \xi = k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r}.$$

Зависимость $\eta(\xi)$ испытывает квазипериодические колебания резонансного характера с периодом, близким к π , а амплитуда колебаний практически линейно зависит от величины $k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} tg\delta$.

Рассмотрим следующие режимы микроволнового нагрева воды в стеклянной емкости:

1. Постоянная подводимая мощность электромагнитного излучения. Тогда из уравнения энергии определяется время нагрева воды до заданной температуры T_0 :

$$t(T_0) = \frac{2R_c}{Q_i} \int_{T_R}^{T_0} \frac{\rho_c C_p}{\eta} dT.$$

Из данного выражения видно, что время нагрева воды t_{max} до заданной температуры T_0 определяется прямо пропорционально толщине емкости с водой и обратно пропорционально подводимой мощности электромагнитного излучения.

2. Нагрев воды при заданной скорости линейного увеличения температуры:

$$T_0(t) = T_R + (T_m - T_R)t / t_m.$$

В этом случае из уравнения энергии находится временная зависимость подводимой мощности микроволнового излучения, обеспечивающая линейный рост температуры воды от времени через коэффициенты (ρ_c , C_p , η):

$$Q_i(t) = \frac{2R_c(T_m - T_R)}{t_m} \frac{\rho_c C_p}{\eta}.$$

2.6. Влияние толщины и материала стенок керамической емкости

Для оценки влияния на микроволновой нагрев воды толщины и материала керамической (диэлектрической) емкости, рассматриваются следующие керамические материалы: стекло, оксид алюминия (Al_2O_3), нитрид кремния (Si_3N_4), кремний (Si). Толщина стенок керамических материалов изменяется в интервале $\delta_0 = 0 \div 15$ мм. Для сравнения за основу берутся исходные данные, приведенные в п. 2.3: $Q_{\Pi} = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$, $T_R = 20^\circ\text{C}$. Коэффициенты керамических (диэлектрических) материалов задаются из таблицы 1.2.

2.6.1. Влияние толщины стеклянных стенок. Как следует из результатов (рисунки 2.22, 2.23), в начальные моменты времени толщина стеклянных стенок емкости практически не влияет на нагрев плоского слоя воды и изменение электромагнитных характеристик микроволнового излучения. Для стеклянных стенок толщиной $\delta_0 = 5$ мм характеристики нагрева воды начинают заметно изменяться для моментов времени $t > 3$ минут. Уменьшается, а к концу времени нагрева практически исчезает, «эффект экранирования» пристеночными слоями воды электромагнитного излучения. Максимум температуры нагрева воды реализуется не у поверхности стеклянных стенок, как это было для случая «тонких» стенок ($\delta_0 \approx 0$), а в нескольких точках пучностей $|E(x,t)|$ по сечению плоского слоя, в том числе и на оси симметрии (рисунок 2.23).

Если для $\delta_0 \approx 0$ температура воды у поверхности стекла всегда была выше температуры пристеночных областей воды ($T_c > T_\theta$), то для толщины стеклянных стенок $\delta_0 = 5$ мм отмечается обратное изменение – $T_c < T_\theta$ (рисунок 2.24). Это связано с тем, что часть тепловой энергии воды интенсивно отводится теплопроводностью стекла и идет на нагрев газа и стенок камеры микроволновой печи. Вследствие относительно высокого (практически в три раза) значения коэффициента температуропроводности стекла ($\alpha = 0,0045 \text{ см}^2/\text{с}$), по сравнению с водой ($\alpha = 0,00145 \text{ см}^2/\text{с}$), прогрев стеклянных стенок емкости от слоя «горячей» воды идет с большей скоростью, чем нагрев самой воды микроволновым излучением и максимум температуры воды смещается по сечению плоского слоя от поверхности стеклянных стенок в направлении к оси симметрии.

С другой стороны, несмотря на малые значения теплопроводности и плотности воздуха по отношению, например, к воде, коэффициент температуропроводности воздуха гораздо больше, чем у стекла, и тем более, чем у воды (см. выше п. 2.3 и таблицу 1.3). Поэтому прогрев газовой среды в камере микроволновой печи протекает весьма интенсивно, что хорошо пролеживается по распределению $T(x,t)$ (рисунок 2.23). Поскольку энергия электромагнитного поля идет на нагрев воды, стекла и окружающего газа, то время нагрева какой-либо области плоского слоя воды до температуры кипения происходит быстрее – $t_k = 346 \text{ с}$ для толщины стекла $\delta_0 = 5$ мм, по сравнению с тонкими стеклянными стенками емкости – $\delta_0 \approx 0$, $t_k = 372 \text{ с}$.

С ростом толщины стенок стеклянной емкости от $\delta_0 \approx 0$ до $\delta_0 = 5$ мм, увеличивается перепад температуры в пристеночном слое воды между её максимальным значением и температурой у поверхности стенок ($\Delta T = T_\kappa - T_c \approx 10^\circ\text{C}$). То же самое происходит и в слое стекла между значениями температуры на внутренней и внешней поверхностях стенок ($\Delta T = T_c - T_s \approx 10^\circ\text{C}$). Внутри стенок стеклянной емкости температура $T(x,t)$ уменьшается

Рисунок 2.23 – Распределения температуры (справа – теплоизолированные стенки камеры, слева – охлаждаемые), напряженности электрического поля (пунктирная линия $t = 0$, сплошная $t = t_k$) и характеристик нагрева воды в стеклянной емкости с толщиной стенок $d_o = 5 \text{ мм}$ в камере микроволновой печи с охлаждаемыми стенками

Рисунок 2.24 – Изменение температуры (сверху в вниз: оксид алюминия, нитрид кремния, кремний) и электромагнитных характеристик в зависимости от материала керамической емкости с водой: стекло – сплошная линия ($t_k = 346$ с), оксид алюминия – пунктирная ($t_k = 303$ с), нитрид кремния – точки ($t_k = 260$ с), кремний – штрих-пунктирная ($t_k = 275$ с) в микроволновой печи:
 $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$, $d_0 = 0,5 \text{ см}$

практически по экспоненциальному закону от температуры воды ($x = R_c: T = T_c$) до температуры воздуха в микроволновой печи ($x = R_c + \delta_0: T = T_s$).

Для «толстых» стеклянных стенок теплопроводность интенсивнее отводит тепло от «горячего» слоя воды, нагреваемого электромагнитным излучением. Поэтому максимум температуры смещается от поверхности стеклянных стенок к оси симметрии, что приводит к уменьшению тепловых потоков на стенки камеры микроволновой печи (см. рисунок 2.22).

При изменении толщины стеклянных стенок в интервале $[0 \leq \delta_0 \leq 2 \text{ мм}]$ полное время нагрева плоского слоя воды до температуры кипения хоть незначительно, но возрастает (рисунок 2.24). Объясняется это тем, что часть энергии электромагнитного поля все же идет на нагрев стеклянных стенок емкости. Для относительно «толстых» стеклянных стенок ($\delta_0 > 2,5 \text{ мм}$), время нагрева воды до температуры кипения уменьшается. В этом случае, по-видимому, при воздействии микроволнового излучения температура в какой-то области плоского слоя воды успевает быстрее достигнуть температуры кипения, чем произойдет полный прогрев воды и стеклянных стенок.

Для теплоизолированных «адиабатических» стенок камеры микроволновой печи изменение температуры газа у внутренней поверхности уменьшается с увеличением толщины плоского слоя стекла, так как часть энергии электромагнитного излучения, благодаря действию кондуктивного потока тепла, идет на их нагрев. Например, для «тонких» стеклянных стенок ($\delta_0 \approx 0$) температура газа у поверхности теплоизолированных стенок камеры микроволновой печи выше, чем для стенок емкости с толщиной стекла: $\delta_0 = 5 \text{ мм}$ (рисунок 2.22).

Для промежутков времени $t \leq 5$ минут температура стеклянных стенок выше, чем температура воды на оси симметрии. Это объясняется тем, что максимум температуры воды, вплоть до температуры кипения, реализуется у поверхности стекла (рисунок 2.22). Следует отметить, что для относительно «толстых» стеклянных стенок емкости температура на внешней поверхности стекла всегда меньше, чем на внутренней (рисунок 2.23).

2.6.2. Влияние материала керамической емкости. Как показали результаты численных расчетов (рисунок 2.24), материал, из которого изготовлена керамическая (диэлектрическая) емкость, существенно влияет на характеристики нагрева воды микроволновым излучением. Здесь большую роль играет коэффициент температуропроводности α керамических материалов (таблица 1.2). С увеличением коэффициента α , уменьшается коэффициент отражения электромагнитных волн, возрастает диссипация мощности микроволнового излучения и интенсивность нагрева воды, соответственно, повышаются $T(x, t)$ и $|E(x, t)|$ (таблица 1.2, рисунок 2.24). Чем выше коэффициент α , тем интенсивнее отводится тепло от слоя воды и увеличивается время нагрева воды до температуры кипения (рисунок 2.25).

Для керамической емкости из **оксида алюминия** коэффициент температуропроводности ($\alpha = 0,024 \text{ см}^2/\text{с}$) почти в 18 раз больше, чем у воды и в 6 раз выше, чем у стекла. Поэтому, для данного материала, практически в два раза, по сравнению с емкостью из стекла, увеличивается максимальный перепад температуры в слое нагретой воды ($\Delta T = T_\kappa - T_c \approx 20^\circ\text{C}$) и заметно снижаются температура и градиент тепла внутри керамического слоя ($\Delta T = T_c - T_s \approx 3^\circ\text{C}$).

Для емкости из других керамических материалов (**кремний** $\alpha = 0,858 \text{ см}^2/\text{с}$, **нитрид кремния** $\alpha = 4,58 \text{ см}^2/\text{с}$), наблюдается заметное влияние коэффициентов теплопроводности

Рисунок 2.25 – Распределение характеристик микроволнового нагрева плоского слоя воды и электромагнитного излучения: $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 8 \text{ см}$, ($t = 0$ – пунктирные линии, $t = t_k$ – сплошные линии), слева – модель однородных коэффициентов ($t_k = 935 \text{ с}$), справа – численный расчет ($t_k = 562 \text{ с}$)

и температуропроводности на характеристики нагрева воды в микроволновой печи. Это приводит к тому, что из-за больших значений α распределение температуры по сечению стенок керамических материалов практически постоянно ($T(x,t) = const, \Delta T \approx 0$). Кроме того, вследствие диссипации мощности электромагнитного излучения в керамическом материале, происходит нагрев самих стенок керамической емкости и увеличивается их температура. Отметим, что для емкости, изготовленной из кремния, наблюдается незначительное повышение температуры стенок (менее 5°C), тогда как для нитрида кремния прослеживается более заметный нагрев (рисунок 2.24). В этом случае качественно изменяется характер распределения температуры воды по сечению плоского слоя, так как происходит нагрев воды не только от диссипации электромагнитного излучения, но и нагрев её от «горячих» стенок керамической емкости (рисунок 2.24).

В начальные моменты времени ($t < 3 \text{ мин}$) при нагревании воды до температур $T_0(t) \sim 60^\circ\text{C}$ коэффициент отражения микроволнового излучения у стекла и керамических материалов возрастает, а далее при $t > 3 \text{ мин}$ $k_r(t)$ быстро уменьшается практически до нуля (рисунок 2.24). Причем, чем больше температуропроводности керамических материалов как, например, у нитрида кремния, тем быстрее коэффициент отражения $k_r(t) \rightarrow 0$, заметно увеличивается $|E_0(t)|$ и возрастает температура нагрева воды. В этих случаях реализуется эффективный режим нагрева воды, так как практически все электромагнитное излучение идет на повышение её температуры и этот процесс продолжается вплоть до температуры кипения.

2.7. Модель однородных коэффициентов

Как показали результаты численного расчета (п. 2.4), при определенных режимах нагрева воды микроволновым излучением устанавливается практически постоянное (однородное) распределение температуры по сечению плоского слоя. Это дает возможность применять упрощенные инженерные методы решения уравнения баланса энергии и приведенного волнового уравнения (2.4) для теоретического анализа микроволнового нагрева воды.

Метод однородных коэффициентов широко применяется для определения характеристик плазмы при численном решении уравнения энергии (канальная модель [39, 26]) и при теоретических расчетах микроволнового нагрева однородных керамических материалов [22, 23]. Совпадение результатов расчета и эксперимента [25–27] подтверждает адекватность данного приближения для описания реальных физических явлений.

2.7.1. Математическая модель. Для теоретического моделирования микроволнового нагрева воды на основе модели однородных коэффициентов полагается, что тепловые, переносные и электромагнитные значения коэффициентов воды и микроволнового излучения постоянны по сечению плоского слоя воды в микроволновой печи и определяются только изменениями осевой температуры:

$$0 \leq x \leq R_c : \sigma = \sigma_0(T_0), \lambda = \lambda_0(T_0), \rho = \rho_0(T_0), C_p = C_o(T_0),$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{k0} = \varepsilon_{ro} - i\varepsilon_{io}, \varepsilon_r = \varepsilon_{ro}(T_0), \varepsilon_i = \varepsilon_{io}(T_0), k_w^2 = k^2 = k_0^2 \varepsilon_{k0}. \quad (2.13)$$

В этом случае уравнение энергии и приведенное волновое уравнение (2.7) записываются в следующем виде:

$$\rho_0 C_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \sigma_0 |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k^2 E = 0. \quad (2.14)$$

Общим решением приведенного волнового уравнения (2.14) в каждой из областей I, II, III (рисунок 2.2) является суперпозиция падающих и отраженных электромагнитных плоских волн:

$$\begin{aligned} E_I &= A_1 \exp(ik_0 x) + B_1 \exp(-ik_0 x), \\ E_{II} &= A_2 \exp(ik_0 x) + B_2 \exp(-ik_0 x), \\ E_{III} &= A_3 \exp(ik_0 x) + B_3 \exp(-ik_0 x). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Связь между компонентами электромагнитных полей в каждой из сред устанавливается из условия непрерывности $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на границах раздела (см. п. 2.2), которая в матричной форме имеет вид:

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = M_{21} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} = M_{32} \cdot \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

Определение констант в выражениях (2.15) зависит от способа подвода мощности электромагнитного излучения к плоской стеклянной емкости с водой в микроволновой печи, которые будут рассмотрены ниже.

2.7.2. Симметричный подвод мощности микроволнового излучения. В этом случае распределение напряженности электрического поля вдоль оси x в плоском слое воды определяется из выражения (2.15). Учитывая условие симметрии в граничных условиях, получим:

$$A_2 = B_2 = E_0 / 2, \quad E(x) = E_0 \cos(kx). \quad (2.17)$$

Напряженность электрического поля в центре плоской стеклянной емкости с водой $E_0(t)$ (2.9) связана со временем нагрева воды через величину подводимой мощности микроволнового излучения следующей зависимостью:

$$E_0(t) = \sqrt{8\mu_0 \omega Q_i(t)} / \left| \cos(kR_c) + i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kR_c) \right|. \quad (2.18)$$

Из данного выражения видно, что на оси симметрии в воде образуется стоячая электромагнитная волна с пучностью в центре. Из соотношений: $A_2 = B_2$, $A_3 = B_1$, $B_3 = A_1$ находятся коэффициенты отражения и диссипации мощности электромагнитного излучения (см. (2.10):

$$k_r = \left| \frac{\cos(kd/2) - i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kd/2)}{\cos(kd/2) + i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kd/2)} \right|^2, \quad k_d = 1 - k_r. \quad (2.19)$$

2.7.3. Сравнение результатов расчета по различным моделям. Для оценки применимости разработанной модели однородных коэффициентов проводится сравнение

результатов расчета характеристик нагрева плоского слоя воды в микроволновой печи в рамках данной модели с результатами численных расчетов (п. 2.3). Используются адекватные начальные условия и исходные данные: $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 2,4,8 \text{ см}$, $T_R = 20^\circ\text{C}$.

Результаты сравнения показали (рисунок 2.25), что при реализации постоянного профиля температуры воды по сечению плоского слоя, например, для случая: $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 2 \text{ см}$ – характеристики плоского слоя воды, рассчитанные по модели однородных коэффициентов, практически совпадают с данными, полученными в рамках «строгой» численной модели (п. 2.3). Время микроволнового нагрева плоского слоя воды до температуры кипения незначительно отличается: $t_k = 662,5 \text{ с}$ (модель однородных коэффициентов), $t_k = 664,7 \text{ с}$ (численное решение).

В случаях интенсивного нагрева микроволновым излучением относительно «толстых» слоев воды $d = 4$ и, тем более 8 см , электромагнитные характеристики и время нагрева, полученные в рамках данных моделей, заметно отличаются от результатов «строгих» численных расчетов (рисунок 2.25). Тем не менее, распределение температуры по сечению плоского слоя воды $T(x, t)$ для данных моделей дает удовлетворительное согласие между собой.

Таким образом, при малых значениях подводимой мощности электромагнитного излучения и длительных процессах нагрева воды можно применять модель однородных коэффициентов для расчета нагрева воды микроволновым излучением.

2.8. Нагрев воды в поле «слабого» микроволнового излучения

Рассматривается случай, когда подводимая мощность электромагнитного излучения недостаточна для нагрева воды до температуры кипения: $T(Q_n) < T_k$. В течение длительного времени в микроволновой печи в стеклянной емкости находится «горячая» вода, нагретая до определенной температуры $T(Q_n) = T(x, t) = T(x) = \text{const}$. Устанавливается практически стационарный энергетический баланс: вся подводимая к воде мощность электромагнитного излучения полностью отводится теплопроводностью через стеклянную емкость и окружающий газ на охлаждаемые стенки микроволновой печи.

2.8.1. Модель воды при «слабом» микроволновом нагреве. Характеристики электромагнитного излучения и воды в плоской стеклянной емкости, находящейся в центре микроволновой печи в поле постоянного «слабого» электромагнитного излучения ($Q_n(t) = \text{const}$), определяются из решения квазистационарной системы уравнений и заданием следующих граничных условий:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2 = 0, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0. \quad (2.20)$$

$$x = 0: \quad T = T_0, \quad E = E_0; \quad x = R: \quad T = T_R, \quad E = E_R.$$

В качестве примера проводится решение системы уравнений (2.20) с симметричным подводом мощности электромагнитного поля в рамках модели однородных коэффициентов (п. 2.7). В этом случае удастся получить простые аналитические выражения, связывающие между собой тепловые характеристики воды и микроволнового излучения

в зависимости от внешних, управляющих процессом нагрева воды параметров: размеры емкости, подводимая мощность и частота электромагнитного поля.

1. Область нагретой воды. Решения уравнения баланса энергии и приведенного волнового уравнения (2.20) в области $[0 \leq x \leq R_c]$ при $k_\varphi = k, \varepsilon_\varepsilon, \sigma_i, \lambda_i = const$ запишутся в следующем виде:

$$E(x) = E_0 \cos(kx), \quad T(x) = T_0 - \frac{\sigma_0 E_0^2}{2\lambda_0} \Phi(x), \quad \Phi(x) = \frac{sh^2 bx}{4b^2} + \frac{\sin^2 ax}{4a^2}, \quad (2.21)$$

$$T_c = T_0 - \frac{S_c \Phi(R_c)}{\lambda_0 (R - R_c) \Phi'(R_c)}, \quad Q = \frac{Q_d}{1 - k_r}, \quad E_0^2 = \frac{2Q_d}{\sigma_0 \Phi'(R_c)}.$$

$$E_0 = \sqrt{8\mu_0 \omega Q_i} / \left| \cos(kR_c) + i\sqrt{\varepsilon_k} \sin(kR_c) \right|. \quad E_0 = E(0), T_0 = T(0).$$

2. Область газовой среды. При изменении аргумента x $[R_c \leq x \leq R_R]$ коэффициенты воздуха в уравнениях (2.20) соответственно равны: $\sigma = 0, k, \varepsilon, \lambda_R = const$. В воздухе происходит отвод тепла теплопроводностью от плоского слоя воды на охлаждаемые стенки микроволновой печи (рисунок 2.2). Уравнение энергии (2.20) и граничные условия выражаются через потенциал теплового потока:

$$S(T) = \int_{T_R}^T \lambda(T) dT, \quad d^2 S / dx^2 = 0; \quad x = R_c : S = S_c, \quad x = R : S = S_R. \quad (2.22)$$

Аналитическим решением уравнения (2.22) в воздухе является тепловая функция $S(x)$, соединяющая значение S_c на поверхности плоских стеклянных стенок емкости с S_R на стенках микроволновой печи:

$$S(x) = (S_c - S_R)(1 - x/R)/(1 - R_c/R) + S_R. \quad (2.23)$$

В точке $x = R_c$ определяется температура воды на поверхности стеклянной пластины T_c на основе выражения (2.21) и равенства значений кондуктивного потока, отводящего тепло теплопроводностью от плоского слоя нагретой воды в окружающую газовую среду и на стенки микроволновой печи:

$$x = R_c : q_c = -dS/dx = (S_c - S_R)/(R - R_c) = \lambda_0 (T_0 - T_c)/R_c.$$

Температура воды T_c находится через осевую температуру T_0 и зависимость от диссипированной мощности электромагнитного излучения:

$$T_c = T_0 - q_c R_c / \lambda_0, \quad Q_d = \lambda_0 (T_0 - T_c) / R_c.$$

Полученные выражения T_c, Q_d упрощают оценку характеристик квазистационарного состояния воды в поле постоянного электромагнитного излучения микроволновой печи, по сравнению с формулами (2.21).

2.8.2. Расчет характеристик нагрева воды. В качестве примера проводится расчет характеристик нагрева плоского слоя воды, находящейся под воздействием заданного постоянного «слабого» электромагнитного излучения (2.12) в микроволновой печи. Для

сравнения полученных результатов расчета, исходные данные берутся такими же, как и в п. 2.3.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.26), при реализации квазистационарного состояния нагрева воды в микроволновой печи наблюдается практически постоянное (монотонное) распределение температуры воды по сечению плоского слоя. Температура нагретой воды в микроволновой печи зависит от значения подводимой мощности электромагнитного поля: $T(x) \approx T_0(Q_n)$ (рисунок 2.26). С увеличением или уменьшением размеров плоского слоя воды профиль температуры практически не изменяется (рисунок 2.26). В воздухе, окружающем стеклянную емкость с водой, температура газа равномерно, можно сказать линейно, уменьшается от нагретых тонких стеклянных стенок плоского слоя до температуры охлаждаемых стенок камеры микроволновой печи (2.23).

При увеличении подводимой мощности электромагнитного излучения Q_n для нагрева плоского слоя воды до температуры кипения, наблюдается нелинейное изменение осевой температуры $T_0 = T_0(Q_n)$ (рисунок 2.26). Из данной зависимости видно (рисунок 2.26), что для $T_0 < 60^\circ\text{C}$ с увеличением подводимой мощности электромагнитного излучения температура воды повышается равномерно до определенного максимального значения (при $d = 4\text{ см}$ $T_{\text{max}} = 60^\circ\text{C}$, при $d = 8\text{ см}$ $T_{\text{max}} = 65^\circ\text{C}$), и имеет практически «параболическое» распределение по сечению плоского слоя. Далее в области температур $T_0 = 60\text{--}90^\circ\text{C}$ происходит нелинейное (резонансное) увеличение осевой температуры воды до определенного значения: при $d = 4$ и 8 см $T_{\text{min}} \approx 88^\circ\text{C}$. Затем при нагреве воды выше 90°C вновь наблюдается постепенное увеличение температуры T_0 . Максимум температуры T_{max} не наблюдается при нагреве воды вплоть до температуры её кипения для толщины плоского слоя воды $d = 2\text{ см}$.

Температура воды практически линейно зависит от изменения мощности диссипации электромагнитного излучения (рисунок 2.26), а угол наклона прямой $T_0 = T_0(Q_d)$ и величина Q_d определяются, в основном, толщиной плоского слоя. Следует отметить, что для нагрева плоского слоя воды $d = 4\text{ см}$ в микроволновой печи до температуры кипения необходимо подводить мощность электромагнитного излучения $Q_n > 300\text{ Вт/м}^2$, а для $d = 8\text{ см}$ мощность излучения следует увеличить ещё в четыре раза – $Q_n > 1200\text{ Вт/м}^2$. Если вода в микроволновой печи нагрета до максимального значения $T = T_{\text{max}}$, то при повышении температуры до $T \approx 90^\circ\text{C}$ можно снижать значения Q_n (рисунок 2.26). При нагреве воды от $T > 90^\circ\text{C}$ до температуры кипения T_k необходимо вновь увеличивать подводимую мощность микроволнового излучения.

Коэффициент отражения k_r для слоя воды $d = 2\text{ см}$ увеличивается от 0,7 до 0,95. Электромагнитное излучение как бы «свободно» проходит сквозь данный слой воды с незначительной диссипацией мощности микроволновой энергии (менее 25 % от значения Q_n). С увеличением толщины плоского слоя воды наблюдается нелинейная зависимость коэффициента отражения $k_r(T_0)$ или $k_r(Q_n)$. Например, при $d = 4\text{ см}$ в области температур $\sim 90^\circ\text{C}$ коэффициент отражения минимальный и равен $k_r \sim 0,05$. В этом случае всё электромагнитное излучение практически поглощается данным плоским слоем воды. Для толщины $d = 8\text{ см}$ коэффициент отражения воды гораздо выше ($k_r > 0,3$), чем для $d = 4\text{ см}$. Это указывает на то, что существует оптимальный размер плоского слоя воды, нагретого до определенной температуры, когда достигается максимальный КПД нагрева воды и практически вся подводимая мощность микроволнового излучения поглощается данным слоем воды.

Амплитуда электрического поля $E(T_0)$ изменяется в зависимости от значения подводимой мощности электромагнитного поля, так же как и температура при нагреве плоского

Рисунок 2.26 – Изменение характеристики в зависимости от толщины плоского слоя воды в микроволновой печи в поле «слабого» электромагнитного излучения: $f = 3 \text{ ГГц}$; $d = 2$ (штрих-пунктирная линия), 4 (сплошная), 8 (пунктирная) см

слоя воды $T_0(Q_n)$. Следует отметить, что напряженность электрического поля максимальна на оси симметрии, а закон изменения $E_0(T_0)$ практически «параболически» зависит от осевой температуры.

С уменьшением частоты электромагнитного поля ($f = 1 \text{ ГГц}$) характеристики нагрева воды качественно не изменяются, а количественно для нагрева воды необходимо затратить почти в пять раз больше мощности микроволнового излучения, чем для частоты $f = 3 \text{ ГГц}$. Следовательно, КПД нагрева воды зависит не только от толщины плоского слоя, но и от частоты электромагнитного поля.

2.9. Модель интенсивного нагрева плоского слоя воды

Как показали результаты расчета (п. 2.3), при воздействии на воду интенсивным потоком электромагнитного излучения в течение первых моментов времени практически не наблюдается влияние теплопроводности и тепловых потоков на распределение температуры по сечению плоского слоя. Как было установлено выше, кондуктивные потоки тепла обладают определенным «запасом инерции» и не могут сразу на начальных этапах нагрева воды конкурировать с практически «мгновенным, безинерционным» выделением тепла в воде вследствие диссипации мощности электромагнитного поля. Это физическое явление позволяет значительно упростить математическое решение уравнения энергии и предложить достаточно простую модель интенсивного микроволнового нагрева воды.

2.9.1. Модель интенсивного нагрева воды. Рассматривается плоский слой воды в стеклянной емкости, расположенный в центре микроволновой печи. При интенсивном воздействии подводимого электромагнитного излучения на слой воды можно пренебречь процессом переноса тепла теплопроводностью, и уравнение баланса энергии и волновое уравнение (2.7) запишется так:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0. \quad (2.24)$$

Краевые условия соответственно будут равны:

$$t = 0, 0 \leq x \leq R : T(x, 0) = T_R,$$

$$t > 0, x = 0 : dE / dx = 0; \quad x = R : E = E_R(t).$$

Решение дифференциальных уравнений (2.24) проводится методом сеток. Изменение температуры (2.24) находится из конечно-разностного аналога уравнения энергии с переменным шагом по времени: $\Delta t_m = t_{m+1} - t_m$:

$$T_{m+1} = T_m + [F(t_m) + F(t_{m+1})] / 4, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M,$$

где

$$T_{m+1} = T(x, t_m + \Delta t_m), \quad T_m = T(x, t_m);$$

$$F_m = \Delta t_m [E^2 | \sigma / (\rho C_p)]_m, \quad F_{m+1} = [|E|^2 \sigma / (\rho C_p)]_{m+1}.$$

Функция источника в уравнении энергии итеративно рассчитывается в узлах пространственной сетки по значениям температуры и напряженности электрического поля данного и предыдущего временных слоев. Коэффициенты σ , ρ , C_p на m и $m+1$ слоях определяются линейным интерполированием по табличным данным (таблица 1.1). При первой итерации ($N = 1$) распределение температуры задается из начального условия и полагается, что функция источника $F_{m+1} = F_m$. Значения $|E(x, t)|$ на каждом временном разностном шаге ($E_m = |E(x, t_m)|$) находятся из решения приведенного волнового уравнения через граничное условие $|E_R(t_m)|$ путем задания $Q_n(t_m)$ (2.9). Сходимость итераций достигается выполнением условия:

$$|1 - T_m^{N+1} / T_m^N| \leq \varepsilon_N, \varepsilon_N > 0.$$

Для устойчивости счета проводится регуляризация временного шага Δt_m , а контроль вычислений устанавливается по выполнению баланса энергии. Алгоритм численного расчета уравнения ведется до тех пор, пока температура в какой-либо точке по x в данный момент времени t_{m+1} не достигнет температуры кипения воды:

$$T_{m+1}(x, t_{m+1}) \approx T_k = 100^\circ \text{C}.$$

2.9.2. Результаты расчета. Проводится численный расчет характеристик плоского слоя воды в микроволновой печи с симметричным подводом мощности электромагнитного поля для тех же исходных данных, что и в п. 2.3. Поскольку в модели интенсивного нагрева воды коэффициент $\lambda = 0$, то фактически не учитывается теплообмен теплопроводностью между нагреваемой водой и окружающем ее газовой средой в камере микроволновой печи. Расчет ведется от оси симметрии до тонких стенок стеклянной емкости в области $[0 \leq x \leq R_c]$.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.27), в течение первых минут нагрева профиль температуры плоского слоя воды соответствует распределению $T(x, t)$, полученному с учетом теплопроводности в рамках «строгой» численной математической модели (рисунок 2.9). Это подтверждает возможность применения модели интенсивного нагрева ($\lambda = 0$) для оценки характеристик воды на начальных промежутках времени. Сравнение результатов (рисунки 2.27 и 2.14) показало, что при продолжительном нагреве воды на формирование профиля температуры заметное влияние оказывает теплопроводность. Поэтому применять методику интенсивного нагрева воды можно до определенных моментов времени.

На изменение электромагнитных величин, таких как $E(x, t)$, k_r , k_d , Q_d влияние теплопроводности сказывается не так существенно. Это позволяет расширить рамки применения модели интенсивного нагрева для оценки изменения электромагнитных характеристик.

В модели интенсивного нагрева воды наблюдается заметное периодическое изменение температуры воды по сечению плоского слоя. Реализуется подобие слоистого нагрева воды микроволновым излучением. Причем с течением времени происходит увеличение изменения температуры: $\Delta T(x, t) = T_{\max}(x, t) - T_{\min}(x, t)$ между слоями воды $0 \leq \Delta T(x, t) \leq 85^\circ \text{C}$ и смещение положений максимумов и минимумов температуры от оси симметрии к периферии. Данное распределение $T(x, t)$ обусловлено изменением амплитуды колебаний напряженности электрического поля и сдвигом его фазы (рисунок 2.27). Подобная картина наблюдалась при уменьшении коэффициента теплопроводности (см. рисунки 2.16–2.18) и при воздействии на воду мощных потоков электромагнитного излучения (рисунки 2.25–2.27).

Рисунок 2.27 – Интенсивный нагрев плоского слоя воды
с симметричным подводом мощности электромагнитного поля:
 $f = 3 \text{ ГГц}$; $d = 4 \text{ см}$; $Q_n = 10 \text{ Вт/см}^2$, $t_k = 280 \text{ с}$; пунктир – $E(x, 0)$

2.10. Односторонний подвод мощности микроволнового излучения

Проводится моделирование микроволнового нагрева воды при воздействии на плоскую стеклянную емкость с водой одностороннего потока электромагнитного излучения с заданной мощностью и частотой (рисунок 2.2). Начало системы координат помещается на левой границе пластины. Плоский слой воды находится в центре микроволновой печи.

Для упрощения теоретического анализа уравнение энергии и приведенное волновое уравнение с односторонним подводом мощности микроволнового излучения (2.7) решаются на основе приближения однородных коэффициентов (п. 2.7):

$$\rho_0 C_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \sigma_0 |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k^2 E = 0. \quad (2.25)$$

Ниже рассматривается общее решение приведенного волнового уравнения (2.25) и проводятся решения системы уравнений (2.25) при квазистационарном режиме нагрева воды и в случае интенсивного ее нагрева.

2.10.1. Решение волнового уравнения. При одностороннем подводе потока электромагнитного излучения на плоский слой воды, общим решением приведенного волнового уравнения (2.25) в каждой из рассматриваемых областей: I, II, III (рисунок 2.2) является суперпозиция падающих и отраженных электромагнитных плоских волн:

$$\begin{aligned} E_I &= A_1 \exp(ik_0 x) + B_1 \exp(-ik_0 x), \\ E_{II} &= A_2 \exp(ik_0 x) + B_2 \exp(-ik_0 x), \\ E_{III} &= A_3 \exp(ik_0 x) + B_3 \exp(-ik_0 x). \end{aligned}$$

Вводится в рассмотрение матрица M_{13} , связывающая электромагнитные поля в средах I и III (вход и выход микроволнового излучения):

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M_{13} \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix}, \quad M_{13}^{-1} = M_{32} \cdot M_{21}.$$

При выборе начала координат на левой грани пластины толщиной $d = 2R_c$ (рисунок 2.2) матрицы M_{21} и M_{32} определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} M_{21} &= \begin{pmatrix} \frac{k+k_0}{2k} \exp(i(k_0-k)d) & \frac{k-k_0}{2k} \exp(-i(k_0+k)d) \\ \frac{k-k_0}{2k} \exp(i(k_0+k)d) & \frac{k+k_0}{2k} \exp(-i(k_0-k)d) \end{pmatrix}, \\ M_{32} &= \begin{pmatrix} \frac{k_0+k}{2k_0} & \frac{k_0-k}{2k_0} \\ \frac{k_0-k}{2k_0} & \frac{k_0+k}{2k_0} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Учитывается, что в области III распространяется только прошедшая электромагнитная волна и коэффициент $B_3 = 0$. Тогда коэффициент отражения на правой границе стеклянной пластины и связь между подводимой и диссипированной мощностями электромагнитного излучения находятся из следующих формул:

$$k_r = \left| \frac{B_1}{A_1} \right|^2 = \left| \frac{(k_0^2 - k^2) \sin(2kR_c)}{-2ik_0k \cos(2kR_c) + (k_0^2 + k^2) \sin(2kR_c)} \right|^2. \quad (2.26)$$

$$Q_i = \frac{|A_1|^2}{2\mu_0 c} = \left(Q_d + \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} \right) / (1 - k_r).$$

2.10.2. Квазистационарный нагрев воды. Рассматривается продолжительный нагрев плоского слоя воды в поле электромагнитного излучения с односторонним подводом постоянной мощности электромагнитного излучения $Q_n(t) = \text{const}$, как и в случае, показанном в п. 2.8. Нагрев воды до определенной постоянной температуры происходит за счет непрерывного воздействия микроволнового излучения заданной мощности, подводимого к стеклянной емкости с водой справа (рисунок 2.2). Температура воды и напряженность электрического поля определяются из решения квазистационарного уравнения энергии и волнового уравнения (2.24):

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2 = 0, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0.$$

Решение уравнения энергии по методике, приведенной в п. 2.3, проводится путем задания граничных условий:

$$x = 0 : T = T_0; \quad x = R : T = T_R.$$

Области диссипации. Полученное аналитическое решение квазистационарного уравнения баланса энергии в области диссипации мощности электромагнитного излучения $[-R_c \leq x \leq R_c]$, запишется в следующем виде:

$$T_{II}(x) = T_0 + Cx - \frac{\sigma_0 E_0^2}{2\lambda_0} \Phi(x), \quad (2.27)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{4b^2} (2\gamma_1 \text{sh}^2 bx + \gamma_2 \text{sh} 2bx) + \frac{1}{4a^2} (2\gamma_3 \sin^2 ax - \gamma_4 \sin 2ax),$$

$$a = \text{Re}(k), \quad b = \text{Im}(k), \quad \gamma_1 = \alpha\alpha^* + \beta\beta^*, \quad \gamma_2 = -\alpha\alpha^* + \beta\beta^*,$$

$$\gamma_3 = \alpha\beta^* + \beta\alpha^*, \quad \gamma_4 = i(\alpha^*\beta - \alpha\beta^*), \quad \alpha = \frac{\sqrt{\varepsilon_k} + 1}{2\sqrt{\varepsilon_k}}, \quad \beta = 1 - \alpha.$$

Область теплопроводности. В областях отвода тепла I и III (рисунок 2.2), решение уравнения энергии, как и в п. 2.6, определяется через потенциал теплового потока (2.22):

$$S_I(x) = S_c^1(x - 2R_c) + S_c, \quad S_{III}(x) = S_0'x + S_0, \quad (2.28)$$

здесь $S_c^1 = -S_c / \Delta$, $S_0' = S_0 / \Delta$ – кондуктивные потоки тепла через правую и левую стенки (границы) тонкой стеклянной пластины $\Delta = R - R_c$. Предполагается непрерывность температуры и тепловых потоков воды и стеклянной емкости (2.27), (2.28) на границах плоского слоя:

$$x = 0: T = T_0, dT/dx = (dT/dx)_0; \quad x = d = 2R_c: T = T_c, dT/dx = (dT/dx)_c.$$

На основе граничных условий и баланса энергии электромагнитного поля находятся выражения для определения температуры на поверхности правой стеклянной стенки T_c через осевую температуру T_0 , напряженности электрического поля E_0 , мощности диссипации микроволнового излучения и константы C :

$$T_c = T_0 + \frac{S_0(\Phi_1' \cdot d - \Phi_c') + S_c(\Phi_0' \cdot d - \Phi_1')}{\lambda_0 \Delta (\Phi_c' - \Phi_0')}, \quad (2.29)$$

$$Q_d = \frac{S_0 + S_c^1}{\Delta}, \quad E_0^2 = \frac{2Q_d}{\sigma_0(\Phi_c' - \Phi_0')}, \quad C = \frac{S_0\Phi_1' + S_1\Phi_0'}{\lambda_0 \Delta (\Phi_c' - \Phi_0')},$$

$$Q_i = \frac{|A_1|^2}{2\mu_0 c} = \left(Q_d + \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} \right) / (1 - \kappa_r), \quad \Phi_c = \Phi(d), \quad \Phi_0' = \Phi'(0), \quad \Phi_c' = \Phi'(d).$$

2.10.3. Модель интенсивного нагрева. При интенсивном нагреве воды микроволновым излучением с односторонним подводом мощности электромагнитного поля, характеристики воды и микроволнового излучения определяются из решения уравнения энергии, приведенного волнового уравнения при следующих краевых условиях, как и в п. 2.9:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0.$$

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq R: T(x, 0) = T_R,$$

$$t > 0, \quad x = 0: E = E_0; \quad x = R_c: E = E_c.$$

Численный анализ характеристик нагрева плоского слоя воды в микроволновой печи выполняется для тех же условий, что и в п. 2.3: $f = 1, 3, 10$ ГГц; $d = 1, 2, 4, 6, 8$ см, $Q_n = 1, 10, 100$ Вт/см². Динамика изменения температуры и напряженности электрического поля (рисунки 2.28, 2.29) приводится для следующих моментов времени микроволнового нагрева воды: $t = 0, 50, 100, 150, t_k$.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.28), изменения температуры воды и электромагнитных характеристик при интенсивном нагреве воды с односторонним подводом мощности микроволновым излучением качественно отличаются от случая с симметричным подводом. Если при симметричном подводе мощности электромагнитного излучения максимум напряженности электрического поля, соответственно, источников тепла и температуры воды реализуется в центре плоского слоя, то при односторонним подводе максимум данных характеристик наблюдается у стенки стеклянной емкости со

Рисунок 2.28 – Сравнение характеристик нагрева воды в зависимости от способа подвода мощности электромагнитного излучения: симметричный случай (слева, пунктир – $E(x,0)$, $t_k = 280$ с), односторонний (справа, $t_k = 200$ с): $f = 3$ ГГц, $d = 4$ см, $Q_n = 100$ Вт/см²

стороны подвода излучения. С течением времени при одностороннем подводе мощности электромагнитного излучения наблюдается равномерный практически экспоненциальный нагрев воды от левой стенки емкости вглубь плоского слоя. Максимум температуры воды и начало процесса кипения реализуется у поверхности стеклянной стенки со стороны подвода мощности электромагнитного поля. По сравнению с симметричным случаем подвода мощности электромагнитного излучения, в данном случае снижается КПД и время нагрева воды до температуры кипения.

При микроволновом нагреве воды с односторонним подводом мощности излучения, как и в случае симметричного подвода (рисунки 2.28, 2.29), реализуются периодические изменения (колебания) в распределении температуры воды по сечению плоского слоя. Происходит послойный нагрев воды с толщиной нагретых плоских слоев, равных половине длины электромагнитной волны. Максимум температуры воды соответствует пучностям напряженности электрического поля (область интенсивного выделения «джоулева тепла» в источниках уравнения энергии), а минимум – узлам $|E(x,t)|$. С увеличением температуры воды возрастает амплитуда колебаний электрического поля, и происходит фазовый сдвиг в направлении подводимого излучения. Отраженная мощность электромагнитного излучения вначале незначительно уменьшается, а затем возрастает. Соответственно, мощность диссипации изменяется противоположно, а прошедшая сквозь плоский слой воды мощность микроволнового излучения возрастает незначительно (рисунок 2.28).

С увеличением толщины плоского слоя (рисунок 2.29) качественно изменяются характеристики нагрева воды по сравнению с симметричным подводом мощности электромагнитного поля: снижается амплитуда колебаний температуры вдоль оси x . Вследствие экранирования электромагнитного излучения слоем воды амплитуда колебания напряженности электрического поля экспоненциально уменьшается по направлению оси x и по величине. Соответственно, с удалением от начального сечения, снижается тепловыделение в источниках тепла уравнения энергии и уменьшается температура плоского слоя воды. При приближении к правой поверхности плоского слоя воды ($x \rightarrow d$) возрастают колебания в распределении температуры ($\Delta T(x,t) = T_{max}(x,t) - T_{min}(x,t)$) вдоль оси x . Это связано с увеличением амплитуды колебаний $|E(x,t)|$, которая с течением времени возрастает из-за нагрева плоского слоя воды. С ростом толщины плоского слоя воды амплитуда колебания $|E(x,t)|$ и мощность прошедшей электромагнитной волны уменьшается с 25 % при $d = 2$ см, практически до нуля при $d > 6$ см, а диссипируемая и прошедшая мощность микроволнового излучения, наоборот, возрастает. При увеличении толщины плоского слоя воды вследствие экранирования микроволнового излучения, наблюдается процесс кипения воды со стороны подвода мощности излучения, тогда как с другой стороны емкости, вода остается холодной.

С увеличением частоты колебания электромагнитного поля ($f = 10$ ГГц) практически на порядок уменьшается время нагрева воды у поверхности стенки стеклянной емкости (рисунок 2.29, а). Причем температура кипения воды, как и в предыдущих случаях, достигается вблизи левой поверхности стенки емкости (со стороны подвода мощности электромагнитного поля), а с другой (правой) стороны стенки вода остается практически холодной. КПД нагрева воды остается на уровне ~ 40 %.

С уменьшением частоты ($f = 1$ ГГц) более чем в пять раз возрастает мощность прошедшей электромагнитной волны через плоский слой воды, увеличивается ~ 10 % мощность

Рисунок 2.24 – Односторонний интенсивный нагрев плоского слоя воды:
 $d = 2$ (слева, $t_k = 150$ с), 8 (справа, $t_k = 200$ с) см, $f = 3$ ГГц, $Q_p = 100$ кВт/м²

Рисунок 2.29, а – Односторонний интенсивный нагрев плоского слоя воды:
 $f = 1$ (слева, $t_k = 270$ с), 3 (справа, $t_k = 10$ с) ГГц, $d = 2$ см, $Q_p = 100$ кВт/м²

диссипации электромагнитного излучения и заметно снижается, практически в пять раз, мощность отраженной электромагнитной волны.

2.10.4. Нагрев воды с перемешиванием. В экспериментальных исследованиях [8] перемешивание воды в цилиндрической стеклянной емкости выполняется диэлектрическим стержнем до получения средней по всему объему температуры жидкости за время отключения магнетрона. В данных расчетах регулирование температуры воды при перемешивании проводится путем усреднения распределений температуры через каждые 10 секунд её нагрева микроволновым излучением с помощью выражения:

$$T_{cp}(x, nt) = (T(x, nt) + T(x, (n-1)t)) / 2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Численный анализ изменения тепловых и электромагнитных характеристик нагрева плоского слоя воды в микроволновой печи при «равномерном перемешивании» проводится для тех же условий, что и в п. 2.3.

Основное отличие результатов (см. рисунок 2.30 – расчет с перемешиванием и рисунок 2.28 – расчет без перемешивания) обусловлено изменением в распределениях температуры воды по сечению плоского слоя. В случае перемешивания воды устанавливается практически постоянная по всему объему плоского слоя температура с малыми незначительными отклонениями (колебаниями) от среднего значения $T(x, t)$ вдоль оси x ($\max \Delta T(x, t) < 5^\circ \text{C}$, $\Delta T(x, t) = T_{\max}(x, t) - T_{\min}(x, t)$). Это приводит к тому, что качественный характер изменения модуля амплитуды электрического поля остается прежним, а количественно, в режиме с перемешиванием воды, происходит сдвиг фазы электромагнитных колебаний и увеличение амплитуды $|E(x, t)|$.

Для начальных моментов времени $t < 200$ с, то же самое можно сказать и о незначительных изменениях коэффициентов электромагнитных характеристик: k_r , k_d , k_p и значения E_0 . С увеличением времени ($200 \text{ с} < t < 320 \text{ с}$), картина нагрева воды начинает качественно изменяться: в начале наблюдается рост значений k_d , k_p , E_0 и уменьшение коэффициента k_r , что соответствует температуре плоского слоя $T \sim 90^\circ \text{C}$. Затем, при $t > 320$ секунд ($T > 90^\circ \text{C}$), их изменения становятся противоположными: резко уменьшаются значения k_d , k_p , E_0 и быстро растет коэффициент k_r (рисунок 2.30).

2.11. Нагрев воды в стеклянной цилиндрической емкости

Разработана математическая модель, проведены расчеты и выполнен теоретический анализ микроволнового нагрева воды в стеклянной цилиндрической емкости с «тонкими» стенками, расположенной в центре микроволновой печи (см. рисунок 2.1).

2.11.1. Математическая модель. Рассматривается цилиндрическая емкость или стеклянный сосуд с водой, который располагается в центре микроволновой печи. Цилиндрическая емкость с «тонкими» стеклянными стенками достаточно протяженная, что дает возможность не учитывать возмущения электромагнитного поля вблизи её торцов. Микроволновое излучение подводится симметрично к цилиндру в виде электромагнитной волны «радиального типа» [25] с компонентами:

$$\vec{E}(0, 0, E_z(r)) \exp(i\omega t), \quad \vec{H}(0, H_\phi(r), 0) \exp(i\omega t).$$

Рисунок 2.30 – Характеристики плоского слоя воды при равномерном перемешивании в микроволновой печи: $f=3$ ГГц, $d=4$ см, $Q_n=10$ Вт/см², $t_k=360$ с

Тепловые и электромагнитные характеристики воды и микроволнового излучения находятся из решения уравнения энергии (1.5) и приведенного волнового уравнения (1.7), записанных в цилиндрической системе координат:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dE}{dr} \right) + k_0 \varepsilon_k E = 0. \quad (2.30)$$

Краевые (начальные и граничные) условия задаются в следующем виде:

$$t = 0, 0 \leq r \leq R: T(r, 0) = T_R;$$

$$t \geq 0, r = 0: \frac{dT}{dr} = 0, \frac{dE}{dr} = 0, r = R: T = T_R, E = E_R.$$

2.11.2. Квазистационарный нагрев воды. Предварительно рассматривается квазистационарное состояние воды, нагретой до определенной температуры, в стеклянном цилиндрическом сосуде в микроволновой печи (см. рисунок 2.1). В этом случае вся подводимая постоянная мощность электромагнитного излучения ($Q_n(t) = Q_n = const$) отводится теплопроводностью с боковой поверхности цилиндра через окружающую газовую среду на охлаждаемые стенки камеры микроволновой печи. Изменение температуры воды от времени определяется процессами, связанными с выделением «джоулева тепла» за счет диссипации мощности электромагнитного излучения, и переносом его теплопроводностью на стенки стеклянной емкости.

При микроволновом нагреве воды в стеклянном цилиндрическом сосуде, аналитическое решение квазистационарных уравнений (2.30) в области ($0 \leq r \leq R$) находится в рамках модели однородных коэффициентов, которая полагает постоянство $k = k_0 \varepsilon_k, \sigma, \lambda = const$ по сечению цилиндра.

Для удобства решения приведенного волнового уравнения (2.30) предварительно выполняется нормировка электрического поля на величину осевого значения: $E(r) = E_0 F(r)$. После некоторых преобразований приведенного волнового уравнения (2.30), функция $F(r)$ находится из решения следующего уравнения с заданными граничными условиями:

$$F''(r) + \frac{1}{r} F'(r) + k_0^2 \varepsilon_k(r) F(r) = 0, \quad F(0) = 1, \quad F'(0) = 0.$$

Для решения данной задачи Коши вся область изменения аргумента [$0 \leq r \leq R$] условно разбивается на две: цилиндрическая емкость, заполненная водой, и газовая среда (воздух) в микроволновой печи.

Цилиндрический столб воды. В данной области [$0 \leq r \leq R_c$] при нагреве воды происходит диссипация мощности микроволнового излучения, которая определяется из решения задачи Коши для приведенного волнового уравнения и уравнения энергии (2.30):

$$E = E_0 J_0(kr), \quad T = T_0 - (T_0 - T_c) \phi(r) / \phi(R_c), \quad (2.31)$$

где $F(r) = J_0(kr)$ – функция Бесселя нулевого порядка 1 рода мнимого аргумента, а функция $\phi(r)$ определяется из выражения:

$$\phi(r) = \int_0^r (F_r F_i' - F_r' F_i) dr, \quad F_r = \operatorname{Re}(E), \quad F_i = \operatorname{Im}(E).$$

Газовая среда микроволновой печи. В области ($R_c < r < R$) решения задачи Коши относительного приведенного волнового уравнения и уравнения энергии (2.30), выраженного через потенциал теплового потока (2.22), находятся в виде следующих аналитических формул:

$$E = AH_0^{(1)}(k_0 r) + BH_0^{(2)}(k_0 r), \quad S = S_R + (S_c - S_R) \ln(r/R) / \ln(R_c/R), \quad (2.32)$$

здесь $H_0^{(1,2)}(k_0 r)$ – функции Ханкеля 1 и 2 рода нулевого порядка. Коэффициенты A и B , определяющие подводимую к стеклянному цилиндру с водой и отраженную от него электромагнитную волну, определяются из условия непрерывности электрических и магнитных полей на границе раздела двух сред (вода – газ). Как и для плоского слоя предполагается, что «тонкие» стеклянные стенки цилиндрического сосуда ($\delta_0 \approx 0$) не оказывают заметного влияния на изменение характеристик нагрева воды в микроволновой печи (п. 2.6).

Тогда тепловые и электромагнитные свойства воды и электромагнитного поля: E_o, T_o, k_r, Q_d, S_c будут определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{4} \pi R_c k_0 E_0 \left[J_0(kR_c) H_1^{(2)}(k_0 R_c) - \sqrt{\varepsilon_k} J_1(kR_c) H_0^{(2)}(k_0 R_c) \right], \\ B &= -\frac{1}{4} \pi R_c k_0 E_0^2 \left[J_0(kR_c) H_1^{(1)}(k_0 R_c) - \sqrt{\varepsilon_k} J_1(kR_c) H_0^{(1)}(k_0 R_c) \right], \\ Q_d &= (1 - k_r) Q_n = 2\pi q (T_0 - T_c) / \ln(R/R_c), \quad E_0^2 = Q_d / \pi \sigma_0 R_c \phi'(R_c), \\ S_c &= S_R + q (T_0 - T_c) \quad q = \lambda_0 R_c \ln(R/R_c) \phi'(R_c) / \phi(R_c). \end{aligned}$$

Для определения A, B, E_0 воспользуемся условиями непрерывности составляющих электромагнитных полей E, H на границе раздела двух сред (вода – газ) при $r = R_c$, и соотношением для подводимой мощности электромагнитного поля:

$$\begin{aligned} Q_n &= \pi R_c (EH^* + E^*H) / 2, \\ A &= \sqrt{\mu_0 c Q_n / 2}, \quad B = -A \frac{f_1(R_c)}{f_2(R_c)}, \quad E_0 = \frac{4iA}{\pi R_c f_2(R_c)}, \\ f_{1,2}(r) &= k_0 H_1^{(1,2)}(k_0 r) F(r) + H_0^{(1,2)}(k_0 r) F'(r). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Напряженность электрического поля у стенок камеры микроволновой печи E_R определяется выражением через подводимую мощность электромагнитного излучения Q_n :

$$E_R = \sqrt{\mu_0 c Q_n / 2} (H_0^{(1)}(k_0 R) - H_0^{(2)}(k_0 R)) \frac{f_1(R_c)}{f_2(R_c)}. \quad (2.34)$$

2.11.3. Результаты расчета. В качестве примера проводится расчет характеристик квазистационарного состояния цилиндрического столба воды, находящегося под воздействием постоянного электромагнитного излучения в микроволновой печи. Исходные данные соответствуют п. 2.3: $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 2, 4, 8 \text{ см}$, $T(r) = T_R = 20^\circ \text{C}$.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.31), при реализации квазистационарного состояния нагрева воды в микроволновой печи наблюдается незначительное монотонное уменьшение распределения температуры воды по сечению цилиндра. Температура воды на оси цилиндра зависит от значения подводимой мощности электромагнитного поля: $T_0 = T_0(Q_n)$ (рисунок 2.26). С увеличением или уменьшением размеров цилиндра профиль температуры воды практически остается постоянным (рисунок 2.31). В воздухе, окружающем стеклянную емкость с водой, температура газа уменьшается практически обратно пропорционально расстоянию ($\sim 1/r$) от нагретых тонких стеклянных стенок цилиндра до температуры на охлаждаемых стенках камеры микроволновой печи.

Изменение осевой температуры воды нелинейным образом зависит не только от подводимой мощности электромагнитного поля, но и от размеров цилиндрической емкости: $T_0 = T_0(R, Q_n)$ (рисунок 2.31). Например, при $R = 1$ см температура воды на оси цилиндра вначале возрастает с увеличением Q_n , достигает максимального значения при $T_0 \sim 85^\circ\text{C}$, а затем, с ростом Q_n , уменьшается. Для радиуса цилиндра ($R = 2$ см) прослеживается незначительное монотонное увеличение температуры до значений $T_0 < 65^\circ\text{C}$, а далее начинается интенсивный рост T_0 вплоть до температуры кипения воды. Для относительно больших радиальных размеров цилиндра ($R = 4$ см) зависимость $T_0(Q_n)$ становится более сложной: реализуются два максимума при температурах $T_0 = 55^\circ\text{C}$ и 95°C и один минимум при $T_0 = 75^\circ\text{C}$.

Осевая температура воды практически линейно изменяется в зависимости от величины мощности диссипации электромагнитного излучения (рисунок 2.31). Угол наклона прямой $T_0 = T_0(Q_d)$ и величина Q_d определяются, в основном, диаметром цилиндра. Следует отметить, что для нагрева воды в стеклянном цилиндре диаметром $d = 2$ см в микроволновой печи до температуры кипения, необходимо подводить мощность электромагнитного излучения $Q_n > 60$ Вт/м, а для $d = 8$ см, практически в пять раз больше – $Q_n > 350$ Вт/м. Если вода в микроволновой печи уже нагрета до температуры $T_0 = T_{\max} = 55^\circ\text{C}$ ($d = 8$ см, $Q_n = 120$ Вт/м), то для дальнейшего ее повышения до $T_0 \approx 75^\circ\text{C}$ можно, наоборот, снижать значение подводимой мощности микроволнового излучения до $Q_n = 80$ Вт/м (рисунок 2.26). Для дальнейшего нагрева воды от температуры $T_0 = 75^\circ\text{C}$ до $T_0 \approx 95^\circ\text{C}$ необходимо вновь увеличивать подводимую мощность микроволнового излучения до значения $Q_n = 350$ Вт/м.

Коэффициент отражения электромагнитных волн для цилиндра диаметром $d = 2$ см довольно большей ($k_r \approx 0,8$), и незначительно изменяется за весь промежуток времени нагрева воды: увеличивается от $k_r = 0,8$ до $0,87$ при достижении осевого значения температуры $T_0 = 75^\circ\text{C}$, а при дальнейшем нагреве воды до температуры кипения k_r уменьшается до значения $0,75$. Электромагнитное излучение как бы «свободно» проходит и отражается сквозь данный цилиндрический столб воды с незначительной диссипацией мощности микроволновой энергии (менее 20 % от значения Q_n).

С увеличением диаметра цилиндра наблюдается нелинейная зависимость $k_r(T_0)$ или от $k_r(Q_n)$. Например, при размерах цилиндра $d = 4$ см в области температуры $\sim 60^\circ\text{C}$ коэффициент отражения минимальный и составляет $k_r \sim 0,25$, то есть излучение в этом случае интенсивно поглощается водой. С увеличением размеров цилиндра до $d = 8$ см, коэффициент отражения вновь возрастает ($k_r > 0,4$), и его минимум смещается в область высоких температур ($T_0 \approx 75^\circ\text{C}$). Это указывает на то, что существует оптимальный размер

Рисунок 2.31 – Квазистационарные тепловые состояния воды в цилиндрическом сосуде микроволновой печи:
 $f = 3$ ГГц, $d = 8$ (пунктирная линия), 4 (сплошная), 2 (штрих-пунктирная), см

цилиндра, когда можно нагреть воду до максимальной температуры при минимальной подводимой мощности микроволнового излучения.

Амплитуда напряженности электрического поля изменяется в зависимости от значения подводимой мощности электромагнитного излучения и температуры воды. На оси симметрии цилиндра амплитуда напряженности $|E(0)|$ в несколько раз больше по сравнению с плоским слоем воды, и наблюдается более заметный сдвиг фазы колебаний. Напряженность электрического поля максимальна на оси симметрии цилиндра, а изменение $E_0(T_0)$ почти «параболически» зависит от осевой температуры.

2.11.4. Интенсивный нагрев воды в цилиндрической емкости. Как и в предыдущем случае, к стеклянному цилиндру с водой микроволновое излучение подводится симметрично в радиальном направлении. В случае интенсивного нагрева воды мощным электромагнитным излучением, можно пренебречь кондуктивным переносом тепла в уравнении энергии (см. п. 2.9). Тогда уравнение энергии и приведенное волновое уравнение (2.30) запишутся так:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dE}{dr} \right) + k_0 \varepsilon_k E = 0. \quad (2.35)$$

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq R: T(r, 0) = T_R;$$

$$0 < t \leq t_k, \quad r = 0: dE/dr = 0, \quad r = R: E(R, 0) = E_R.$$

Численное решение дифференциальных уравнений (2.35) проводится методом конечных разностей по методике, изложенной в п. 2.9. Значение напряженности электрического поля у стенок камеры микроволновой печи E_R определяется величиной подводимой мощности электромагнитного излучения (2.34):

$$(T_k - T_R) / \Delta t_m = (\sigma / 2 \rho C_p) E_R^2 \max(|\phi|)^2. \quad (2.36)$$

При решении уравнения энергии (2.36), для определения шага Δt_m предварительно определяются максимальное и минимальное время нагрева воды (t_{min}, t_{max}). При вычислении t_{min} коэффициенты (σ, ρ, C_p) берутся по значению температуры T_R , а при определении t_{max} – по температуре кипения воды. Функция $\phi(r)$ определяется через функцию Бесселя:

$$\phi(r) = J_0(\sqrt{\varepsilon_k} k_0 r) / J_0(\sqrt{\varepsilon_k} k_0 R).$$

По известным значениям t_{min}, t_{max} выбирается шаг дискретизации времени Δt_m (см. п. 2.9), обеспечивающий требуемую точность вычисления. При подстановке в выражение (2.36) значения напряженности электрического поля E_R из (2.34), получим:

$$(T_k - T_R) / t_k = (\sigma / 2 \rho C_p) \cdot (\sqrt{\mu_0 c Q_n} / 2 (H_0^{(1)}(k_0 R) - H_0^{(2)}(k_0 R) \frac{f_1(R_c)}{f_2(R_c)}))^2 \max(|\phi|)^2.$$

Видно, что время нагрева воды до температуры кипения микроволновым излучением обратно пропорционально величине подводимой мощности электромагнитного поля.

Это подтверждают результаты расчета микроволнового нагрева плоского слоя воды (см. п. 2.3, таблица 2.1).

2.11.5. Результаты расчета. Проводится анализ характеристик нагрева воды в протяженном цилиндрическом сосуде с тонкими стеклянными стенками в микроволновой печи для тех же исходных данных, что и в п. 2.3: $f = 1, 3, 10 \text{ ГГц}$, $2R_c = d = 1, 2, 4, 8 \text{ см}$, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}$, $T_R(r; Q) = T_R = 20^\circ\text{C}$.

Как следует из результатов (рисунки 2.32, 2.33), при микроволновом нагреве воды в стеклянном цилиндрическом сосуде качественное распределение тепловых и электромагнитных характеристик остается практически таким же, как и для плоского слоя с симметричным подводом мощности электромагнитного поля.

Для электромагнитных частот $f = 1 \text{ ГГц}$ и 3 ГГц напряженность электрического поля достигает максимального значения на оси симметрии цилиндра. По сечению цилиндра при $f = 3 \text{ ГГц}$, $R_c = 1 \text{ см}$ реализуется одна длина волны электромагнитного поля, для $R_c = 2 \text{ см}$ – две, а для $R_c = 4 \text{ см}$ – три с половиной. Причем для относительного большого радиуса ($R_c = 4 \text{ см}$) прослеживается эффект экранирования микроволнового излучения пристеночными слоями воды (аналог скин-слоя). Это проявляется в уменьшении $|E(r; t)|$ на расстоянии $r \approx R_c/2$ от поверхности цилиндра. Затем в области вновь наблюдается увеличение модуля напряженности электрического поля в направлении к оси симметрии. По мере нагрева воды растет значение $|E(r; t)|$ и происходит незначительный сдвиг фазы колебаний от оси симметрии к поверхности цилиндра (рисунок 2.32).

Данные изменения $|E(r; t)|$ являются основной причиной формирования распределения профиля температуры по сечению цилиндра. В отличие от плоского слоя (см. п. 2.3), температура воды в цилиндрическом сосуде для $f = 1 \text{ ГГц}$ и 3 ГГц максимальна на оси симметрии, и в процессе нагрева достигает значения температуры кипения ($T(0, t = t_k) = T_k$). По сечению цилиндра, как и для плоского слоя, реализуются кольцевые слоистые области нагрева воды с максимумом температуры в пучностях $|E(r; t)|$ и минимумом – в узлах.

Быстрый нагрев воды микроволновым излучением достигается для цилиндра с размерами $R_c = 2 \text{ см}$ ($t_k = 194 \text{ с}$). В этом случае коэффициент диссипации мощности электромагнитного поля возрастает с $k_d = 0,55$ в начальный момент времени до максимальной величины $k_d = 0,6$ – в конечное время нагрева воды до температуры кипения при $T = T_k$. С уменьшением радиуса цилиндра в два раза ($R_c = 1 \text{ см}$) диссипация мощности микроволнового излучения снижается с 20 до 8 % от значения Q_n и время нагрева воды до температуры кипения составляет $t_k = 270 \text{ с}$. С увеличением размера цилиндра ($R_c = 4 \text{ см}$) происходит незначительное уменьшение Q_d от начального значения 0,38 до 0,32 в конечный момент времени, когда вода закипает ($t_k = 1120 \text{ с}$). Поэтому для цилиндров с размерами $R_c = 1$ и 4 см наблюдается заметное увеличение времени нагрева воды до температуры кипения (см. таблицу 2.2).

При радиусе цилиндра $R_c = 1 \text{ см}$ с ростом частоты электромагнитного поля увеличивается диссипация мощности микроволнового излучения: $Q_d(t_k) = 5 \%$ ($f = 1 \text{ ГГц}$), 15% ($f = 3 \text{ ГГц}$) и 45% ($f = 10 \text{ ГГц}$) от подводимого значения Q_n . В отличие от электромагнитных частот $f = 1 \text{ ГГц}$ и 3 ГГц , при $f = 10 \text{ ГГц}$ максимум температуры воды реализуется у стеклянных стенок цилиндрической емкости (рисунок 2.33). Происходит заметное экранирование пристеночным слоем воды электромагнитного излучения. Напряженность электрического поля уменьшается на оси симметрии при $R_c = 1 \text{ см}$ почти в четыре раза по сравнению с ее значением на поверхности цилиндра, а для радиуса $R_c = 2 \text{ см}$ напряженность электрического

Рисунок 2.32 – Распределение температуры, напряженности электрического поля и изменения характеристик микроволнового нагрева воды в тонком стеклянном цилиндрическом сосуде: $d = 2$ (верхний ряд – точечная линия), 4 (средний – сплошная), 8 (нижний – пунктирная) см, $f = 3$ ГГц, $Q_n = 10$ Вт/см

Рисунок 2.33 – Изменение характеристик микроволнового нагрева воды в цилиндрическом сосуде: $|E(x, t)|$, $T(x, t)$, $\kappa_r(t)$, $T_0(t)$ – в зависимости от частоты электромагнитного поля: $f = 1$ (верхний ряд – точечная линия), 3 (средний – сплошная), 10 (нижний – пунктирная) ГГц, $Q_n = 10 \text{ Вт/см}$, $d = 4 \text{ см}$

поля на оси цилиндра стремится к нулю – $E_0(t) \approx 0$. В случае «экранирования» слоем воды электромагнитного излучения практически отсутствует нагрев приосевых областей воды. Температура воды на оси симметрии цилиндра при $R_c = 1$ см возрастает всего на 5°C от своего начального значения, в то время как у поверхности стеклянных стенок цилиндра начинается процесс кипения воды (рисунок 2.33). Для $R_c = 2$ см скорость распространения теплового фронта в воде от поверхности стеклянных стенок к оси симметрии гораздо меньше скорости нагрева самой воды микроволновым излучением до температуры кипения. Поэтому температура воды в приосевой области практически остается «холодной»: $T(r,t) \approx T(r,0) = 20^\circ\text{C}$, тогда как у стеклянных стенок начинается процесс кипения: $T(R_c,t) \approx 100^\circ\text{C}$.

Таблица 2.2 – Изменение характеристик нагрева воды в цилиндрическом сосуде в зависимости от R_c, f

$R_c, \text{см}$	$f, \text{ГГц}$	$E_0, \text{В/см}$	$E_R, \text{В/см}$	$t_k, \text{с}$	k_r	$k_d, t=t_k$	$T_c, ^\circ\text{C}$
1	3	23,5	4	270	0,85	0,15	25
2	3	27	8	194	0,45	0,55	35
4	3	12	3,2	1120	0,65	0,35	45
1	1	21,5	12	1110	0,9	0,1	50
2	1	46	22	460	0,1	0,9	55
4	1	60	20	250	0,4	0,6	40
6	1	38	10	1170	0,5	0,5	30
2	10	0	6	194	0,55	0,45	100
1	10	2,2	8,5	97	0,55	0,45	100
0,5	10	8,2	5	155	0,58	0,42	75
0,25	10	13	8	20	0,6	0,4	50

2.12. Нагрев воды в сферической емкости

Проводится математическое моделирование нагрева воды электромагнитным излучением в стеклянной сферической емкости с «тонкими» стенками, расположенной в центре микроволновой печи (см. рисунок 2.1).

2.12.1. Математическая модель. Рассматривается сферическая стеклянная емкость с тонкими стенками ($\delta_0 \approx 0$), заполненная водой. Начало сферической системы координат (r, θ, ϕ) находится в центре сферы, а луч $\theta = 0$ совпадает с осью симметрии. Полагается, что на данную емкость подводится сферически симметричная электромагнитная волна с компонентами:

$$\vec{E}(E_r, E_\theta, 0)e^{i\omega t}, \quad \vec{H}(0, 0, H_\phi)e^{i\omega t}.$$

Уравнения Максвелла (1.5) для случая гармонических электромагнитных полей и уравнение энергии в сферической системе координат запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) &= i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_k E_r, & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) &= -i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_k E_\theta, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (E_r) &= -i\omega \mu_0 H_\phi, \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial S}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{2} \sigma \left(|\vec{E}_r|^2 + |\vec{E}_\theta|^2 \right). \quad (2.38)$$

2.12.2. Решение электродинамической задачи. Для упрощения решения уравнений Максвелла (2.37), вводится скалярная функция $\chi(r, \theta)$. Путем ряда математических преобразований из системы уравнений (2.37) находятся выражения для компонент напряженности электрического поля E_r , E_θ и дифференциального уравнения относительно функции $\chi(r, \theta)$:

$$\chi(r, \theta) = r \sin \theta H_j, \quad E_r = -\frac{i}{w \varepsilon_0 \varepsilon_k r^2 \sin \theta} \frac{\partial \chi}{\partial \theta}, \quad E_\theta = \frac{i}{w \varepsilon_0 \varepsilon_k r \sin \theta} \frac{\partial \chi}{\partial r},$$

$$r^2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) + \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\varepsilon_k \sin \theta} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} \right) + \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 r^2 \chi = 0. \quad (2.39)$$

Из-за сложной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от температуры и частоты электромагнитного поля $\varepsilon_k(\omega, T)$, общее решение уравнения (2.39) проводится численным методом конечных разностей.

Метод разделения переменных. Для аналитического решения уравнения (2.39) предполагается, что ε_k зависит только от радиальной координаты $\varepsilon_k(\omega, T) = \varepsilon_k(r)$, а функцию $\chi(r, \theta)$ можно представить в виде произведения двух функций: $\chi_1(r)$ и $\chi_2(\theta)$. Путем подстановки $\chi(r, \theta)$ в уравнение (2.39) и некоторых преобразований, получаются два обыкновенных дифференциальных уравнений относительно $\chi_1(r)$ и $\chi_2(\theta)$:

$$\begin{cases} r^2 \chi_1'' + (k_0^2 \varepsilon_k r^2 + \lambda_n) \chi_1 = 0; \\ (1-x^2) \chi_2'' - \lambda_n \chi_2 = 0 \end{cases}, \quad (2.40)$$

где $x = \cos \theta$, $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$; λ_n – параметр метода разделения переменных.

Граничные условия задаются на основе свойства сферической симметрии и обращения в нуль напряженности магнитного поля в центре сферы:

$$\chi_1(0) = 0, \quad \chi_1'(0) = 0, \quad \chi_2(1) = 0, \quad \chi_2(-1) = 0.$$

Проводится последовательное решение каждого дифференциального уравнения (2.40) относительно функций $\chi_1(r)$ и $\chi_2(\theta)$.

Функция $\chi_2(\theta)$. Для определения $\chi_2(\theta)$ вводится новая функция $f(x)$, и путем подстановки $\chi_2(\theta)$ в уравнение (2.40) получается уравнение Лежандра относительно функции $f(x)$:

$$\chi_2(\theta) = (1-x^2)f(x), \quad (1-x^2)f'' - 4xf' - (2 + \lambda_n)f = 0.$$

Решением данного уравнения является производная полинома Лежандра со спектром собственных значений:

$$f(x) = P'_n(x), \quad \lambda_n = -n(n+1), \quad n = 1, 2, \dots$$

Равенство нулю магнитного поля на оси симметрии при $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ служат условиями для нахождения спектра собственных значений λ_n . Окончательное решение уравнения (2.40) определяется следующим выражением:

$$\chi_{2n} = (1 - x^2) P_n'(x) = \sin \theta \frac{d}{d\theta} P_n(\cos \theta). \quad (2.41)$$

Функция $\chi_1(r)$. Уравнение (2.40) относительно функции $\chi_1(r)$ имеет в центре сферы ($r = 0$) ноль второго порядка. Поэтому уравнение (2.40) предварительно упрощается путем введения новой функции $y(r)$ и безразмерной переменной ξ . Тогда из (2.40), путем преобразований получим уравнение Бесселя относительно функции $y(\xi)$ при следующих граничных условиях:

$$y(r) = \chi_1 / r^2, \quad \xi = k_0 \sqrt{\varepsilon_0} r, \quad y'' + y' / \xi + \left[1 - \left(\frac{n+1/2}{\xi} \right)^2 \right] y = 0, \\ y(0) = 0, \quad y'(0) = 0.$$

Безразмерная переменная ξ является комплексной величиной внутри сферы, в области, заполненной водой ($0 \leq r \leq R_c : \sigma = \sigma_0, \varepsilon_k = \varepsilon_{ko}$), и вещественной переменной вне сферы, в области газовой среды (воздуха) ($R_c < r \leq R : \sigma = 0, \varepsilon_k = 1$). Поэтому в зависимости от изменения аргумента ξ , решением данного уравнения являются функция Бесселя и функция Ханкеля полуцелого (дробного) порядка:

$$0 \leq r \leq R_c : \quad y_{1n} = C_0 J_{n+1/2}(\xi), \quad (2.42)$$

$$R_c < r \leq R : y_{1n} = C_n H_{n+1/2}^{(1)}(\xi) + C_{om} H_{n+1/2}^{(2)}(\xi).$$

Общее решение уравнения (2.39) для многомодовой системы запишется в следующем виде:

$$\chi = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{1n}(r) \chi_{2n}(\theta).$$

В качестве примера ограничимся рассмотрением первой моды ($n = 1$). Тогда полученные выше решения (2.41) и (2.42) можно представить в удобном для вычисления виде:

$$P_1(x) = x, \quad \chi_{21}(x) = 1 - x^2, \\ J_{3/2}(\xi) = \sqrt{2/\pi\xi} a(\xi), \quad a(\xi) = \sin \xi / \xi - \cos \xi, \\ H_{3/2}^{(1,2)}(\xi) = -\sqrt{2/\pi\xi} (1 \pm i / \xi) \exp(\pm i\xi),$$

$$0 \leq r \leq R_c : \quad \chi_{11}(\xi) = C_0 a(\xi),$$

$$R_c < r \leq R : \quad \chi_{11}(\xi) = C_o (1 + i / \xi) \exp(+i\xi) + C (1 - i / \xi) \exp(-i\xi).$$

Компоненты напряженности электрического поля (2.39) приводятся к следующим выражениям:

$$E_r = E_0 e_r(r) \cos \theta, \quad E_\theta = E_0 e_\theta(r) \sin \theta,$$

$$e_r = 2a(\xi) / \xi^2, \quad e_\theta = -3a'(\xi) / 2\xi. \quad (2.43)$$

Здесь E_0 – значение напряженности электрического поля в центре сферической емкости с водой; а компоненты e_r, e_θ , характеризуют распределение модуля напряженности электрического поля вдоль оси и в плоскости, перпендикулярной к ней. Постоянные C_0, C_n, C_{om} , определяющие значение $\vec{E}$ в центре сферы при $r = 0$, в подводимой и отраженной сферических волнах, находятся из равенства тангенциальных составляющих $\vec{E}, \vec{H}$ на границе стеклянной сферической емкости (вода–газ) $r = R_c, (\xi_c = \sqrt{\varepsilon_k} k_0 R_c)$.

2.12.3. Решение уравнения энергии. Решение нестационарного уравнения энергии (2.38) проводится численным методом, разработанным в п. 2.3 и приложении 1.

Ниже предлагаются некоторые упрощенные методы решения уравнения энергии (2.38), которые в ряде случаев приводят к простым выражениям и дают хорошее согласие с результатами, полученными на основе трудоемких численных вычислений.

Квазистационарное уравнение энергии. В случае режима медленного нагрева воды электромагнитным излучением, можно не учитывать в уравнении (2.38) изменение температуры от времени. Для этого введем тепловую функцию $S(r, \theta)$ и запишем уравнения баланса энергии (2.38) в следующем виде:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial S}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{2} \sigma \left(|\vec{E}_r|^2 + |\vec{E}_\theta|^2 \right) = 0. \quad (2.44)$$

Полученные в (2.43) значения компонент напряженности электрического поля E_r, E_θ , подставляются в уравнения баланса энергии (2.38) и, после некоторых преобразований, источники тепла уравнения энергии приводятся к следующим выражениям:

$$s(|E_r|^2 + |E_\theta|^2) = \sigma |E|^2 = E_0^2 \mu_0 \omega (|e_r|^2 \cos^2 \theta + |e_\theta|^2 \sin^2 \theta).$$

Далее, уравнение энергии (2.38) выражается относительно новой переменной $z = k_0 \sqrt{\varepsilon_k} r$ и решается в каждой из рассматриваемых областей микроволновой печи:

- область диссипации мощности электромагнитного излучения $[0 \leq r \leq R_c]$, в которой находится стеклянная сфера с водой;
- область, заполненная воздухом в микроволновой печи $[R_c \leq r \leq R]$.

Область диссипации мощности электромагнитного поля. Аналитическое решение уравнения энергии внутри сферы с водой $[0 \leq r \leq R_c]$ можно записать в следующем виде:

$$S(r, \theta) = S_0 - E_0^2 / (2\mu_0 \omega) (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta). \quad (2.45)$$

Вычислим производные от гармонических функций, входящих в решение уравнения:

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \sin \theta \frac{d}{d\theta} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta \\ \sin^2 \theta \end{pmatrix} = \pm (4 \cos^2 \theta - 2 \sin^2 \theta).$$

Полученные выражения подставим в квазистационарное уравнение энергии (2.44) и сравним с решением (2.45). Путем приравнивания слагаемых при одинаковых

гармонических функциях $\cos^2\theta$ или $\sin^2\theta$, получается система двух нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$F_1'' + 2F_1' / z - 4F_1 / z^2 + 4F_2 / z^2 = |e_r|^2,$$

$$F_2'' + 2F_2' / z - 4F_2 / z^2 + 4F_1 / z^2 = |e_\theta|^2$$

с граничными условиями:

$$F_1(0) = F_2(0) = 0, \quad F_1'(0) = F_2'(0) = 0.$$

При определении напряженности электрического поля в центре сферической емкости с водой полагается, что на поверхности сферы выполняются следующие граничные условия:

$$r = R_c : S_c = (S_{1c} + S_{2c}) / 2, \quad S_{1c} = S_0 - E_0^2 F_{1c} / (2\mu_0\omega), \quad S_{2c} = S_0 - E_0^2 F_{2c} / (2\mu_0\omega).$$

$$E_0^2 = 4\mu_0\omega(S_0 - S_c)(F_{1c} + F_{2c}). \quad (2.46)$$

Связь между подводимой и поглощаемой водой мощностями электромагнитного излучения определяется из условия того, что кондуктивный поток тепла, выносимый теплопроводностью через границу «тонкой» стеклянной сферы в газовую среду камеры микроволновой печи, равен мощности диссипации электромагнитного поля в воде, выраженной в виде энергии источников тепла:

$$\begin{aligned} Q_d &= -2\pi R_c \int_0^\pi (dS / dr) |R_c \sin \theta d\theta = 2\pi R_c^2 E_0^2 \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_M / \mu_0} (F_{1c}' + 2F_{2c}') / 3 = \\ &= (1 - k_r) Q_n. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Подводимая мощность микроволнового излучения определяется через значения напряженностей электрических и магнитных полей в соответствии с интегральным условием Умова–Пойнтинга:

$$Q_i = -\pi R_c \int_0^\pi (E_\theta H_\phi^* + E_\phi^* H_\theta) \sin \theta d\theta.$$

Область, заполненная воздухом. Решение уравнения энергии в микроволновой печи заполненной воздухом в области $[R_c \leq r \leq R]$, находится аналогичным образом, как и в предыдущем случае, путем введения двух новых функций Φ_1 , Φ_2 и представления решения уравнения энергии через тепловую функцию в виде:

$$S = S_0 - E_0^2 / (2\mu_0\omega)(\Phi_1 \cos^2 \theta + \Phi_2 \sin^2 \theta). \quad (2.48)$$

После некоторых математических преобразований получается система двух уравнений относительно функций Φ_1 и Φ_2 :

$$\Phi_1'' + 2\Phi_1' / r - 4\Phi_1 / r^2 + 4\Phi_2 / r^2 = 0, \quad \Phi_2'' + 2\Phi_2' / r - 2\Phi_2 / r^2 + 2\Phi_1 / r^2 = 0.$$

Решение данных уравнений находится в виде следующих аналитических выражений в зависимости от радиальной координаты:

$$\Phi_1 = B_0 + B_1 / r + B_2 / r^2 + B_3 / r^3, \quad \Phi_1 = B_0 + B_1 / r - (B_2 / r^2 + B_3 / r^3) / 2.$$

Константы B_0, B_1, B_2, B_3 определяются из условия равенства температуры и кондуктивных потоков тепла на границе стеклянной сферы $r = R_c$ (вода–воздух):

$$F_1 = \Phi_1, \quad F_2 = \Phi_2, \quad F_1' = \Phi_1', \quad F_2' = \Phi_2',$$

$$B_0 = (F_1 + 2F_2)/3 + z_c(F_1' + 2F_2')/3, \quad B_1 = -z_c(F_1' + 2F_2')R_c/3,$$

$$B_2 = 2(3F_1 - 3F_2) + z_c(F_1' - F_2')/15R_c^2, \quad B_3 = 2R_c^2[2F_1 - 2F_2 - z_c(F_1' - 2F_2')]/15.$$

Температура воды и напряженность электрического поля в центре стеклянной сферы вычисляются из формул (2.46)–(2.48) по заданному значению подводимой мощности электромагнитного поля.

2.12.4. Частные решения квазистационарного уравнения энергии. В качестве примера рассмотрим некоторые частные случаи решения квазистационарного уравнения энергии. Проведем расчет характеристик состояния нагретой воды в сферической емкости в поле заданного постоянного электромагнитного излучения.

Симметричное радиальное распределение температуры. Рассматривается случай, когда микроволновое излучение представляет собой ансамбль сферических волн для обеспечения радиальной симметрии в распределении температуры воды. Тогда в квазистационарном уравнении энергии (2.44) можно пренебречь вкладом азимутального кондуктивного переноса тепла, и уравнение энергии с граничными условиями запишется в таком виде:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{2}{3} \sigma E_0^2 (|e_r|^2 + 2|e_\theta|^2) = 0, \quad (2.49)$$

$$r = 0: dT/dr = 0; \quad r = R: r = R.$$

Радиальное распределение температуры воды в стеклянной сфере зависит от диссипации мощности электромагнитного излучения, и в области изменения аргумента $[0 \leq r \leq R_c]$ представляется в следующем виде:

$$T(r) = T_0 - (T_0 - T_c) \varphi(r) / \varphi(r_c), \quad (2.50)$$

где функция $j(r)$ находится по методике (п. 2.3, приложение 1) из численного решения следующего дифференциального уравнения:

$$\varphi'' + \frac{2}{r} \varphi' + \left(|e_r|^2 + |e_\theta|^2 \right) = 0, \quad \varphi(0) = \varphi'(0) = 0.$$

Распределение температуры в области газовой среды (воздуха) $[R_c \leq r \leq R]$, определяется аналитическим выражением из (2.49) через потенциал теплового потока:

$$S(r) = S_R + (S_c - S_R) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) / \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R} \right). \quad (2.51)$$

Поглощаемая мощность микроволнового излучения, напряженность электрического поля в центре шара и температура на поверхности стеклянной сферы находятся по разработанной методике для плоского слоя из формул:

$$T_c = T_0 - \frac{S_c}{q}, \quad q = \lambda_0 \frac{\varphi'_c}{\varphi_c} \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R} \right), \quad Q_d = 4\pi S_c / \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R} \right), \quad E_0^2 = \frac{3Q_d}{2\pi R_c \sigma_0 \varphi'_c}.$$

Подводимая мощность микроволнового излучения и коэффициент отражения определяются условиями неразрывности тангенциальных составляющих электромагнитных полей на границе стеклянной сферы:

$$k_r = \left| (\sqrt{\varepsilon_k} f_1 f_{2r}' - f_1' f_2) / (\sqrt{\varepsilon_k} f_1 f_2^{*'} - f_1' f_2^*) \right|^2, \quad Q = Q / (1 - k),$$

где $f_1(z) = \frac{\sin z}{z} - \cos z$, $z = k_0 \sqrt{\varepsilon_k} R_c$, $f_2(x) = \exp(ix)(1 + i/x)$, $x = k_0 R_c$.

Усреднение напряженности электрического поля. Для предварительных оценок характеристик микроволнового нагрева воды в сферической емкости полагается, что напряженность электрического поля зависит только от радиальной координаты, не изменяется в азимутальном направлении и находится путем интегрирования (усреднения) по углу θ :

$$E_c^2 = 1/2 \int_0^\pi |E|^2 \sin \theta d\theta. \quad (2.52)$$

Тогда решение уравнения энергии и другие характеристики микроволнового нагрева воды (2.45)–(2.47) запишутся в простой форме:

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq R_c: \quad S(r) &= S_0 - (S_0 + S_c) r^2 / R_c^2, \\ R_c < r \leq R: \quad S(r) &= S_c - (S_R - S_c)(1 - R_c / r) / (1 - R_c / R), \\ E_c &= (S_0 - S_c) / 12\sigma_0 R_c^2, \quad E_0^2 = 4E_c^2 / 3(|e_r|^2 + |e_\theta|^2), \\ S_0 &= S_c + (S_c - S_R) / 2(1 - R_c / R), \quad Q_d = 8\pi (S_0 - S_c) R_c. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Расчет характеристик квазистационарного состояния. Проводится расчет характеристик нагретой воды в стеклянной сфере, находящейся под действием постоянного электромагнитного излучения в центре микроволновой печи (см. рисунок 2.1). Для сравнения результатов расчета исходные данные берутся такими же, как в п. 2.3 и п. 2.10: $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 2, 4, 8 \text{ см}$, $T(0, r) = T_R = 20^\circ \text{C}$.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.34), при воздействии электромагнитного излучения на воду в течение длительного времени устанавливается стационарное состояние: какое количество электромагнитной энергии идет на нагрев воды, такое же количество тепла отводится теплопроводностью на стенки микроволновой печи. В микроволновой печи устанавливается определенное квазистационарное распределение температуры. Температура воды в центре сферы нелинейным образом зависит от подводимой

Рисунок 2.34 – Квазистационарное тепловое состояние воды в стеклянной сферической емкости в поле постоянного электромагнитного излучения: $f = 3$ ГГц, $d = 2$ (штрих-пунктирная линия), 4 (сплошная), 8 (пунктирная), см

мощности электромагнитного поля и размеров самой сферы: $T_0 = T_0(d, Q_n)$ (рисунок 2.34). В стеклянной сфере в радиальном направлении наблюдается заметное уменьшение распределения температуры воды по сравнению с изменениями температуры по сечению цилиндра или вдоль координаты x плоского слоя. С увеличением или уменьшением размеров сферы радиальный профиль температуры практически не изменяется и определяется в основном подводимой мощностью электромагнитного излучения и размерами сферы.

Качественное изменение температуры воды в центре сферы соответствует изменению температуры на оси цилиндра (рисунок 2.31), а количественно – для сферы температура воды в зависимости от подводимой мощности микроволнового излучения меняется более заметно. Температура воды линейно увеличивается в зависимости от значения поглощаемой водой мощности электромагнитного излучения Q_d (рисунок 2.34). В центре шара температура воды и величина Q_d определяются размерами сферы и подводимой мощностью электромагнитного излучения: $T_0 = T_0(d, Q_n)$, $Q_d = Q_d(d, Q_n)$.

Кипение воды. Для микроволнового нагрева воды до температуры кипения в стеклянной сфере диаметром $d = 2$ см необходимо подвести мощность электромагнитного излучения $Q_n > 6$ Вт, для $d = 4$ см это соответствует $Q_n > 7$ Вт, а для $d = 8$ см – $Q_n > 18$ Вт. Если, например, при $d = 8$ см вода в микроволновой печи уже нагрета до температуры $T_0 = T_{max} = 90^\circ\text{C}$, то согласно нелинейной зависимости $T_0(Q_n)$, для достижения температуры кипения значение Q_n необходимо снизить до 10 Вт (рисунок 2.34). Для размеров сферы $d = 2$ и 8 см существует минимальное значение подводимой мощности электромагнитного поля $Q_{n,min}$, когда температуру воды можно довести до температуры кипения: $d = 2$ см, $Q_{n,min} = 6$ Вт; $d = 8$ см, $Q_{n,min} = 18$ Вт. Если подводимая мощность микроволнового излучения меньше данных значений ($Q_n < Q_{n,min}$), то вода не будет нагрета до температуры кипения.

Коэффициент отражения излучения. При микроволновом нагреве воды в стеклянной сфере диаметром ($d = 2$ см) коэффициент отражения резко снижается от $k_r = 0,96$ до $0,4$. Если температуры воды на оси сферы $T_0 < 80^\circ\text{C}$, то электромагнитное излучение практически свободно проходит сквозь воду с незначительной диссипацией микроволновой мощности (менее 10 % от значения Q_n). В области температур ($80^\circ < T \leq T_k$) коэффициент отражения имеет значение $\sim 0,4$, т. е. более 60 % энергии электромагнитного поля идет на нагрев воды. Этот режим нагрева воды для сферы диаметром $d = 2$ см существенно отличается от нагрева, например, цилиндрического столба воды (рисунок 2.31) и тем более плоского слоя воды (рисунок 2.26).

С увеличением диаметра сферы наблюдается нелинейная зависимость $k_r(T_0)$ и $k_r(Q_n)$. Например, при $d = 4$ см в области температур $T_0 \sim 40^\circ\text{C}$ коэффициент отражения минимальный $k_r \sim 0,35$ относительно других размеров сферы $d = 2$ и 8 см. При дальнейшем изменении осевой температуры воды от 40° до 100°C ($d = 4$ см) коэффициент отражения возрастает до $k_r = 0,85$. Это указывает на то, что существует оптимальный размер сферы, при котором вода может быть эффективно нагрета до определенной температуры с минимальным значением коэффициента отражения и максимальной величиной диссипируемой в воде мощности электромагнитного излучения.

Амплитуда электрического поля изменяется в зависимости от значения подводимой мощности электромагнитного поля и от температуры нагретой воды. Модуль напряженности электрического поля максимален в центре сферы. Это намного больше, чем $|E_0|$ на оси цилиндра, и тем более в середине плоского слоя с симметричным подводом мощности микроволнового излучения. Закон изменения $|E_0(T_0)|$ практически «параболически» зависит

от осевого значения температуры воды. Причем значение $|E(r)|$ заметно увеличивается с повышением температуры воды в микроволновой печи. Для сравнения, например, для диаметра сферы $d = 2$ см, при достижении водой температуры кипения $T_0 = T_k$, максимальное значение модуля напряженности электрического поля в центре сферы $|E_0| = 20$ В/см, на оси цилиндра это составляет 12 В/см, а в центре плоского слоя всего 2,4 В/см (толщина плоского слоя, радиус сферы и цилиндра одинаковы и равны 2 см).

В воздухе, окружающем стеклянную сферическую емкость с водой, температура газа в радиальном направлении уменьшается к стенкам камеры быстрее, чем в воде. Изменение температуры от поверхности стеклянной ёмкости до значения температуры на охлажденных стенках микроволновой печи происходит практически обратно пропорционально расстоянию от стеклянных стенок с водой ($\sim 1/r$).

Модуль напряженности электрического поля $|E(r)|$ в воздухе резко возрастает от 100 В/см на границе стеклянной сферы до значения ~ 800 В/см на стенках микроволновой печи, для $d = 2$ см (рисунок 2.34). Отметим, что с увеличением осевой температуры T_0 , распределение $|E(r)|$ для тех же размеров сферы практически не изменяется по сечению микроволновой печи.

2.13. Влияние пузырьков газа на характеристики нагрева воды

При нагреве воды в микроволновой печи постепенно начинается процесс образования и выделения пузырьков газа на стенках стеклянной емкости или в самом объеме жидкости. С повышением температуры воды до температуры кипения, в жидкости происходит вначале постепенное, затем переходящее в непрерывное, выделение пузырьков газа. Особенность микроволнового нагрева воды состоит в том, что пузырьки газа начинают возникать в областях источников «джоулева тепла», распределенных по всему объему жидкости. В данных областях (пучностях) модуль напряженности электрического поля достигает максимального значения и происходит интенсивное выделение тепла вследствие диссипации мощности электромагнитного излучения.

Пузырьки газа состоят из насыщенного водяного пара. Вода при микроволновом нагреве уже не является однородной жидкостью, так как в каждом элементарном объеме воды присутствуют две фазы (жидкость-газ) и соответственно изменяются тепловые и электромагнитные свойства двухфазной среды. Поэтому для анализа особенностей микроволнового нагрева воды до температуры кипения необходимо учитывать наличие пузырьков газа и проводить расчет с учетом влияния двухфазного состава (жидкость-газ) на характеристики воды и электромагнитного излучения. Основная сложность теоретических расчетов состоит в том, что в справочной литературе практически отсутствуют данные по изменению значений коэффициентов $K = (\lambda, C_p, \rho, \varepsilon_r, \varepsilon_i, \sigma)$ двухфазной жидкости в зависимости от температуры, давления, концентрации водяных паров и частоты электромагнитного поля.

Модель. Для оценки влияния пузырьков газа на характеристики микроволнового нагрева воды воспользуемся простейшей линейной моделью, используемой в работе [23]. Для этого вводится эффективный коэффициент ($K_{эфф}$), учитывающий состав двухфазной среды (жидкость-газ) через заданные коэффициенты воды и газа (K_v – воды, K_g – газа):

$$K_{эфф} = K_{\theta} + (1 - \theta)K_r, \quad (2.54)$$

где $\theta = V_r/V_b$ – отношение объема газовых пузырьков к полному объему воды. Для плоского слоя параметр θ выражается через его толщину и линейные размеры пузырьков газа:

$$\theta = (R_r / R)^3 = (d_r / d)^3.$$

Результаты расчета. Проводится расчет характеристик микроволнового нагрева плоского слоя воды с учетом влияния пузырьков газа в зависимости от изменения параметра: $\theta = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$. Исходные данные задаются так же, как и в п. 2.3. Коэффициенты воды и газа $K_{\theta}, K_r = (\lambda, C_p, \rho, \varepsilon_r, \varepsilon_i)$ берутся из таблиц 1.1, 1.3.

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.35), изменение параметра θ оказывает существенное влияние на характеристики нагрева воды. С увеличением θ уменьшается амплитуда напряженности электрического поля и происходит сдвиг фазы колебаний (рисунки 2.30). Как следствие этого, профиль температур становится более однородным по сечению плоского слоя, снижается перепад температур между минимальными и максимальными значениями, уменьшается экранирование водой приосевых областей от воздействия электромагнитного излучения. С ростом θ максимумы изменений характеристик $E_{\theta}(t)$, $Q_d(t)$ и $k_r(t)$ уменьшаются. Полное время нагрева воды до температуры кипения при значении параметра $\theta = 0,1$ достигает значения $t_k = 302$ с. С уменьшением или увеличением параметра θ продолжительность нагрева двухфазных сред возрастает (см. рисунок 2.35).

Приведенные выше расчеты анализа влияния числа пузырьков газа (параметр θ) на характеристики микроволнового нагрева воды, являются приближенными оценками. В реальных условиях необходимо учитывать образование, рост и динамику движения пузырьков газа, обтекание пузырьков газа жидкостью, конвективный перенос тепла и т. д.

Следует также отметить, что для однородной жидкости, очищенной от различных включений (пылинок, растворенных газов и т. д.), в стеклянной емкости с гладкими стенками вода может закипать при значительном ее перегреве, вплоть до температур ~ 140 °C [14, 15].

2.14. Линейное изменение подводимой мощности электромагнитного излучения

Проводится численный анализ характеристик нагрева плоского слоя воды в микроволновой печи при линейном законе изменения подводимой мощности электромагнитного поля:

$$Q_n(t) = at, \quad a = Q_n(t_k) / t_k, \quad (2.55)$$

где коэффициент a (угол наклона прямой $Q_n(t)$) равен скорости изменения подводимой мощности электромагнитного излучения за время нагрева воды до температуры кипения.

Для сравнения полученных результатов проводится расчет характеристик нагрева плоского слоя воды и электромагнитного поля при тех же начальных и исходных данных, что и в п. 2.3: $f = 3$ ГГц, $d = 2$ см, $T_R = T(x, 0) = 20$ °C. Рассматриваются следующие варианты скорости изменения $Q_n(t)$ (таблица 2.5).

Рисунок 2.35 – Распределение температуры воды и напряженности электрического поля ($\theta = 0,1$ – верхний первый ряд, $\theta = 0,3$ – второй ряд) и изменение характеристик нагрева воды в микроволновой печи: $\theta = 0$ (сплошная линия, $t_k = 346$ с), $0,1$ (пунктирная, $t_k = 302$ с), $0,3$ (штрих-пунктирная, $t_k = 422$ с), $0,5$ (точки); $Q = 10$ Вт/см², $R_c = 2$ см, $f = 3$ ГГц

Рисунок 2.36 – Изменение характеристик нагрева воды и микроволнового излучения при линейном законе изменения мощности электромагнитного поля:
 $a = 1$ сплошная линия, $0,5$ – пунктир, $0,2$ – штрих-пунктир, $0,1$ – точки; $f = 3 \text{ ГГц}$, $d = 2 \text{ см}$

Таблица 2.3 – Изменение плотности потока подводимой мощности электромагнитного поля от времени нагрева воды

$a, \text{Вм/см}^2\text{с}$	1,0	0,5	0,2	0,1
$t, \text{с}$	79,5	113,4	181,8	259,9

Как следует из результатов расчета (рисунок 2.36, таблица 2.3), линейная скорость увеличения подводимой мощности микроволнового излучения оказывает существенное влияние на все характеристики нагрева воды и распространение электромагнитного поля по сравнению с воздействием на воду постоянной мощности излучения (см. п. 2.4, рисунок 2.3). Чем интенсивней изменяется мощность микроволнового излучения и растет a – угол наклона прямой $Q_n(t)$ (2.55), тем быстрее происходит нагрев воды (см. таблицу 2.3). Изменение осевой температуры от времени носит монотонный параболический характер $T_o(t) \sim t^2$ (рисунок 2.36). По мере нагрева воды температура быстро возрастает у поверхности стеклянных стенок ёмкости. Начинают усиливаться колебания в распределении температуры по сечению плоского слоя. С увеличением коэффициента a амплитуда колебаний температуры возрастает, например, при $a = 1$ максимальное изменение в колебаниях температуры составляет $\Delta T = 20$ °C. С увеличением времени микроволнового нагрева воды все заметнее появляется эффект экранирования электромагнитного излучения приосевых областей пристеночным слоем воды.

Распределение температуры воздуха в микроволновой печи становится не линейным, как это было при $Q_n(t) = \text{const}$ (см. рисунок 2.14), а изменяется по закону ($\sim 1/x$). Температура по сечению плоского слоя $T(x, t)$ повышается с увеличением коэффициента a .

Время нагрева воды до температуры кипения для различных значений коэффициента a изменяется практически по следующему закону:

$$t_k = t_k(a=1) / a^{0.5}.$$

С увеличением скорости изменения мощности подводимого электромагнитного поля время нагрева воды уменьшается. Характеристики микроволнового излучения (E_o , k_r , k_d , Q_d) изменяются монотонно до тех пор пока температура воды не достигнет ~ 60 °C. Далее, по мере нагрева воды, наблюдается резкое (резонансное) увеличение данных характеристик. Коэффициент отражения электромагнитных волн несколько возрастает при нагреве воды до 60 °C, а при увеличении температуры воды до температуры кипения быстро уменьшается практически до нуля ($k_r = 0,05$). При этом диссипация мощности микроволнового излучения возрастает, а осевое значение напряженности электрического поля увеличивается практически в пять раз (рисунок 2.36).

Озеро Сары-Челек. Кыргызстан

Глава 3

ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВОДЫ

Разработаны теоретические модели расчета микроволнового нагрева воды в круглом и прямоугольном волноводах. На основе решения двух- и трехмерных уравнений магнитной гидродинамики проведен численный анализ характеристик нагрева воды и электромагнитного поля в зависимости от изменения подводимой мощности и частоты микроволнового излучения, размеров волновода и стеклянной ёмкости с водой, а также сравнение результатов расчета и эксперимента.

3.1. Нагрев воды в круглом волноводе

3.1.1. Моделирование процесса нагрева воды. Предлагается математическая модель микроволнового нагрева воды в цилиндрической стеклянной емкости, расположенной в центре круглого волновода с идеально проводящими стенками (рисунок 3.1). Вследствие круговой симметрии волновода, распределение температуры воды и распространение электромагнитной волны E_{0l} рассматривается в двумерном приближении. Последнее допущение накладывает условие на радиальные размеры волновода, радиус которого должен быть таким, чтобы длина электромагнитной волны возбуждения E_{0l} превышала критическую длину более высоких мод поперечных электромагнитных ТМ-волн.

Рисунок 3.1 – Схема микроволнового нагрева воды в круглом волноводе:
1 – столб воды радиуса R_m и длиной L_m в стеклянной цилиндрической емкости, расположенной в центре волновода на расстоянии L_0 от начального сечения, 2 – круглый волновод с металлическими стенками радиуса R и длиной L

1. Математическая модель нагрева воды. При моделировании процесса нагрева воды электромагнитным излучением в круглом волноводе с металлическими стенками (рисунок 3.1) учитывается осевая симметрия ($\partial/\partial\varphi = 0$). Вода в стеклянной цилиндрической емкости и окружающий её воздух полагаются неподвижными. Электромагнитная волна, распространяющаяся по круглому волноводу (рисунок 3.1), имеет следующие компоненты векторов электрического поля и индукции магнитного поля:

$$\vec{E} = \vec{E}(E_r; 0; E_z) \exp[i(\omega t - kz)], \quad \vec{B} = \vec{B}(0; B_\varphi = B; 0) \exp[i(\omega t - kz)]. \quad (3.1)$$

Уравнения. Описание процесса микроволнового нагрева воды в круглом волноводе основано на решении нестационарного уравнения баланса энергии и уравнений Максвелла (1.5). Для удобства решения система уравнений Максвелла (1.5) приводится к волновому уравнению относительно индукции магнитного поля, а в уравнении энергии источники тепла выражаются через компоненты вектора электрического поля (3.1).

Тогда уравнение баланса энергии (1.5) и волновое уравнение для индукции магнитного поля в цилиндрической системе координат (r, φ, z) (рисунок 3.1) запишутся в следующем виде:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_i (E_r E_r^* + E_z E_z^*);$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r \varepsilon_k} \frac{\partial r B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} B = 0. \quad (3.2)$$

Из уравнений Максвелла (1.5) компоненты вектора напряженности электрического поля выражаются через индукцию магнитного поля следующим образом:

$$E_r = i \frac{c^2}{\omega \varepsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z}, \quad E_z = -i \frac{c^2}{\omega \varepsilon_k} \frac{1}{r} \frac{\partial r B}{\partial r}. \quad (3.3)$$

Краевые условия. Для решения системы уравнений (3.2)–(3.3) задаются начальные и граничные условия по всему прямоугольному контуру расчетной области круглого волновода: $[t = 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq L]$ (рисунок 3.1).

1. При определении температуры воды из уравнения баланса энергии (3.2) предполагается, что в начальный момент времени температура воды в цилиндрической емкости постоянна и равна температуре стеклянных стенок емкости, волновода и окружающего воздуха. Выполняются условия азимутальной симметрии на оси и постоянство температуры на охлаждаемых стенках волновода:

$$t = 0, 0 \leq z \leq L: T(r, z, 0) = T_R;$$

$$t \geq 0, 0 \leq z \leq L; r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0; r = R: T = T_R;$$

$$t \geq 0, 0 \leq r \leq R; z = 0; z = L: T = T_R.$$

2. Для определения индукции магнитного поля задаются условия на идеально проводящих металлических стенках волновода, выраженных через равенство нулю тангенциальной составляющей напряженности электрического поля, и условия излучения E_{0l} -волны во входном и выходном сечении волновода:

$$0 \leq z \leq L; r = 0: B = 0; r = R: \frac{\partial r B}{\partial r} = 0;$$

$$0 \leq r \leq R; z = 0: \frac{\partial B}{\partial z} - ikB = -2ikB_l J_1 \left(v_{01} \frac{r}{R} \right) \exp(-ikz); z = L: \frac{\partial B}{\partial z} + ikB = 0,$$

$$k = \sqrt{(\omega / c)^2 - (v_{01} / R)^2},$$

где k – продольное волновое число ТМ-волны для моды E_{0l} ; $J_1(v_{01}r/R)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка; v_{01} – 1-й корень функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

Условия электромагнитного излучения соответствуют решению приведенного волнового уравнения (3.2) в «пустом» волноводе при значениях диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r = 1$, $\varepsilon_i = 0$:

$$z = 0: B = [B_l \exp(-ikz) + B_R \exp(ikz)] J_1(v_{01}r/R),$$

$$z = L: B = B_T \exp(-ikz) J_1(v_{01}r/R),$$

здесь B_l, B_R, B_T – амплитуды падающей (подводимой), отраженной и прошедшей электромагнитной волны – E_{0l} . Применимость задания граничных условий для индукции магнитного поля во входном и выходном сечении волновода обусловлена удаленностью границ ($z = 0; z = L$) от области возмущения электромагнитного поля цилиндрической стеклянной емкости с водой и выбором радиуса волновода. Радиус волновода устанавливается таким образом, чтобы длина электромагнитной волны возбуждения волновода превышала

критические длины всех типов, кроме волн H_{11} и E_{01} . Отметим далее, что в силу осевой симметрии задачи, электромагнитная волна H_{11} не учитывается.

Амплитуда падающей E_{01} -волны вычисляется по заданному значению подводимой мощности электромагнитного поля Q_I , а амплитуда и мощность отраженной электромагнитной волны Q_R находится из граничного условия при $z = 0$:

$$B_I = \sqrt{\frac{2\omega P_I}{\varepsilon_0 c^4 k J_1^2(v_{01}) \pi R^2}}; B_R = -\frac{\partial B / \partial z + ikB}{\partial B / \partial z - ikB} \Big|_{0 < r < R}; Q_R = \frac{B_R B_R^*}{B_I B_I^*} Q_I. \quad (3.4)$$

Баланс энергии. Корректность решения уравнений (3.2) контролируется интегральным соотношением баланса энергии электромагнитного поля:

$$Q_I = Q_R + Q_T + Q_d. \quad (3.5)$$

Мощность прошедшей электромагнитной волны сквозь канал волновода и объем жидкости, а также мощность диссипации поглощаемого электромагнитного излучения водой, определяются следующими выражениями:

$$Q_T = \frac{1}{\mu_0} 2\pi \int_0^R \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_r B_r^*) r dr; Q_d = 2\pi \int_0^R \int_0^L \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_i (E_r E_r^* + E_z E_z^*) r dr dz. \quad (3.6)$$

Теплофизические и переносные свойства воды, воздуха и стекла при атмосферном давлении берутся из таблиц 1.1–1.3 (глава 1). Температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости воды при $f = 3 \text{ ГГц}$ заимствована из таблицы 1.1. Электромагнитные свойства воздуха и стекла задаются соответственно: $e_r = 1$, $e_i = 0$; $e_r = 4$, $e_i = 0$.

2. Метод решения. Для численного решения системы уравнений (3.2)–(3.6) применяется метод прямых [49]. Система дифференциальных уравнений (3.2) и граничные условия дискретизируются в пространственной области методом контрольного объема [50] на прямоугольной неравномерной сетке. Сопряженность теплообмена на границах различных сред (вода – стекло – воздух – металлические стенки волновода) достигается введением гармонических средних коэффициентов переноса на гранях контрольных объемов [50]. Полученный дискретный аналог дифференциальных уравнений сводится к дифференциально-алгебраической системе.

Апостериори установлена применимость методики расчета, согласно которой полудискретный аналог уравнения баланса энергии (3.2) интегрируется по времени методом Рунге–Кутты с заданной точностью одновременно с решением конечно-разностного аналога волнового уравнения (3.2). На каждом этапе решения автоматически выбирается и устанавливается шаг интегрирования.

Решение задачи заканчивается в тот момент времени ($t = t_k$), когда при атмосферном давлении температура какой-либо точки воды в заданной расчетной области цилиндрической стеклянной ёмкости достигает значения температуры кипения: $T(r, z, t = t_k) = T_k = 100^\circ\text{C}$.

3. Результаты расчета. Проводится численный расчет микроволнового нагрева воды в круглом волноводе в зависимости от геометрических размеров цилиндрической емкости, подводимой мощности и частоты электромагнитного излучения. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными исследованиями [8], где столб воды находится в стеклянном цилиндрическом стакане с медной проволочной оплеткой, играющей роль

круглого волновода. Путем измерения температуры воды была определена величина поглощенной водой мощности электромагнитного излучения $\sim 480 \text{ Вт}$, которая соответствовала средней мощности магнетрона и задавалась в проводимых ниже численных расчетах.

Исходные данные. Проводится теоретический анализ изменения характеристик микроволнового нагрева воды от начального распределения температуры $T(r, z, 0) = T_R = 27^\circ \text{C}$ до температуры кипения $T(r, z, t_k) = 100^\circ \text{C}$. Расчет проводится при задании следующих значений внешних регулируемых параметров: подводимая мощность микроволнового излучения $Q_{\text{л}}(t) = Q_{\text{н}}(t) = 240, 480 \text{ Вт}$; частота электромагнитного поля $f = 2, 45 \text{ ГГц}$; внутренний радиус волновода $R = 50 \text{ мм}$; толщина стеклянных стенок ёмкости 2 мм ; радиус и высота столба воды в цилиндрической ёмкости: $R_m = 30, 48 \text{ мм}$ и $L_m = 40, 80 \text{ мм}$; длина расчетной области $L = 120 \text{ мм}$; расстояние от входной начальной границы ($z = 0$) до стеклянной ёмкости с водой со стороны подвода мощности электромагнитного поля $L_0 = 20 \text{ мм}$ (рисунок 3.1).

Изменение температуры. При воздействии электромагнитного излучения на цилиндрическую ёмкость с водой, часть излучения отражается от воды, а другая часть проходит и поглощается водой. В результате суперпозиции электромагнитных волн, пучности и узлы электромагнитного поля распределяются по всему объему жидкости. В пучностях – области максимального значения модуля напряженности электрического поля $|\vec{E}|$, происходит поглощение (диссипация) мощности электромагнитного излучения и, как следствие, в источниках уравнения баланса энергии наблюдается интенсивное выделение «джоулева тепла» ($Q_E = \sigma |\vec{E}|^2 / 2$).

В течение времени микроволнового нагрева температура воды в области источников тепла монотонно возрастает. Происходит формирование нелинейных пространственных изменений температуры (рисунки 3.2, 3.3), возникают потоки тепла, которые определяются неоднородностью распределения температуры в источниках тепловыделения Q_E и действием теплопроводности. Можно отметить, что наблюдается заметное увеличение температуры воды на оси симметрии, вблизи средней части и торца (дна) цилиндрической ёмкости. С удалением от оси в радиальном направлении температура воды быстро, экспоненциально снижается, как следствие уменьшения выделения тепла в источниках уравнения баланса энергии и влияние «холодных» стенок ёмкости (рисунки 3.2, 3.3).

За время нагрева воды микроволновым излучением $0 \leq t \leq t_k$ от начальной температуры до температуры кипения $T(r, z, t = t_k) = T_k$, вследствие относительно низкой теплопроводности, поверхность теплового фронта представляет собой немонотонную функцию температуры $T(r, z, t)$ с характерными периодическими минимумами и максимумами, соответствующими областям диссипации мощности электромагнитного излучения и выделения источников тепла Q_E (рисунки 3.2, 3.3).

Электромагнитное излучение. На границах раздела двух сред (вода – стекло, стекло – воздух, воздух – металлические стенки волновода) предполагается непрерывность температуры и потоков тепла, а компоненты электрического поля соответствуют граничным условиям непрерывности тангенциальных составляющих вектора $\vec{E}$ и разрыва его нормальных составляющих. Изменение во времени пространственного распределения электромагнитных полей $\vec{E}, \vec{B}$ (рисунок 3.4) определяет их влиянием на электрические и теплофизические свойства воды в процессе нагрева.

Рисунок 3.2 – Распределение температуры воды и источников тепловыделения Q_E в процессе микроволнового нагрева: $L_m = 80$ мм, $R_m = 30$ мм, $Q_l = 480$ Вт

Рисунок 3.3 – Изменение температуры воды в цилиндрической емкости в аксиальном (слева, $r = 0$) и радиальном (справа, $z = 6$ см) направлениях – через каждые 10 с

Рисунок 3.4 – Распределения индукции магнитного поля и компонент напряженности электрического поля при нагреве воды: $L_m = 80 \text{ мм}$, $R_m = 30 \text{ мм}$, $Q_l = 480 \text{ Вт}$

Напряженность электрического поля $\vec{E}$ максимальна вдоль стеклянной поверхности цилиндрического стакана (рисунок 3.4). Компоненты напряженности электрического поля E_r , E_z практически соизмеримы по величине, но их влияние на нагрев воды различен: радиальная составляющая E_r возрастает от оси цилиндра к стеклянным стенкам емкости с водой, а аксиальная составляющая E_z максимальна вблизи оси симметрии и вдоль стенок. При взаимодействии с водой основной вклад в нагрев воды вносит компонента E_z (рисунок 3.4), которая способствует формированию трех больших максимумов источников тепла Q_E , соответственно и температуры воды вблизи оси цилиндра в аксиальном направлении (рисунки 3.2, 3.3). Остальные максимумы $\vec{E}$, распределенные по всему объему воды в цилиндрической емкости, уменьшаются в аксиальном и радиальном направлениях к стеклянным стенкам.

Наблюдается сложная картина взаимодействия потока электромагнитного излучения (вектора Умова–Пойнтинга) с водой (рисунок 3.5). Незначительная часть потока излучения $\sim 15\%$, подводимого к емкости с водой, отклоняется в сторону стеклянных стенок и распространяется внутри стекла, как по оптическому волноводу. Стенки стеклянной емкости становятся источником электромагнитного излучения, которое взаимодействует с водой вдоль боковой поверхности цилиндра и частично, от нижнего основания. Отметим, что с боковой поверхности цилиндра излучение входит в воду под углом $\sim 45^\circ$, что практически соответствует закону Снеллиуса. От поверхности нижнего основания (торца) цилиндра излучение разделяется на два потока: один направлен в объем воды навстречу подводимому излучению, а другой – в воздух в сторону увеличения z в направлении распространения подводимого потока излучения. Причем в воздухе, с удалением от поверхности торца цилиндра, наблюдается некоторое усиление (фокусировка) мощности данного потока излучения, вызванное по-видимому, влиянием емкости с водой.

Другая часть потока электромагнитного излучения $\sim 35\%$, подводимого в начальном сечении к воде, также отклоняется в сторону стеклянных стенок, отражается от них, взаимодействует с водой и потоком излучения, идущего от стенок стакана. Наблюдается сложная картина суперпозиции электромагнитных волн, в результате которой в емкости с водой образуются пучности и узлы, происходит усиление и уменьшение потока излучения. Большая часть излучения $\sim 75\%$ концентрируется в воде и взаимодействует с водой, а незначительная часть излучения вблизи оси симметрии $\sim 15\%$ отражается обратно в волновод навстречу подводимому излучению (рисунок 3.5).

Диссипация мощности электромагнитного излучения, приводящая к увеличению температуры воды в цилиндрической емкости, практически постоянна в течение первых 10 секунд времени нагрева воды ($Q_d/Q_I = 50\%$), а далее начинает незначительно уменьшаться (рисунок 3.6). Подобное, но обратное изменение с течением времени наблюдается и для прошедшей мощности электромагнитного излучения ($Q_T/Q_I = 29\%$), которая проходит в волноводе, в основном, не через воду. Полное количество прошедшей мощности электромагнитного излучения Q_T определяется двумя потоками: один распространяется внутри стенок стеклянной емкости, как по волноводу, а другой по воздуху между стенками волновода и боковой поверхностью цилиндрической емкости (рисунок 3.5). С увеличением времени нагрева воды, отраженная мощность микроволнового излучения Q_R по отношению к значениям Q_T и Q_d , наоборот, начинает немного возрастать ($Q_R/Q_I = 21\%$).

Рисунок 3.5 – Поле направлений вектора Умова–Пойнтинга при $t = 30$ с

Рисунок 3.6 – Изменение поглощенной, прошедшей и отраженной мощностей электромагнитного излучения в процессе нагрева столба воды:
 $L_m = 80$ мм, $R_m = 30$ (справа), 48 (слева) мм, $Q_T = P_T$, $Q_R = P_R$, $Q_d = P_d$, $Q_I = P_I = 480$ Вт

В процессе микроволнового нагрева воды из баланса мощности электромагнитного излучения (рисунок 3.6) следует, что при заданном значении подводимой мощности $Q_i = 480 \text{ Вт}$, мощность диссипации излучения составляет $\sim 250 \text{ Вт}$; отраженная $\sim 100 \text{ Вт}$, а прошедшая $\sim 130 \text{ Вт}$. Этот результат соответствует экспериментальным данным [8] и отражает независимость поглощаемой мощности электромагнитного излучения в воде от времени.

Влияние теплопроводности. При заданной подводимой мощности микроволнового излучения $Q_i = 480 \text{ Вт}$ в стеклянном цилиндрическом стакане с размерами ($R_m = 3 \text{ см}$, $L_m = 8 \text{ см}$) время нагрева воды до температуры 90°C составляет около 20 с , а время достижения температуры кипения соответствует $t_k \approx 30 \text{ с}$. Это существенно меньше характерного времени действия теплопроводности $t_\lambda \sim (\rho C_p l^2 / \lambda)$, которое на пространственном масштабе $L \sim 1 \text{ см}$ имеет порядок $t_\lambda \sim 600 \text{ с}$. Поэтому влиянием теплопроводности на динамику “быстрого” нагрева воды микроволновым излучением можно пренебречь.

Это подтверждают результаты расчета микроволнового нагрева воды, проводимые в главе 2 с учетом и без учета теплопроводности, и данные эксперимента [8], полученные из сравнения времени нагрева воды микроволновым излучением и времени проникновения теплового фронта (температуры) вглубь столба воды.

Влияние размеров емкости с водой. Рассмотрим изменение характеристик микроволнового нагрева воды в зависимости от размеров стеклянной емкости: радиус цилиндрического стакана задавался равным $R_m = 30$ и 48 мм , а продольные размеры – высота цилиндра $L_m = 40$ и 80 мм . Остальные начальные условия и внешние регулируемые параметры берутся такими же, как и выше.

Влияние радиуса емкости. Как следует из численных результатов (рисунки 3.6, 3.7), с увеличением радиального размера стеклянной емкости с водой с 30 до 48 мм возрастают почти на 30% мощность диссипации электромагнитного излучения ($Q_d/Q_i = 82 \%$) и КПД нагрева воды. Отраженная мощность излучения для емкости с водой для радиуса $R_m = 48 \text{ мм}$, наоборот уменьшается на 4% ($Q_r/Q_i = 17 \%$), а прошедшая – практически отсутствует ($Q_t/Q_i \leq 1 \%$) (рисунок 3.6). Это объясняется тем, что при больших размерах стеклянной емкости $R_m = 48 \text{ мм}$ увеличиваются объем воды и площадь её поверхности при взаимодействии с подводимым потоком электромагнитного излучения. В поперечном сечении волновода, а это $23/25$ площади его поверхности, вода практически полностью экранирует и поглощает электромагнитное излучение. Изменение прошедшей мощности составляет всего менее 1% и обусловлено, по-видимому, прохождением излучения между стенками волновода и боковой поверхностью цилиндра, а возможно частично, через боковые стеклянные стенки и нижнее основание цилиндра.

С увеличением поперечного размера емкости с водой качественно изменяется процесс микроволнового нагрева: вблизи начального сечения происходит повышение температуры воды практически по всей площади стеклянного цилиндра (рисунок 3.7). Максимальное выделение тепла в воде наблюдается в средней части цилиндрической емкости и вблизи боковых стеклянных стенок. С течением времени тепловой фронт распространяется к торцевому сечению цилиндра.

Время нагрева воды микроволновым излучением заметно увеличивается и составляет порядка 80 сек , что почти в четыре раза медленнее предыдущего случая, когда радиус стеклянного цилиндра был равен $R_m = 30 \text{ мм}$.

Рисунок 3.7 – Распределение температуры воды в процессе микроволнового нагрева:
 $L_m = 80 \text{ мм}, R_m = 48 \text{ мм}, Q_i = 480 \text{ Вт}$

Влияние высоты емкости. Как следует из результатов расчета (рисунки 3.8, 3.9), при уменьшении высоты стеклянной ёмкости с водой в два раза, качественного изменения тепловых и электромагнитных характеристик нагрева воды микроволновым излучением не наблюдается (рисунки 3.2–3.6, 3.8, 3.9). Количественно можно отметить (рисунок 3.9), что мощность диссипации электромагнитного излучения уменьшается в воде на 14 % и составляет ($Q_d/Q_l = 36\%$), заметно возрастает мощность прошедшей электромагнитной волны до значения ~ 278 Вт ($Q_T/Q_l = 58\%$) и снижается мощность отраженной волны ($Q_R/Q_l = 6\%$). Время нагрева воды микроволновым излучением до температуры кипения составляет менее 20 с, что гораздо быстрее предыдущих вариантов расчета.

Влияние подводимой мощности излучения. Для оценки влияния подводимой мощности микроволнового излучения на нагрев воды, проводится расчет при $Q_l = 240, 480$ Вт. Остальные условия берутся без изменения такими же, как и выше.

Из результатов следует (рисунки 3.9, 3.10), что с уменьшением подводимой мощности микроволнового излучения в два раза, качественного изменения характеристик нагрева воды не наблюдается. Заметно увеличивается время нагрева воды $t_k \sim 120$ с.

3.2. Микроволновой нагрев воды с учетом динамики течения

3.2.1. Математическая модель. Для оценки влияния конвективных потоков тепла на микроволновой нагрев воды в круглом волноводе предполагается, что течение воды в цилиндрической стеклянной емкости за счет естественной конвекция – ламинарное, емкость сверху закрыта плоской стеклянной крышкой, чтобы поверхность воды в процессе нагрева оставалась неподвижной. Круглый волновод располагается вертикально вверх (рисунок 3.1), а направление вектора ускорения свободного падения совпадает с координатой z . Температура воздуха, окружающего цилиндрическую емкость с водой, постоянна и равна температуре стенок волновода.

Уравнения. Для моделирования процесса микроволнового нагрева воды с учетом динамики течения, воспользуемся нестационарными уравнениями магнитной гидродинамики: непрерывности, Навье-Стокса, баланса энергии и Максвелла (1.5), которые в цилиндрической системе координат запишутся так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) &= 0; \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2\eta v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{2}{3} \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]; \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{2}{3} \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] - (\rho_R - \rho) g_z; \end{aligned} \quad (3.7)$$

Рисунок 3.8 – Распределение температуры воды в процессе микроволнового нагрева:
 $L_m = 40 \text{ мм}, R_m = 30 \text{ мм}, Q_i = 480 \text{ Вт}$

Рисунок 3.9 – Изменение поглощаемой, прошедшей и отраженной мощности электромагнитного излучения в процессе нагрева воды:
 $L_m = 40 \text{ мм}, R_m = 30 \text{ мм}, Q_i = P_i, Q_R = P_R, Q_d = P_d, Q_l = 240$ (слева)

Рисунок 3.10 – Распределение температуры воды в осевом ($r = 0$) и радиальном ($z = 6 \text{ см}$) направлениях через каждые 10 с при $Q_i = 240 \text{ Вт}$

$$\begin{aligned}\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_i (E_r E_r^* + E_z E_z^*); \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r \varepsilon_k} \frac{\partial r B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} B &= 0; \\ E_r &= i \frac{c^2}{\omega \varepsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z}, \quad E_z = -i \frac{c^2}{\omega \varepsilon_k} \frac{1}{r} \frac{\partial r B}{\partial r},\end{aligned}$$

где $\vec{V} = (V_r = v, V_\varphi = 0, V_z = u)$ – скорость; $\vec{g} = (g_r = 0, g_\varphi = 0, g_z = g)$ – ускорение свободного падения; $\rho_R = \rho(T_R)$ – плотность воды на границах емкости.

Краевые условия. Для решения системы уравнений магнитной гидродинамики (3.7) задаются начальные условия ($t = 0$), а граничные условия устанавливаются по всему прямоугольному контуру расчетной области круглого волновода $[0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq L]$. Для индукции магнитного поля во входном и выходном сечениях волновода и на идеально проводящих металлических стенках (рисунок 3.1), граничные условия задаются такими же, как и в п. 3.1.1.

При определении скорости и температуры воды из уравнений Навье-Стокса и баланса энергии (3.7) предполагается, что в начальный момент времени вода в цилиндрической емкости неподвижна, температура воды постоянна и равна температуре стенок емкости, волновода и окружающего воздуха. Выполняются следующие граничные условия: на оси координат – симметрия, на стеклянных стенках емкости и канала волновода – «прилипание» (скорость воды и воздуха равны нулю), на охлаждаемых стенках волновода – температура постоянна:

$$\begin{aligned}t = 0, 0 \leq z \leq L: T(r, z, 0) &= T_R; \\ t \geq 0, L_0 \leq z \leq L_0 + L_m; r = 0: \frac{\partial p}{\partial r} &= 0; \frac{\partial u}{\partial r} = 0; v = 0; r = R: u = v = 0, \\ 0 \leq z \leq L; r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} &= 0; r = R: T = T_R; \\ t \geq 0, 0 \leq r \leq R; z = L_0; z = L_0 + L_m: u &= v = 0, T = T_R.\end{aligned} \quad (3.8)$$

Метод решения. Система уравнений (3.7) и граничные условия (3.8) решаются методом контрольного объема на прямоугольной неравномерной сетке по неявной схеме. Для расчета гидродинамических характеристик используются смещенные сетки и алгоритм SIMPLER [50]. Определение тепловых и электромагнитных характеристик нагрева воды и микроволнового излучения реализуется методом решения, разработанным в п. 3.1.2.

3.2.2. Результаты расчета. Проводится численный расчет микроволнового нагрева воды в круглом волноводе на волне E_{01} , с учетом скорости течения воды и конвективного переноса тепла, при тех же начальных условиях и исходных данных, что и в п. 3.1.3.

Физика микроволнового нагрева воды. Как следует из результатов расчета (рисунки 3.11, 3.12), при воздействии микроволнового излучения на воду происходит суперпозиция подводимой и отраженной электромагнитных волн. Пучности и узлы электромагнитного поля распределяются фактически по всему объему жидкости. Вследствие интенсивной диссипации мощности микроволнового излучения в областях пучности выделяется

«джоулево тепло» ($Q_E = \sigma|E|^2/2$ – источники в уравнении энергии), которое идет на нагрев воды. В узлах электромагнитного поля и вблизи стенок емкости температура воды остается относительно «холодной». Разность температур в соседних точках (объемах) воды приводит к появлению кондуктивных потоков тепла и, благодаря действию теплопроводности, происходит «выравнивание» температуры по всему объему воды в стеклянной емкости. Теплопроводность отводит тепло от нагретых областей (источников тепла) в область холодных слоев воды и стенкам цилиндрической емкости.

Гидродинамика микроволнового нагрева воды. С увеличением температуры воды уменьшается её плотность и увеличивается удельный объем. В гравитационном поле Земли, из-за действия силы Архимеда, нагретые «легкие» слои воды всплывают вверх, в область низкой гравитации, а холодные тяжелые слои воды с большой плотностью (большим весом) наоборот, опускаются вниз. Градиент гидродинамического давления приводит к образованию потоков жидкости из областей пучности электрического поля вверх к поверхности стеклянной крышке емкости. По всему объему жидкости образуется система вихревых гидродинамических ячеек с центрами в пучностях электрического поля.

Рисунок 3.11 – Динамика изменения температуры воды и компонент скорости течения в аксиальном (а, $r = 0$) и радиальном (б, $z = 6$ см) направлениях:
 $L_m = 80$ мм; $R_m = 30$ мм; $Q_i = 480$ Вт

Рисунок 3.12 – Динамика изменения линий тока и температуры воды (с шагом $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) в цилиндрической емкости (желтые прямоугольные линии) с тонкой стеклянной крышкой вверху: $L_m = 80\text{ мм}$; $R_m = 30\text{ мм}$; $Q_l = 480\text{ Вт}$

В начальные моменты времени ($t < 10$ с) в емкости формируется вихревая гидродинамическая картина циркуляции воды (рисунки 3.1–3.12): в приосевой области нагретая вода поднимается вверх навстречу потоку излучения (аксиальная скорость воды отрицательна), далее натекает на поверхность крышки цилиндра и движется радиально, постепенно охлаждаясь, к боковым стенкам емкости, затем опускается вниз вдоль «холодных» стенок, натекает на поверхность нижнего основания цилиндра и растекается радиально в направлении к оси симметрии. В емкости цилиндра образуется вихревая торoidalная картина течения с приосевым циркуляционным потоком «легкой» воды в верх навстречу излучению и пристеночным «тяжелым» потоком воды в вниз. Максимальная скорость течения воды на оси симметрии составляет $\sim 3,5$ см/с (рисунок 3.12).

Далее с течением времени $t \geq 10$ с (рисунок 3.13), в цилиндрической емкости воды развиваются две гидродинамические ячейки, формирующие в итоге два независимых торoidalных вихря, циркуляция которых совпадает с направлением течения пристеночного более тяжелого (по плотности) потока воды и противоположна легкому осевому течению. Это объясняет неравномерный характер изменения аксиальной компоненты скорости воды на оси симметрии цилиндра (рисунок 3.12), где силы вязкого трения притормаживают приосевой поток воды в областях сечений $z \sim 3$ см и 8 см и ускоряют его в сечении $z \sim 6$ см (для моментов $t \geq 50$ с).

Время микроволнового нагрева воды. Как было установлено в п. 3.1.3, без учета динамики течения и конвективных потоков тепла, время микроволнового нагрева воды до температуры кипения $T_k = 100$ °C в какой-либо точке цилиндрической емкости составляет $t_k \sim 30$ с. В этом случае, основной объем воды остается относительно холодным (рисунок 3.2).

С учетом конвективных потоков тепла время нагрева воды увеличивается, практически, на порядок и составляет $t_k \sim 300$ с (рисунок 3.11). Это обусловлено тем, что в течение микроволнового нагрева воды конвективные потоки тепла, совместно с теплопроводностью, способствуют выравниванию температуры во всем объеме цилиндрической емкости путем отвода тепла из областей источников (пучности электрического поля) к другим холодным слоям воды и стенкам цилиндра. Данные процессы приводят к перемешиванию

Рисунок 3.13 – Изменение поглощенной $P_d = Q_d$, прошедшей $P_T = Q_T$ и отраженной $P_R = Q_R$ мощности электромагнитного излучения от времени нагрева воды с учетом конвективного переноса тепла: $L_m = 80$ мм; $R_m = 30$ мм; $Q_i = 480$ Вт

температуры воды по всему объему жидкости цилиндра и оказывают существенное влияние на время микроволнового нагрева воды до температуры кипения. В результате действия кондуктивного и конвективного потоков тепла, нагрев воды и распределение температуры становится более однородным по всему объему цилиндрической емкости как в аксиальном, так и в радиальном направлениях.

Данные процессы способствуют нагреву придонных и пристеночных слоев воды (рисунок 3.20). Поскольку теплопроводность стекла почти в два раза превышает теплопроводность воды, то эти процессы приводят к усилению охлаждающей роли стенок емкости, которые отводят тепло от воды и нагревают окружающий газ и стенки волновода. Это также способствует увеличению времени нагрева воды до температуры кипения.

Мощность микроволнового излучения. С учетом гидродинамики течения воды и конвективного переноса тепла, наблюдается качественное изменение поглощенной, прошедшей и отраженной мощности электромагнитного поля (рисунок 3.13), по сравнению с результатами (рисунок 3.6). В случае нагрева неподвижной воды до температуры кипения, значение поглощаемой мощности потока излучения, по отношению к начальному, уменьшается всего на $\sim 5\%$. С учетом течения и перемешивания жидкости за время нагрева воды до температуры кипения, поглощение мощности подводимого излучения заметно снижается до значений $\sim 50\%$.

Из результатов расчета (рисунок 3.13) видно, что в течение первых 40 сек нагрева воды мощность диссипации электромагнитного излучения Q_d возрастает от начального значения 240 Вт, достигает максимального значения ~ 250 Вт, а далее постепенно уменьшается до ~ 140 Вт. Прошедшая через слой воды мощность микроволнового излучения наоборот, вначале снижается от начального значения ~ 140 Вт, а затем, по мере нагрева воды, возрастает до ~ 225 Вт. Полученное в расчетах увеличение прошедшей микроволновой мощности потока излучения Q_r , соответствует эффекту «просветления» нагреваемой воды, наблюдаемый в экспериментах [8] и согласуется с результатами расчетов п. 2.1. Меняется и величина отраженной мощности потока излучения Q_r : от начального значения ~ 100 Вт, до конечного ~ 115 Вт.

Как следует из результатов расчета, при увеличении подводимой мощности электромагнитного излучения ($Q_i = 1$ кВт), распределение всех гидродинамических, тепловых и электромагнитных характеристик воды и электромагнитного поля качественно не изменяется. Уменьшается, практически в три раза, время нагрева воды до температуры кипения ($t_k \approx 108$ с), что отмечалось ранее в расчетах (глава 2).

3.2.3. Сравнение с экспериментом. В работе [8] приведены результаты измерения распространения в воде микроволнового излучения с частотой 50 Гц, длиной волны 12,25 см и пиковой мощностью 1,8 кВт. Стекланный цилиндрический сосуд в металлической оплетке с водой помещался внутри волноводной системы. После выключения магнетрона в определенные промежутки времени проводилось перемешивание воды диэлектрическим стержнем и термопарой измерялась температура воды. По средней температуре воды рассчитывалась величина поглощенной мощности электромагнитного излучения, которая оказалось равной ~ 480 Вт, что соответствовало средней мощности магнетрона.

На основе экспериментальных измерений [8] был установлен эффект «самопросветления» воды. За счёт последовательного микроволнового нагрева воды происходит увеличение расстояния проникновения электромагнитного излучения вглубь водяного столба по направлению излучения.

Результаты расчета показали, что при заданном значении подводимой мощности электромагнитного поля $Q_i = 480 \text{ Вт}$, после 20 сек воздействия электромагнитного излучения на цилиндрическую емкость с водой, вода нагревается до температуры $\sim 95^\circ \text{C}$. Полученные результаты показали (рисунок 3.13), что по мере нагрева воды мощность, прошедшая через слой воды микроволнового излучения, возрастает от начального значения $\sim 140 \text{ Вт}$ до конечного $\sim 225 \text{ Вт}$. Полученное увеличение прошедшей мощности потока излучения Q_T соответствует эффекту «самопросветления» нагреваемой воды, наблюдаемый в экспериментах [8] и согласуется с результатами расчетов в п. 2.1.

Уменьшение высоты столба воды в стакане в два раза, приводит к увеличению прошедшей микроволновой мощности потока излучения до $\sim 278 \text{ Вт}$, что также соответствует эффекту «самопросветления» воды [8].

3.3. Нагрев воды в прямоугольном волноводе

3.3.1. Модель нагрева воды. Рассматривается микроволновый нагрев воды, находящейся внутри стеклянного кварцевого цилиндра, расположенного перпендикулярно и параллельно широким стенкам волновода прямоугольного сечения $a \times b$ (см. рисунок 3.11).

В случае схемы, показанной на рисунке 3.14, а, предполагается, что при микроволновом нагреве воды кварцевый цилиндр достаточно протяженный и расположен перпендикулярно широким стенкам волновода. Тогда можно пренебречь изменениями температуры воды и напряженности электрического поля по направлению оси y :

$$\partial T / \partial y = 0, \partial E / \partial y = 0.$$

В другом случае (рисунок 3.14, б), цилиндрическая емкость расположена параллельно широким стенкам волновода и изменение всех характеристик при микроволновом нагреве воды происходят симметрично относительно координат x, y .

Для моделирования физических процессов, протекающих при нагреве воды электромагнитным излучением, воспользуемся математической моделью, представленной в п. 3.1, полагая, что волновод не круглого, а прямоугольного сечения с размерами $a \times b$. Независимо от расположения цилиндрической стеклянной емкости с водой в прямоугольных волноводах (рисунки 3.14, а и б), нагрев воды происходит за счет диссипации мощности электромагнитного излучения, подводимого TE -волной с компонентами:

$$\vec{E} = \vec{E}(0; E_y = E; 0) \exp(i\omega t - ikz), \quad \vec{B} = \vec{B}(B_x; 0; B_z) \exp(i\omega t - ikz),$$

$$k = \sqrt{(\omega / c)^2 - (\pi / a)^2},$$

где k – продольное волновое число. Полагается, что отвод тепла с поверхности кварцевого цилиндра с водой в окружающую газовую среду (воздух) и на стенки волновода происходит за счет теплопроводности, а конвективные потоки тепла в воде и воздухе не учитываются.

Уравнения. Для описания процесса микроволнового нагрева воды в цилиндрической стеклянной емкости, расположенной в прямоугольном волноводе (рисунок 3.14, а), воспользуемся нестационарным уравнением баланса энергии (1.5) и волновым уравнением относительно напряженности электрического поля (1.7), которые в двумерном приближении в прямоугольной системе координат запишутся так:

Рисунок 3.14 – Схема микроволнового нагрева воды на волне H_{10}

в прямоугольном волноводе сечения $a \times b$ при расположении цилиндрической емкости с водой перпендикулярно (а) и параллельно (б) широким стенкам волновода: $2L$ – размер расчетной области вдоль оси z ; a – ширина; b – высота волновода

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} (\varepsilon_r - i\varepsilon_i) E = 0.$$

Компоненты индукции магнитного поля в проекции на координатные оси x, y определяются из уравнения Фарадея (1.5):

$$B_x = -\frac{\partial E}{\omega \partial z}, \quad B_z = \frac{i}{\omega} \frac{\partial E}{\partial x}.$$

Составляющие компонент вектора Умова–Пойнтинга находятся из уравнений Максвелла и приводятся к следующему виду:

$$S_x = \frac{1}{2\mu_0} \operatorname{Re}(E^* B_z), \quad S_z = -\frac{1}{2\mu_0} \operatorname{Re}(E^* B_x). \quad (3.10)$$

Для описания процесса переноса тепла теплопроводностью в воздухе от нагретых стеклянных стенок цилиндрической емкости с водой к охлаждаемым металлическим стенкам прямоугольного волновода используется нестационарное уравнение баланса энергии (1.5):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

Краевые условия задаются в начальный момент времени ($t = 0$) и по всему прямоугольному контуру расчетной области волновода

$$[t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq a, \quad -L \leq z \leq L].$$

Начальная температура воды и температура на охлаждаемых стенках волновода полагается равной температуре воздуха в волноводе. В центре цилиндрической емкости наблюдается симметричное распределение температуры воды по направлению оси x , а на контактной поверхности стеклянных стенок цилиндрической емкости с водой и окружающего воздуха ($R^2 = x^2 + z^2$) выполняются условия непрерывности температуры и потоков тепла, переносимого теплопроводностью от нагреваемой микроволновым излучением стеклянной емкости с водой в воздух и на металлические стенки волновода:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq a, \quad -L \leq z \leq L: T(x, z, 0) = T_R = T_\infty;$$

$$t \geq 0, \quad -L \leq z \leq L, \quad 0 \leq x \leq a: T(x, z, t) = T_R;$$

$$t \geq 0, \quad x = a/2: \partial T / \partial x = 0.$$

Напряженность электрического поля находится из решения волнового уравнения (3.7) при следующих граничных условиях:

1. В начальном сечении на входе излучения в прямоугольный одномодовый волновод учитывается суперпозиция подводимой и отраженной электромагнитной волны:

$$z = -L: E = [E_I \exp(-ikz) + E_R \exp(ikz)] \sin(\pi x / a).$$

2. В конечном сечении на выходе излучения из волновода задается прошедшая электромагнитная волна:

$$z = L: E = E_T \exp(-ikz) \sin(\pi x / a).$$

3. На боковой поверхности волновода задаются условия идеальной проводимости металлических стенок:

$$x = 0; \quad x = a: E = 0.$$

Баланс энергии. В прямоугольном волноводе амплитуды подводимой, отраженной и прошедшей электромагнитных волн (E_I, E_R, E_T), типа H_{10} , определяются из условия непрерывностей $\vec{E}(z, x)$ и $\partial E / \partial z$ на границах области в сечениях $z = -L$ и $z = L$:

$$\begin{aligned} E_I &= \frac{1}{2} \left[E(-L, a/2) + \frac{i}{k} \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z=-L, x=a/2} \right] \exp(-ikL); \\ E_R &= \frac{1}{2} \left[E(-L, a/2) - \frac{i}{k} \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z=-L, x=a/2} \right] \exp(-ikL); \\ E_T &= \frac{1}{2} \left[E(L, a/2) + \frac{i}{k} \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z=L, x=a/2} \right] \exp(ikL). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Выражения, связывающие мощности подводимой, отраженной и прошедшей электромагнитных волн с вектором Умова–Пойнтинга, запишем так:

$$Q_I - Q_R = -b \int_0^a S_z(x, -L) dx, \quad Q_T = b \int_0^a S_z(x, L) dx. \quad (3.12)$$

Зависимость мощностей подводимой, отраженной и прошедшей электромагнитных волн с соответствующими амплитудами электрического поля, частотой и размерами прямоугольного волновода, имеет следующий вид:

$$Q_I = \frac{k|E_I|^2}{4\mu_0\omega}ab; \quad Q_R = \frac{k|E_R|^2}{4\mu_0\omega}ab; \quad Q_T = \frac{k|E_T|^2}{4\mu_0\omega}ab. \quad (3.13)$$

Из закона сохранения энергии электромагнитного поля определяются источники тепла в уравнении баланса энергии:

$$-\left(\frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_z}{\partial z}\right) = \frac{1}{2}\sigma|E|^2.$$

Путем интегрирования данного выражения в расчетной области $[t \geq 0, 0 \leq x \leq a, -L \leq z \leq L]$, с учетом (3.10)–(3.13), получается алгебраическое выражение для баланса энергии электромагнитной волны и мощности диссипации (поглощения) микроволнового излучения Q_D в воде:

$$Q_I = Q_R + Q_D + Q_T, \quad Q_D = b \int_0^a \int_{-L}^L \frac{1}{2}\sigma|E|^2 dx dz. \quad (3.14)$$

3.3.2. Метод решения. Для решения дифференциальных уравнений (3.7) используется методика сквозного счета, при котором самосопряженность задачи в воде, кварцевом цилиндре и газе на границах раздела (вода-стекло-воздух-стенки волновода) достигается введением коэффициентов переноса, определенных как средние гармонические значения [50]. Дискретизация уравнений производится методом контрольного объема. Подводимая микроволновая мощность Q_I задается функцией времени, через которую определяется амплитуда падающей электромагнитной волны $|E_I|$. Граничные условия для $\vec{E}$ приводятся к виду условий электромагнитного излучения:

$$z = -L: \frac{\partial E}{\partial z} - ikE = -2ikE_I \exp(-ikz) \sin(\pi x / a),$$

$$z = L: \frac{\partial E}{\partial z} + ikE = 0.$$

Поскольку волновое уравнение определяет амплитуду напряженности электрического поля с точностью до произвольного постоянного множителя, то первое условие заменяется соотношением:

$$z = -L: \tilde{E} = \sin(\pi x / a).$$

Итеративный характер условия на правой границе сохраняется. Полученное численное решение относительно $\tilde{E}(x, z)$ масштабируется:

$$E(x, z) = K_E \tilde{E}(x, z), \quad K_E = |E_I| / |\tilde{E}_I|.$$

Коэффициенты отражения, диссипации и прохождения электромагнитной волны вычисляются по формулам:

$$k_R = \frac{Q_R}{Q_I}, \quad k_D = \frac{Q_D}{Q_I}, \quad k_T = \frac{Q_T}{Q_I}. \quad (3.15)$$

При описании процесса микроволнового нагрева воды численный расчет контролируется выполнением баланса энергии электромагнитной волны, который записывается относительно коэффициентов: k_R, k_D, k_T :

$$k_R + k_D + k_T = 1.$$

3.3.3. Результаты расчета. Проводится численный расчет микроволнового нагрева воды в стеклянной цилиндрической емкости, расположенной перпендикулярно широким стенкам прямоугольного волновода, и переноса тепла в воздухе от поверхности стеклянной емкости на охлаждаемые металлические стенки прямоугольного волновода (рисунок 3.14, а).

Исходные данные. Вода находится в кварцевой емкости (цилиндрический стакан радиуса $R = 15$ и 30 мм, толщина стенок 2 мм) в прямоугольном волноводе с размерами 72×34 мм, $L = 72$ мм. Нагрев воды проводится для следующих значений частоты и мощности электромагнитного излучения: $f = 2,1; 2,45; 4$ ГГц и $Q_0 = 240, 480, 960$ Вт.

Теплофизические и электромагнитные свойства воды, стекла-кварца и воздуха при атмосферном давлении задаются функциями температуры и частоты электромагнитного поля (таблицы 1.1–1.3).

Начальная температура воды полагается постоянной и равной температуре стенок волновода и температуре воздуха в волноводе: $T(x, z, 0) = T_R = T_\infty = 20^\circ\text{C}$.

Микроволновой нагрев воды. Предварительно проводится расчет микроволнового нагрева воды для следующих параметров: $R = 30$ мм, $f = 2,45$ ГГц, $Q_0 = 480$ Вт, результаты которого будут использоваться в дальнейшем, как контрольный тест при сравнении с другими вариантами расчета.

Как следует из результатов расчета (рисунки 3.15–3.17), в прямоугольном канале волновода электромагнитная волна, распространяющаяся в воздухе и через стенки стеклянной емкости, взаимодействует с водой. Цилиндрическая емкость расположена параллельно направлению электрического поля E_y (рисунок 3.14, а). При переходе через границу $z = -R$ «воздух-стекло-вода», модуль амплитуды напряженности электрического поля $|E|$ почти на порядок снижается по отношению к значению $|E|$ в начальном сечении $z = -L$. Далее, при распространении микроволнового излучения в воде, напряженность электрического поля монотонно уменьшается в аксиальном направлении и в распределении $|E|$ появляются периодические колебания, максимум которых реализуется вблизи границы «вода-стекло-воздух» $z = R$.

В начальные моменты времени при взаимодействии потока электромагнитного излучения с водой, большая часть излучения отражается от воды обратно в волновод ($k_r \sim 0,77$), часть излучения ($k_d \sim 0,22$) поглощается в воде, а незначительная часть проходит через емкость с водой ($k_t \sim 0,01$). Благодаря поглощению (диссипации) мощности электромагнитного излучения водой, выделяется тепло в источниках уравнения энергии ($Q_E = \sigma|E|^2/2$) и происходит нагрев воды, стеклянной емкости, воздуха в волноводе и металлических стенок прямоугольного волновода.

Рисунок 3.15 – Изменение напряженности электрического поля, «джоулева тепловыделения», температуры, мощности подводимой электромагнитной волны $Q(z)$, коэффициентов отражения, диссипации и прохождения микроволнового излучения в воде и в стеклянных стенках цилиндрической емкости для моментов времени: $t = 1$ (1), 10 (2), 30 (3), 70 (4) с

Рисунок 3.16 – Распределение напряженности электрического поля, температуры и вектора Умова–Пойнтинга (изображено стрелками) в конце нагрева воды микроволновым излучением ($t_k = 70$ с), стеклянные стенки цилиндрической емкости изображены окружностями

Рисунок 3.17 – Изменение распределений напряженности электрического поля, «джоулева тепловыделения» и температуры вдоль оси z в различные моменты времени, $f = 4$ и $2,1$ ГГц

С течением времени, температура воды повышается и происходит увеличение амплитуды периодических колебаний напряженности электрического поля $|E(x, z, t)|$ и сдвиг фазы колебаний. Причем амплитуда $|E(x, z, t)|$ не только заметно возрастает, но и смещается навстречу излучению вдоль оси z в направлении к начальной границе: $z = -R$. Изменение модуля амплитуды $|E|$ прослеживаются по всему сечению емкости с водой, и особенно заметно в области «холодной» воды $z > 0$.

При взаимодействии потока микроволнового излучения с водой в области больших значений напряженности электрического поля $|E|$, происходит интенсивный нагрев воды у поверхности стенки стеклянной емкости (рисунки 3.15, 3.16). С течением времени мощность источников «джоулевого тепла» у стенки уменьшается, а сами источники распределяются по всему объему емкости. По мере микроволнового нагрева воды из-за интенсивного выделения тепла в источниках уравнения энергии и «слабого» влияния теплопроводности, профиль температуры $T(x, z, t)$ становится немонотонным вдоль оси z . Теплопроводность не успевает отвести тепло из областей с максимальными значениями Q_E в область «холодных» узлов напряженности электрического поля $|E|$ и к стенкам емкости. К концу времени нагрева воды максимум температуры смещается от стенки емкости к центру кварцевого стакана в направлении ($x = 0, z = 0$), как следствие экранирования нагретой водой электромагнитного излучения и интенсивного отвода тепла теплопроводностью через стеклянные стенки цилиндра в воздух навстречу излучению (рисунок 3.12).

Поскольку в направлении излучения стеклянная емкость с водой представляет собой боковую поверхность цилиндра, то вода, подобно собирающей линзы, концентрирует (фокусирует) поток электромагнитного излучения (вектор Умова–Пойнтинга) в направлении оси z в области с повышенной температурой воды. Это приводит к тому, что в области фокусировки излучения температура воды начинает быстрее нагреваться и образуется «крутой» тепловой фронт, формирующий интенсивные кондуктивные потоки тепла к стенкам емкости. Вода нагревает внутренние стенки стеклянной ёмкости и, благодаря теплопроводности стекла и воздуха, тепло отводится от стенок емкости в воздух навстречу потоку излучения.

В направлении электромагнитного излучения $z \geq 0$ происходит обратный процесс, наблюдается рассеивание интенсивности излучения (рисунок 3.16), формируется «пологий» тепловой фронт, температура воды уменьшается и наблюдаются незначительные потоки тепла, переносимые теплопроводностью к стенкам емкости.

Реализуемый в цилиндрической емкости нагрев воды микроволновым излучением объясняет фактически интенсивный прогрев воздуха впереди стенок стеклянной емкости с водой, навстречу потоку излучения, и практически отсутствие нагрева воздуха за стенками стеклянной емкости, по направлению потока излучения (рисунок 3.13). Распределение температуры вдоль оси x остается симметричным, так же, как и распределение $|E(x, z, t)|$ (рисунки 3.15, 3.16).

Мощность распространяющейся (бегущей вдоль оси z) электромагнитной волны в прямоугольном волноводе характеризуется следующим выражением:

$$Q(z) = b \int_0^a S_z(x, z) dx.$$

Как видно из результатов расчета (рисунок 3.15), в воздухе и стекле $Q(z)$ не изменяется, а в воде – уменьшается практически по экспоненциальному закону. С течением времени происходит увеличение температуры воды благодаря диссипации подводимой мощности электромагнитного излучения, и от экспоненциального закона изменения $Q(z)$ постепенно переходит в линейный (рисунок 3.15). Изменения коэффициентов отражения и диссипации мощности электромагнитного излучения слабо зависят от времени. Например, для моментов времени $0 \leq t < 55$ с происходит незначительное уменьшение коэффициента отражения $k_r(t)$ и рост коэффициента диссипации $k_d(t)$, а в интервале $(-55 < t < t_k \approx 70$ с) наоборот, – наблюдается некоторое увеличение $k_r(t)$ и снижение $k_d(t)$. Величина прошедшей мощности микроволнового излучения сквозь стеклянную емкость с водой увеличивается, практически пропорционально, с течением времени нагрева воды (рисунок 3.15). Это соответствует эффекту «самопросветления» воды, наблюдаемый в экспериментах [8]. Отметим, что для данных параметров вычислений общий вклад мощности, прошедшей через емкость с водой Q_T , в балансе энергии остается незначительным ($k_i \sim 1\%$).

В цилиндрической емкости микроволновой нагрев воды до температуры кипения достигается за время $t_k \approx 70$ с. Процесс кипения воды начинается непосредственно вблизи стеклянных стенок цилиндрической емкости в области $(x = 35 \text{ мм}, z \approx -25 \text{ мм})$. Температура стенок при этом достигает максимального значения и составляет $\sim 80^\circ\text{C}$ вблизи области $(x = 35 \text{ мм}, z = -35 \text{ мм}, \varphi = 0)$, а далее, по длине окружности сечения стеклянной емкости $(0 < \varphi < \pi/4)$, температура быстро уменьшается до начального значения $T(x, z, 0) = T_\infty = 20^\circ\text{C}$. Поэтому для данного режима микроволнового нагрева воды, большая часть воды и поверхность стенок цилиндрического стакана $(\pi/4 \leq \varphi \leq -\pi/4)$ остаются «холодными» (рисунок 3.13).

Влияние частоты электромагнитного поля. Проводится расчет характеристик микроволнового нагрева воды для следующих частот электромагнитного поля: $f = 2,1; 2,45; 4 \text{ ГГц}$. Все остальные данные задаются так же, как и в п. 3.2.3. За основу для сравнения берутся результаты, полученные выше при $f = 2,45 \text{ ГГц}$.

Как следует из результатов расчета (рисунки 3.17–3.19), изменение частоты микроволнового излучения оказывает существенное влияние на все характеристики нагрева воды и электромагнитного поля. При уменьшении частоты излучения ($f = 2,1 \text{ ГГц}$), по сравнению с результатами расчета при $f = 2,45 \text{ ГГц}$, в емкости с водой заметно возрастает, практически в два раза, амплитуда колебания электрического поля (рисунок 3.18) и мощность изменения источников тепла в уравнении энергии (рисунок 3.20). С течением времени по мере микроволнового нагрева воды максимум $|E(x, z, t)|$, соответственно и мощность источников тепла в воде $Q_E(x, z, t)$, уменьшаются в направлении потока излучения и смещаются от стенок к центру емкости. В областях максимума напряженности электрического поля тепловыделение происходит практически по всему объему взаимодействия микроволнового излучения с водой в стеклянной емкости. Поэтому для электромагнитной частоты $f = 2,1 \text{ ГГц}$ нагрев воды и стенок стеклянной ёмкости по направлению потока излучения (рисунок 3.18), отличается от случая применения более высоких частот.

Профиль температуры не монотонный по сечению емкости, так как теплопроводность, вследствие своей инерции, не успевает отводить тепло из областей источников тепла или пучностей электрического поля в область «холодных» узлов и стенок цилиндра. Максимум температуры реализуется на расстоянии: $x = 35 \text{ мм}, z \approx -15 \text{ мм}$ от начального

Рисунок 3.18 – Распределение температуры и вектора Умова–Пойнтинга (изображено стрелками) в конце нагрева воды микроволновым излучением (окружности – стенки кварцевого стакана)

сечения. Вследствие уменьшения в два раза модуля амплитуды колебаний напряженности электрического поля, мощность источников тепла снижаются почти в пять раз. По сравнению с частотой $f = 2,45 \text{ ГГц}$ (рисунок 3.15), уменьшается коэффициент диссипации мощности электромагнитного излучения ($k_d \sim 0,05$) и увеличивается время нагрева воды до температуры кипения ($t_k \approx 500 \text{ с}$). Коэффициент отражения электромагнитного излучения возрастает до значения ($k_r \sim 0,95$). Отметим, что при этом уменьшается мощность и площадь фокусировки подводимого электромагнитного излучения к емкости с водой (рисунок 3.18). Поэтому нагрев воды происходит не так интенсивно, как в случае больших частот: снижается температура воды, а область максимального нагрева воды смещается ближе к оси емкости. Благодаря увеличению времени нагрева воды до температуры кипения, происходит постепенное распространение потока тепла теплопроводностью по сечению цилиндра и в направлении микроволнового излучения, что приводит к повышению температуры воды вплоть до противоположных стенок цилиндрической емкости.

Для случая «больших» частот ($f = 4 \text{ ГГц}$) наблюдается заметное экранирование водой распространения электромагнитного излучения. В начальной области подвода

Рисунок 3.19 – Эволюция коэффициентов отражения и поглощения мощности электромагнитной волны и максимальной температуры воды, $R = 30$ мм

микроволнового излучения на емкость с водой в направлении излучения, амплитуда напряженности электрического поля в воде быстро затухает (рисунок 3.17). Практически не наблюдаются колебания амплитуды $|E(x, z, t)|$ по направлению распространения электромагнитного излучения в воде. Происходит уменьшение вдоль оси z значений мощности источников тепла $Q_E(x, z, t)$ и температуры воды $T(x, z, t)$ (рисунок 3.17). По сравнению с частотой $f = 2,1$ ГГц, мощность диссипации электромагнитного излучения, соответственно и количество тепла, выделяющееся в воде, увеличивается более чем в 10 раз и реализуется вблизи «передних» стеклянных стенок ёмкости в области $(-R \leq z \sim 0)$. Этим объясняется интенсивный нагрев воды до температуры кипения ($t_k = 20$ с) у поверхности стенки цилиндра, который происходит для частоты $f = 4$ ГГц в ~ 25 раз быстрее, чем для $f = 2,1$ ГГц.

С течением времени мощность источников тепла уменьшается вблизи стеклянных стенок емкости и возрастает в направлении к оси цилиндра. Площадь нагретой воды составляет ~ 25 % от площади поперечного сечения стеклянной емкости (рисунок 3.18). При закипании воды максимальная температура стенок стакана достигает до 60°C . Коэффициент отражения мощности электромагнитного излучения снижается и составляет в конце нагрева ($k_r \sim 0,65$), а коэффициент диссипации наоборот, – растет ($k_d \sim 0,35$). Заметно увеличивается фокусировка и плотность электромагнитного излучения, подводимого к воде

Рисунок 3.20 – Распределение напряженности электрического поля, «джоулева тепловыделения», температуры, коэффициентов отражения и диссипации электромагнитной волны: $x = a/2$, $t = 1$ (1), 10 (2), 20 (3), 40 с (4); $Q_0 = 480 \text{ Вм}$, $f = 2,45 \text{ ГГц}$, $R = 15 \text{ мм}$

в стеклянной емкости, поэтому максимальный нагрев воды, вплоть до температуры кипения, происходит вблизи стенок. Теплопроводность своими потоками тепла не успевает нагреть воду по всему сечению цилиндра, как уже начинается процесс кипения воды у передней стенки стеклянной емкости в области подвода мощности микроволнового излучения (рисунок 3.18). Поэтому по сечению емкости, за исключением области взаимодействия электромагнитного излучения с водой, температура воды остается «холодной».

Влияние величины подводимой мощности. Проводится расчет характеристик нагрева воды в зависимости от величины подводимой мощности электромагнитного излучения: $Q_n = 240, 480, 960 \text{ Вм}$. Для сравнения берутся результаты, полученные при $Q_0 = 480 \text{ Вм}$, $f = 2,45 \text{ ГГц}$, $t_k = 70 \text{ с}$. Все остальные данные задаются такими же, как и в п. 3.2.3.

Как следует из результатов расчета (рисунок 3.19), время нагрева воды меняется пропорционально изменению величины подводимой мощности микроволнового излучения:

$$t_k = t_{k0} \cdot Q_0 / Q_n.$$

Распределение температуры при нагреве воды происходит практически одинаково для всех значений подводимой мощности электромагнитного излучения и отличается друг от друга только масштабом времени нагрева воды до температуры кипения. Для всех значений Q_n за время нагрева воды $t \sim 3t_k/4$ коэффициенты отражения мощности

электромагнитного излучения k_r незначительно снижаются, а затем в области $3t_k/4 \leq t \leq t_k$ опять повышаются до своих начальных значений. Изменение коэффициентов диссипации электромагнитного излучения k_d в данных временных масштабах изменения, наоборот, вначале немного возрастает, а затем уменьшается.

Изменение радиуса емкости. Для оценки влияния радиальных размеров цилиндрического стакана на микроволновый нагрев воды в прямоугольном волноводе проводится расчет при следующем значении радиуса цилиндрической емкости $R = 15$ мм, а все остальные исходные данные берутся аналогично варианту при стандартных параметрах: $R = 30$ мм, $f = 2,45$ ГГц, $Q_0 = 480$ Вт.

Как следует из результатов расчета (рисунок 3.20), при уменьшении радиуса цилиндрической емкости в два раза наблюдается качественное изменение характера взаимодействия микроволнового излучения с водой. Уменьшается почти в два раза число стоячих электромагнитных волн по диаметру цилиндра, по сравнению с результатами расчета при $R = 30$ мм (рисунок 3.15). Более чем в два раза увеличивается амплитуда колебаний напряженности электрического поля. Максимум $|E|$ смещается от стеклянной стенки по направлению электромагнитного излучения в центральные приосевые области емкости с водой. Происходит незначительное экранирование водой микроволнового излучения. Максимум выделения «джоулева тепла» в источниках энергии (пучности электромагнитного поля) наблюдается в области полукруга стеклянной ёмкости цилиндра, расположенной на встрече потока излучения.

По сравнению с емкостью $R = 30$ мм, нагрев воды происходит практически по всему объему цилиндра, а изменение мощности выделения энергии в источниках тепла возрастает более чем в пять раз. Теплопроводность не успевает отводить потоки тепла из областей интенсивной диссипации мощности электромагнитного излучения (источники выделения «джоулева тепла»). Поэтому в процессе микроволнового нагрева воды наблюдаются заметные периодические колебания в распределениях температуры по сечению цилиндра, которые доходят до значений $\sim 20\text{--}30$ °С (рисунок 3.20). Время нагрева воды до температуры кипения уменьшается в два раза, а КПД нагрева воды микроволновым излучением становится выше, чем для ёмкости с водой с радиусом $R = 30$ мм.

По мере микроволнового нагрева воды, в момент времени $t = 7$ с коэффициент отражения электромагнитной волны уменьшается от значения 0,75, проходит через минимум $\sim 0,7$, а далее возрастает до значения $\sim 0,85$ при закипании воды $t = 40$ с (рисунок 3.20). Изменение коэффициента диссипации мощности микроволнового излучения k_d находится в противофазе к изменению коэффициента отражения k_r .

Аксиальный подвод мощности. Рассматривается микроволновый нагрев воды в стеклянной цилиндрической емкости, расположенной параллельно стенкам волновода (см. рисунок 3.14, б). Расчет характеристик микроволнового нагрева воды проводится для тех же исходных данных, что и в п. 3.2.2: $Q_0 = 480$ Вт, $f = 2,45$ ГГц, $R = 30$ мм, $L = 40$ мм, $d = 2$ мм.

Как следует из результатов расчета (рисунки 3.21, 3.22), расположение стеклянной ёмкости с водой в прямоугольном волноводе (рисунок 3.14, б) оказывает существенное влияние на изменение всех характеристик нагрева воды и микроволнового излучения. По отношению к потоку излучения, при аксиальном положении высоты цилиндрической емкости с водой, толщина слоя воды почти в три раза больше, чем при сравнении

с радиальным расположением цилиндра (рисунок 3.14, а). Поэтому в аксиальном направлении (рисунок 3.21) происходит более интенсивное поглощение водой мощности электромагнитного излучения $Q(z)$.

В процессе микроволнового нагрева воды коэффициент отражения электромагнитного излучения k_r незначительно уменьшается, а коэффициент диссипации мощности микроволнового излучения k_d наоборот, – постепенно возрастает (рисунок 3.21). По мере увеличения температуры воды доля мощности электромагнитного излучения Q_i , прошедшей сквозь слой воды, растет, что соответствует наблюдаемому экспериментальному эффекту «самопросветления» воды [8]. Общий вклад Q_i в баланс энергии, даже в момент кипения воды, составляет всего $\sim 0,05\%$ от подводимого значения мощности излучения $Q_i = k_t Q_0$ (коэффициент прохождения излучения $k_t = 0,0005$).

В аксиальном направлении ($-L \leq z \leq L$) экспоненциально уменьшается амплитуда колебания напряженности электрического поля $|E|$, что приводит в направлении оси z к снижению диссипации мощности электромагнитного излучения и «джоулева тепловыделения» в источниках тепла уравнения энергии. Происходит постепенный микроволновой нагрев воды от начального поверхностного слоя в глубину цилиндрической емкости, в результате чего теплопроводность успевает отводить тепло из областей источников выделения энергии электромагнитного поля. Поэтому реализуется равномерное распределение

Рисунок 3.21 – Изменение напряженности электрического поля, «джоулева тепловыделения», мощности электромагнитной волны, температуры и коэффициентов отражения, диссипации и прохождения электромагнитного излучения: $t = 1$ (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4), 120 с (5)

Рисунок 3.22 – Распределение напряженности электрического поля, температуры и вектора Умова–Пойнтинга (изображено стрелками) в конце времени нагрева воды ($t_k = 120$ с) в стеклянной емкости, расположенной параллельно широким стенкам волновода

температуры в сечениях по направлениям изменения осей x , z цилиндрической ёмкости (рисунки 3.21, 3.22). Наблюдается «крутой» передний тепловой фронт на границе взаимодействия воды с микроволновым излучением (рисунок 3.22). Здесь же в центре окружности стеклянной ёмкости у поверхности ($x = 35$ мм, $z = -40$ мм) происходит нагрев воды до температуры кипения $t_k = 120$ °C. За время микроволнового нагрева воды $t = t_k$ потоки тепла, переносимые теплопроводностью, прогревают в аксиальном и радиальном направлениях весь объем воды в цилиндрической ёмкости. Поскольку слой воды интенсивно поглощает электромагнитное излучение в аксиальном направлении, то соответственно уменьшается выделение «джоулевого тепла». Это приводит к тому, что придонные области воды и стеклянное дно цилиндрической ёмкости остаются «холодными» (рисунок 3.22).

Крутой фронт температуры воды у передней стенки ёмкости способствует образованию в воздухе потоков тепла теплопроводностью навстречу электромагнитному излучению. Поэтому температура воздуха повышается от поверхности стеклянных стенок практически до начального сечения расчетной области прямоугольного волновода (рисунок 3.22). Высокая теплопроводность стекла, по сравнению с водой и воздухом, приводит к отводу тепла от воды в радиальном направлении (ось x) и некоторому нагреву воздуха у стеклянных кромок цилиндрической ёмкости в области $-40 \leq z \leq -30$ мм (рисунки 3.21, 3.22).

Как уже отмечалось в п. 3.1, при взаимодействии электромагнитного излучения (вектора Умова–Пойнтинга) с водой (рисунок 3.14, б), часть потока излучения распространяется внутри стеклянных стенок как по оптическому волноводу. Поскольку при радиальном распределении мощности излучения на волне H_{10} значение мощности у поверхности стенок ёмкости незначительно (рисунок 3.22), то стеклянные стенки, как источники электромагнитного излучения, не вносят заметного вклада в нагрев воды вдоль боковой поверхности цилиндра. Некоторое влияние микроволнового излучения от стеклянных стенок возможно наблюдается на расстоянии $z \sim 10$ мм от поверхности воды в аксиальном направлении. Поэтому в момент кипения воды малая часть мощности электромагнитного излучения ($Q_i \sim 0,05$ % от Q_0) может проходить не через слой воды, а внутри стеклянных стенок ёмкости.

Следует отметить, что при данном аксиальном подводе мощности электромагнитного излучения на волне H_{10} на плоскую торцевую поверхность воды (рисунок 3.14, б) эффекта фокусировки излучения не наблюдается.

Южный берег озера Иссык-Куль

ВЫВОДЫ

В данной монографии при исследовании одной из интересных проблем современной физики – взаимодействия электромагнитного излучения с жидкими средами и в частности с водой, рассматривается структура, изотопный состав и удивительные свойства воды, многие из которых ещё подлежат изучению. На основе уравнений магнитной гидродинамики проведено моделирование процессов взаимодействия и нагрева микроволновым излучением дистиллированной воды в стеклянной и керамической емкостях в формах плоского слоя, цилиндра и сферы. Из литературных источников определены значения теплофизических, переносных и электромагнитных коэффициентов воды, стекла и керамических материалов в зависимости от изменения температуры и частоты электромагнитного поля. Проведены аналитические и численные исследования изменения характеристик воды при взаимодействии с микроволновым излучением.

Основные результаты, нашедшие отражение в данной монографии были получены при изучении процессов взаимодействия и нагрева воды электромагнитным излучением:

- в результате решения волнового уравнения электродинамики определены особенности распространения электромагнитного излучения в изотермическом слое воды в зависимости от температуры и толщины плоского слоя, частоты и мощности микроволнового излучения;
- на основе уравнений магнитной гидродинамики разработаны одномерные, двух- и трехмерные модели, учитывающие взаимодействие и нагрев воды электромагнитным

излучением, предложены аналитические и численные методы решения данных уравнений для плоского слоя, протяженного цилиндра и сферы;

- разработаны достаточно простые инженерные модели и методы решения уравнений магнитной гидродинамики для оценок характеристик микроволнового нагрева воды: модель однородных коэффициентов, модели интенсивного, квазистационарного и линейного режимов нагрева;
- проведен теоретический анализ изменения характеристик воды в зависимости от частоты и подводимой мощности электромагнитного излучения, размеров и геометрии стеклянной ёмкости (плоский слой, цилиндр, сфера), определены условия реализации оптимальных режимов нагрева воды микроволновым излучением;
- исследована динамика микроволнового нагрева воды в стеклянной цилиндрической емкости, помещенной в круглый и прямоугольный волноводы, в области распространения электромагнитных волн типа E_{01} и H_{10} ;
- получено обобщенное решение электродинамической задачи в приближении однородных коэффициентов, при взаимодействии электромагнитного излучения с твердыми (керамика), жидкими (вода) и плазменными (аргон, воздух) состояниями вещества в виде плоского слоя, протяженного цилиндра и шара;
- в качестве примера приведен расчет микроволнового нагрева керамической плоской пластины из оксида алюминия.

Проведен анализ результатов, полученных на основе разработанных математических моделей, аналитических решений и численных расчетов нагрева воды микроволновым излучением:

- при взаимодействии микроволнового излучения с плоским слоем воды, цилиндром или сферой в результате суперпозиции подводимой и отраженной электромагнитных волн, пучности электрического поля распределяются по всему объему жидкости, в которых происходит диссипация мощности электромагнитного излучения и выделяется тепло в источниках уравнения баланса энергии;
- в начальные моменты времени роль теплопроводности и конвективных потоков тепла при микроволновом нагреве воды незначительна, наблюдается послойный нагрев воды электромагнитным излучением. В данном случае для оценок характеристик воды и электромагнитного излучения можно с успехом применять модель интенсивного нагрева, которая дает хорошие результаты и при воздействии на воду мощных потоков излучения;
- при длительном микроволновом нагреве воды роль теплопроводности в переносе тепла в уравнении баланса энергии становится определяющей, и в воде формируется практически однородное распределение температуры, что является хорошим приближением для применения модели однородных коэффициентов;
- для определенных значений толщины плоского слоя, радиуса цилиндра или сферы и частоты электромагнитного поля реализуются оптимальные режимы нагрева воды микроволновым излучением, при котором коэффициент отражения излучения достигает минимального значения, а коэффициент поглощения (диссипации) – максимального;
- с увеличением толщины плоского слоя воды и частоты электромагнитного поля ($f > 0,3 \text{ ГГц}$) наблюдается заметное экранирование водой потока излучения, что приводит к увеличению температуры воды вблизи стеклянных стенок, например, при

$f = 10 \text{ ГГц}$, $d = 4 \text{ см}$ температура воды в центре емкости составляет $\sim 20^\circ\text{C}$, тогда как у стенок начинается процесс кипения;

- время нагрева воды до температуры кипения практически пропорционально подводимой мощности электромагнитного поля, а нагрев воды до температуры $\sim 60^\circ\text{C}$ происходит в несколько раз медленнее, чем дальнейший её нагрев до температуры кипения;
- теплоизоляция внешних стенок камеры микроволновой печи не приводит к существенным изменениям характеристик нагрева воды, тогда как теплоизоляция стенок емкости с водой заметно влияет на весь процесс нагрева характеристик воды и электромагнитное излучение, и уменьшает время нагрева до температуры кипения;
- при симметричном подводе мощности микроволнового излучения напряженность электрического поля и температура воды на оси сферы всегда больше, чем на оси цилиндра, а тем более в центре плоского слоя;
- электромагнитное излучение свободно проходит сквозь «тонкие» слои воды и полностью поглощается «толстыми» слоями воды;
- при одностороннем подводе мощности электромагнитного поля к плоскому слою или цилиндру в круглых и прямоугольных волноводах коэффициент прохождения микроволнового излучения экспоненциально уменьшается в зависимости от расстояния;
- коэффициент прохождения микроволнового излучения увеличивается с повышением температуры воды, что подтверждает эффект «самопросветления воды», обнаруженный в экспериментах [8];
- при повышении температуры воды происходит медленный сдвиг фазы и увеличение амплитуды колебания коэффициентов отражения, поглощения и прохождения электромагнитного излучения, и смещение максимума коэффициента поглощения в область более высоких частот;
- прослеживается периодическая зависимость числа максимумов m от толщины плоского слоя и частоты излучения ($mdf = \text{const}$) коэффициентов поглощения, прохождения электромагнитного излучения и числа минимумов коэффициента отражения;
- в областях интенсивного выделения тепла уменьшается плотность воды, увеличивается её удельный объем, возникает система гидродинамических ячеек, «легкие» нагретые слои воды всплывают вверх, а холодные и «тяжелые» опускаются вниз и в стеклянной емкости формируется вихревая картина течения, где конвективные потоки тепла, наряду с теплопроводностью, играют важную роль в процессе объемного нагрева воды;
- при воздействии электромагнитного излучения на боковую поверхность стеклянного цилиндра наблюдается увеличение температуры воды в направлении распространения излучения и происходит концентрация (фокусировка) плотности потока (вектора Умова–Пойтинга), а с удалением от стенки в глубину емкости, температура воды понижается и начинается процесс рассеивания потока излучения;
- при аксиальном подводе мощности электромагнитной волны на плоскую поверхность цилиндра большая часть излучения поглощается водой, а незначительное количество, вблизи оси симметрии, отражается обратно в волновод навстречу подводимому излучению, часть потока отклоняется в сторону стеклянных стенок и распространяется внутри стекла, как по оптическому волноводу. Стенки стеклянной

емкости становятся источником электромагнитного излучения, которое входит в воду с боковой поверхности и нижнего основания цилиндра, а с удалением от нижнего основания наблюдается усиление (фокусировка) мощности потока излучения в воздухе, вызванное, по-видимому, влиянием емкости с водой;

- на основе обобщенного решения электродинамической задачи, по заданным значениям показателя преломления и коэффициента поглощения, можно оценить взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, находящимся в твердом, жидком или плазменном состояниях.

Озеро Ала-Куль, Кыргызстан.
Взаимодействие электромагнитного излучения Солнца
с капельками воды в воздухе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной монографии представлены результаты изучения процесса нагрева воды электромагнитным излучением, сделана попытка более детально познакомить читателей с удивительными свойствами и структурой обыкновенной воды, молекула которой состоит из самых простых химических элементов – водорода и кислорода. Несмотря на элементарное строение молекулы воды, нагрев воды микроволновым излучением представляет собой сложное физическое явление. Это связано с нелинейными и ещё недостаточно изученными процессами, происходящими при взаимодействии электромагнитного излучения с жидкими средами и, в частности, с водой.

Поэтому особое внимание автор уделил построению различных математических моделей микроволнового нагрева воды на основе уравнений магнитной гидродинамики, разработке численных и аналитических методов решения, проведению расчетов и анализу полученных результатов. Данные исследования позволяют оценить изменения характеристик воды и электромагнитного поля в зависимости от подводимой мощности и частоты микроволнового излучения, геометрических размеров и материала емкости с водой. Расчет тепловых, газодинамических и электромагнитных характеристик микроволнового нагрева воды в круглых и прямоугольных волноводах показал влияние теплопроводности и конвективного переноса тепла на объемный нагрев воды. Такой подход к исследованию взаимодействия воды с электромагнитным излучением, в настоящее время, по мнению автора, является наиболее целесообразным.

Весь процесс нагрева воды в микроволновой печи можно условно разделить на следующие характерные этапы:

1. Взаимодействие электромагнитного излучения с водой, приводящее к объемному выделению тепла в воде, вследствие диссипации мощности микроволнового излучения в областях пучностей электрического поля;

2. Возникновение кондуктивных и конвективных потоков, перераспределяющих тепло по всему объему воды в стеклянной емкости и отвод тепла через стенки емкости и окружающий воздух на охлаждаемые стенки микроволновой печи;

3. Постепенный нагрев воды с учетом образования, роста, выделения пузырьков газа и последующий процесс кипения.

Результаты исследований показали, что довольно трудно ответить на вопрос, поставленный в начале монографии: *как происходит нагрев воды в микроволновке?* Для полного ответа нужно знать частоту и мощность электромагнитного излучения, свойства воды, геометрию емкости, влияние диссипации излучения, роль конвективных потоков тепла и теплопроводности на процесс нагрева воды. Тем более, что вода при микроволновом нагреве не является сплошной однофазной средой, а в ней начинают выделяться и расти пузырьки газа. Формирование в воде двухфазной среды (вода-газ) приводит к перестройке электромагнитных полей и всей физики нагрева воды с учетом нового механизма теплообмена и гидродинамики течения, связанного с образованием и движением пузырьков газа.

Поэтому существует пока краткий традиционный ответ: *в микроволновой печи происходит взаимодействие электромагнитного излучения с водой, в результате которого энергия микроволнового излучения идет на нагрев жидкости.*

Теоретические модели, представленные в данной монографии, позволяют описать термический нагрев дистиллированной воды микроволновым излучением в рамках сплошной однофазной среды в стеклянной или керамической емкости в формах плоского слоя, цилиндра или сферы.

Расширение применения данных математических моделей для расчета, например, воды из водопроводного крана, ручья или реки, можно сделать при условии задания необходимых значений теплофизических, переносных и электромагнитных характеристик воды: $\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\sigma = \sigma(T, \omega)$, $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, \omega)$, входящих в коэффициенты уравнений магнитной гидродинамики, с учетом наличия солей, примесей, изотопного состава и зависимости от температуры, давления и частоты электромагнитного поля.

При рассмотрении нагрева воды с использованием емкости не только из стекла или керамики, а из других диэлектрических или синтетических материалов в произвольной газовой среде, необходимо в рамках данных математических моделей задать соответствующие коэффициенты, характеризующие материал емкости: $\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\sigma = \sigma(T, \omega)$, $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, \omega)$ и свойства газа ($\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\eta(T)$).

Результаты разработанных методов математического моделирования для исследования взаимодействия электромагнитных излучений с веществом могут найти широкое применение во многих областях науки, техники и медицине. Рассмотрим некоторые из них:

- при теоретическом моделировании и расчете оптимальных экологически чистых режимов объемного нагрева керамических материалов электромагнитным излучением для получения специальных изделий в микроволновых печах;
- при реализации нагрева в конвертере ультрадисперсных нано-частиц при диссипации электромагнитной энергии взаимодействия с террагерцевым излучением

источника (объект–человек) в инфракрасном диапазоне шкалы электромагнитных волн для выявления оружия, скрытого под одеждой (борьба с терроризмом) или ранней диагностики злокачественных опухолей;

- для снижения уровня отражённого электромагнитного сигнала от объектов (стелс-технологии), для уменьшения вероятности обнаружения радиолокационными средствами воздушных, морских и наземных объектов, путем применения радиопоглощающих покрытий, наносимых на летательные аппараты, корабли и другую технику;
- при разработке методов и материалов для создания экранирующих покрытий (краски, аэрозоли), наносимых на стены, потолки, компьютеры или специальные экраны для защиты информации от электронного прослушивания помещений и при поглощении электромагнитного излучения в диапазоне частот сотовой мобильной связи.

Еще одно направление исследований – это воздействие излучения на биологические объекты в медицине, например, для развития методов безоперационного лечения злокачественных опухолей:

- при фокусировке электромагнитного излучения в область расположения опухоли в организме человека и при воздействии на неё микроволновым излучением с определенной частотой и мощностью, осуществляется термический нагрев воды в клетках злокачественной опухоли до температуры выше 42°C , в результате которого пораженные клетки погибают;
- при плазменной фототермальной терапии злокачественная опухоль, с накопленными в ней наночастицами золота, освещается инфракрасным излучением лазера, в результате чего происходит преобразование световой энергии лазера в теплоту, нагрев раковых клеток до температуры выше 42°C и их гибель.

Кроме чисто практических целей, таких как простой нагрев жидкости в микроволновке, результаты исследований имеют большое значение для оценки безопасности здоровья человека от воздействия электромагнитного излучения. Остановимся несколько подробнее на некоторых аспектах этой проблемы:

1. Человек состоит из воды на 60% , это в среднем по отношению к его весу. Например, по данным Википедии, количество жидкости в организме новорождённого ребенка составляет $\sim 90\%$, в 5–7-летнем возрасте этот показатель снижается до значения порядка 80% , у здорового мужчины в 40 лет эта цифра колеблется от 62 до 70% , а у пожилого человека этот показатель снижается до 50% . Кроме того, человек в своем организме синтезирует первичную «ювенильную» воду, которая образуется при сгорании пищевых продуктов и самих тканей.

2. Человек живет в электромагнитных полях естественных (природных) и техногенных (искусственного, антропогенного происхождения) источников излучения. Естественные источники излучения – это в основном излучение Солнца и электрических разрядов. Например, при 11-летних ритмах Солнца интенсивность электромагнитного излучения в радио- и микроволновом диапазонах частот изменяется в пределах от максимума 10^{-17} до минимума солнечной активности: $\sim 10^{-24} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$ [30]. Космическое излучение радиогалактик, квазаров, пульсаров не превышает уровень $10^{-26} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$. Если раньше человек жил на Земле в основном в ритме электромагнитного излучения Солнца и частично ощущал излучение грозových электрических разрядов, то сейчас на эти естественные факторы накладывается мощное техногенное излучение, созданное самим человеком.

3. Благодаря развитию индустриального общества изобретено электричество, радио, телеграф, телефон, работа которых также сопровождается излучением электромагнитных волн. В настоящее время интенсивно развиваются кибернетика, технологии электронных вычислительных машин (ЭВМ), атомная и ядерная энергетика, разрабатываются новые цифровые системы коммуникации и космической связи. В нашу жизнь прочно вошел интернет, который практически объединил все страны и людей доступной электронной информацией.

4. Происходит качественный переход деятельности человека от индустриального общества к информационному обществу персональных компьютеров, планшетов, смартфонов и микроволнового излучения. Возрастающий поток информации, совершенствование ЭВМ, сотовых телефонов, систем приема и передачи информации с помощью электромагнитного излучения, опережает физиологическое развитие человека и его адаптацию к новым вызовам современной техники и технологий.

5. Благодаря своей деятельности человек постоянно расширяет рукотворный океан электромагнитного излучения, который ежедневно углубляется, а мощность излучения усиливается практически во всем диапазоне частот. Как пример, можно привести данные, что сейчас уровень электромагнитного излучения на Земле в 1000 раз превосходит излучение Солнца, хотя размеры Земли в 1000 раз меньше Солнца. Человек фактически живет в океане электромагнитного излучения и каждую секунду его электромагнитные волны с различной частотой и интенсивностью воздействуют на человека. Растет мощность электромагнитного излучения, как необходимого для обеспечения жизненной деятельности человека, так и ненужного вредного электромагнитного загрязнения. По опубликованным данным за последние десятилетия суммарная мощность электромагнитных полей в различных областях Земли увеличилась, по сравнению с естественным фоном, в сотни и тысячи раз.

6. Проведенные расчеты по взаимодействию воды с электромагнитным излучением позволили предположить, что часть излучения проходит через человека насквозь, другая – отражается от его поверхности или от внутренних органов, а третья поглощается в тканях и нагревает клетки, кровь, нейроны, мозг и другие органы человека. В этой связи возникает сразу множество вопросов:

- *Не является ли излучение опасным для здоровья человека?*
- *Какие предельно допустимые значения мощности и частоты электромагнитного излучения безопасны для человека?*
- *Не приведет ли воздействие излучения к генетическим изменениям структуры ДНК у человека?*

Если не принять соответствующих мер, то вполне возможно с течением времени из-за действия электромагнитного излучения определенной частоты и интенсивности, или в результате длительного воздействия излучения на организм человека могут возникнуть необратимые генетические мутации или ещё хуже – вырождение человечества, как вида. В качестве примера можно привести один из самых древних видов насекомых – тараканов. Они стали покидать дома и даже города, где присутствует высокая плотность электромагнитного (микроволнового) излучения. Поэтому сейчас крайне необходимы детальные исследования по воздействию излучения на биологические объекты, в частности на человека, и определение норм предельно допустимых значений мощности и частоты электромагнитного излучения.

7. Несомненно, для эволюции человечества необходимо развитие новых прогрессивных технологий, связанных с различными источниками электромагнитных излучений. Но для сохранения биологической жизни на Земле, в том числе и человека, нужно разрабатывать и создавать устройства с безопасными для человека технологиями применения электромагнитного излучения, особенно при приеме и передачи информации.

Дальнейшие направления исследований будут ориентированы на изучение процессов нагрева воды электромагнитным излучением с учетом её перехода в другое агрегатное состояние, образованием, ростом, выделением пузырьков водяного газа и формированием двухфазной среды (вода-газ). В этом случае возникают новые механизмы взаимодействия электромагнитного излучения с двухфазной средой, теплообмена и гидродинамики течения, образования, движения и переноса массы пузырьками водяного газа. Изменение состава газовой среды над поверхностью воды следует учитывать в коэффициентах системы уравнений газовой динамики, а на поверхности воды – границе раздела двух сред (вода, водяной пар + воздух), взаимодействие тепловых, гидродинамических и газодинамических потоков. Это практически новая и мало изученная область физики нагрева двухфазных сред микроволновым излучением.

Предложенный подход, по мнению автора, необходимо развивать и при исследовании нагрева воды электромагнитным излучением от температуры θ °C, с учетом её структурности, возможного наличия кристалликов льда и кластеров, а также присутствия примесей, растворенных солей и различного изотопного состава.

Это довольно сложные задачи, требующие перехода исследований на новую ступеньку моделирования протекающих физических процессов. Будущие теоретические модели должны, по мнению автора, рассматривать электромагнитный нагрев воды на наноразмерном уровне, с учетом ее структурности, изотопного состава, нелинейных, а возможно и квантовых эффектов при образовании и взаимодействии кластеров, молекул и атомов воды в поле электромагнитного излучения.

Горная река в Григорьевском ущелье. Кыргызстан

ПРИЛОЖЕНИЕ

Предложена методика решения уравнения баланса энергии и волнового уравнения для плоского слоя воды (п. 1), получено обобщенное решение уравнений Максвелла для твердых, жидких и плазменных состояний вещества в виде плоского слоя, цилиндра и сферы (п. 2). Приведен пример расчета нагрева плоской керамической пластины микроволновым излучением (п. 3).

1. Метод численного решения дифференциальных уравнений

Для математического моделирования микроволнового нагрева воды разработана методика численного решения одномерного нестационарного уравнения баланса энергии и приведенного волнового уравнения для случая симметричного подвода мощности электромагнитного излучения.

1.1. Уравнение баланса энергии и волновое уравнение. Рассматривается нагрев плоского слоя воды (рисунок 2.2) электромагнитным излучением, распространяющимся вдоль оси x с компонентами:

$$\vec{E}(0,0,E_z=E(x))\exp(i\omega t), \quad \vec{B}(0,B_y=B(x),0)\exp(i\omega t).$$

Температура плоского слоя воды и напряженность электрического поля микроволнового излучения находятся из совместного решения дифференциальных уравнений баланса энергии и приведенного волнового уравнения:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} + k_\omega^2 E = 0. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия при симметричном подводе мощности электромагнитного излучения, задаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad 0 \leq x \leq R: T(x, 0) &= T_R; \\ t \geq 0, \quad x = 0: \partial T / \partial x &= 0, \quad \partial E / \partial x = 0; \\ x = R: T &= T_R, \quad E = E_R(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты переноса, теплофизические параметры и электромагнитные свойства воды и микроволнового излучения ($l, \varepsilon_r, s, r, C_p$) считаются известными функциями температуры и частоты электромагнитного поля и используются из таблицы 1.1. Тепловые и электромагнитные характеристики воды и электромагнитного поля, необходимые для численного анализа при исследовании взаимодействия воды с микроволновым излучением, находятся по значениям T, E , полученным из решения уравнений (1).

1.2. Уравнение энергии. Уравнение энергии (1) решается численно (методом линий). Проводится дискретизация данного уравнения по пространственной переменной x методом контрольного объема [49]. Граничные точки контрольных объемов изображаются на схеме (рисунок 1). Центральные узлы объемов:

$$x_j = (j - 1/2)\Delta x, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \Delta x = R / (n - 1),$$

в которых выполняется расчет полей T и E (отмечены символом «*»).

Рисунок 1 – Пространственная сетка метода контрольного объема

Интегрирование уравнения баланса энергии (1) выполняется по контрольным объемам. Используется метод конечных разностей и осуществляется переход к конечно-разностным аналогам производных по пространственной переменной [49]. В итоге получается система обыкновенных дифференциальных уравнений, определяющих динамику изменения по времени температуры в узлах пространственной сетки x_j :

$$(\rho C_p)_j \frac{dT_j}{dt} = a_j T_{j-1} - b_j T_j + c_j T_{j+1} + q_j, \quad (3)$$

$$a_j = \frac{2\lambda_{j-1}\lambda_j}{(\lambda_{j-1} + \lambda_j)\Delta x^2}, \quad b_j = a_j + c_j, \quad c_j = a_{j+1},$$

$$q_j = \begin{cases} 1/2\sigma_j |E_j|^2, & x_j < R_c, \\ 0, & x_j > R_c \end{cases}, \quad j = 2, 3, \dots, n-1.$$

Для замыкания системы уравнений используются граничные условия (2), из которых следуют два обыкновенных дифференциальных уравнения в начальном ($j = 1$) и конечном ($j = n$) узлах пространственной переменной x_j :

$$(\rho C_p)_1 \frac{dT_1}{dt} = -c_1 T_1 + c_1 T_2 + q_1,$$

$$(\rho C_p)_n \frac{dT_n}{dt} = a_n T_{n-1} - b_n T_n + q_n, \quad q_n = c_n T_R.$$

В матричной форме система дифференциальных уравнений (3) запишется так:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = AT + Q, \quad (4)$$

где A – трех-диагональная матрица; T и Q – векторы-столбцы определяются в следующем виде:

$$A = \begin{bmatrix} -b_1 & c_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_2 & -b_2 & c_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & -b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_n & -b_n \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ 0 \\ c_n T_R \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ \dots \\ T_{n-1}(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты (l, s, r, C_p) вычисляются в узлах пространственной сеточной области x_j как функции температуры T_j . Численное решение уравнений (4) выполняется в системе компьютерной математики MatLab 7 с использованием функции ode23t. Температура воды в центре плоского слоя ($x_l = 0$) находится после решения системы уравнений (3) по формуле [49]:

$$T_0(t) = (9T_1(t) - T_2(t)) / 8.$$

1.3. Волновое уравнение. Для решения волнового уравнения (1) строится его конечно-разностный аналог, приводящий к системе линейных уравнений относительно электрического поля E в узлах сетки. Система уравнений в матричной форме записывается так:

$$BE = F,$$

$$B = \begin{bmatrix} -b_1 & c_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_2 & -b_2 & c_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & -b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_n & -b_n \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ E_R \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ \dots \\ E_{n-1}(t) \\ E_n(t) \end{bmatrix},$$

$$a_j = c_j = 1, \quad b_j = 2 - k_0^2 \varepsilon_{K,j} \Delta x^2, \quad j = 2, 3, \dots, n, \\ a_1 = c_1 = 1, \quad b_1 = 1 - k_0^2 \varepsilon_{K,j} \Delta x^2.$$

Численное решение волнового уравнения проводится аналогично решению уравнения энергии (см. выше).

1.4. Общее решение волнового уравнения. Решение волнового уравнения (1) в области плоского слоя воды I (рисунок 2.2) запишется так:

$$E(x, t) = E_0(t)j(x),$$

где $E_0(t)$ – напряженность электрического поля в центре плоского слоя. Волновое уравнение (1) и граничные условия (2) сводятся к следующему виду относительно безразмерной функции $\phi(x)$:

$$\phi''(x) + k_\omega^2 \phi(x) = 0, \quad \phi(0) = 1, \quad \phi'(0) = 0.$$

Такой подход относительно функции $\phi(x)$, дает возможность решить задачу Коши для волнового уравнения в безразмерном виде способом, разработанным для решения уравнения энергии (1).

2. Обобщенное решение волнового уравнения

Предлагается методика решения уравнений электродинамики с однородными коэффициентами для произвольных твердых, жидких, газообразных и плазменных состояний вещества. В рамках полученного обобщенного решения проводится расчет характеристик керамики, воды и плазмы в форме следующих геометрических конфигураций: плоский слой, протяженный цилиндр, сфера.

2.1. Уравнения Максвелла. При взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, находящимся в твердом, жидком, газообразном или плазменном состояниях, возникают сложные нелинейные физические явления: отражение излучения от вещества, прохождение излучения сквозь вещество или поглощение (диссипация) мощности потока излучения в веществе. При поглощении энергия излучения переходит в кинетическую энергию движения частиц вещества, которое нагревается, изменяются его свойства и характер взаимодействия с электромагнитным полем, что приводит к перестройке всех характеристик вещества и даже переход в другое состояние.

Процесс распространения электромагнитного излучения и взаимодействие его с веществом определяется на основе решения уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t; \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

Связи между векторами плотности электрического тока, напряженностью и индукцией электрического и магнитного полей определяются уравнениями электромагнитного состояния с практически статическими значениями коэффициентов: σ , ϵ , μ [38, 39]:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}. \quad (6)$$

Математическая структура уравнений Максвелла позволяет обобщить теоретический анализ взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, находящимся в твердом, жидком, газообразном или плазменном состоянии.

Общее решение уравнения Максвелла связано с большими математическими трудностями из-за нелинейного характера уравнений и сложной зависимостью электромагнитных свойств вещества от температуры, давления, частоты электромагнитного поля, граничных условий и наличия эффектов волнового характера: интерференции, отражения, рассеяния (диссипации) электромагнитных волн в среде. Поэтому с помощью известных математических преобразований приведем уравнения Максвелла к обобщенному волновому уравнению.

2.2. Волновые уравнения. Рассмотрим распространение электромагнитного излучения с гармоническими составляющими векторов напряженности электрического и магнитного полей:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \cdot \exp(i\omega t), \quad \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) \cdot \exp(i\omega t). \quad (7)$$

Из первой пары уравнений Максвелла (5) с учетом (7), получим дифференциальное уравнение для комплексной амплитуды напряженности электрического поля $\vec{E}(\vec{r})$ [33, 38, 39]:

$$\Delta \vec{E} - \text{grad} \text{div} \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad k = k_0 \sqrt{\epsilon_k}, \quad k_0 = \omega / c, \quad c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}. \quad (8)$$

Здесь k k_0 – волновые числа в среде и в вакууме; c – скорость света в вакууме. Аналогичным способом из системы уравнений Максвелла выводится дифференциальное уравнение для комплексной амплитуды напряженности магнитного поля $\vec{H}(\vec{r})$ [33, 38, 39]:

$$\Delta \vec{H} - \frac{1}{\epsilon_k} [\text{grad} \epsilon_k \times \text{rot} \vec{H}] + k^2 \vec{H} = 0. \quad (9)$$

При анализе взаимодействия электромагнитного излучения с различными веществами, используются уравнения (8) или (9), выбор которого зависит от специфики рассматриваемых условий. Например, при расчете напряженности электрического поля из уравнения (8) напряженность гармонического магнитного поля вычисляется из уравнения Фарадея:

$$\vec{H} = -(i\omega)^{-1} \text{rot} \vec{E}. \quad (10)$$

Из решения уравнений (8)–(10) следует, что характеристики электромагнитного излучения и рассматриваемого вещества определяются только от изменения комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k , как функции температуры, давления и частоты электромагнитного поля:

$$\epsilon_k = \epsilon_k(\vec{O}, D, \omega), \quad \epsilon_k = \epsilon_r - i\epsilon_i = \epsilon - i\sigma / \epsilon_0 \omega, \quad \epsilon = \epsilon_r = R\hat{a}(\epsilon_{\hat{e}}), \quad \epsilon_i = \text{Im}(\epsilon_{\hat{e}}),$$

где w – частота электромагнитного излучения; $\varepsilon = \varepsilon_r$ – действительная (вещественная) и ε_i – мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости; $\varepsilon_0 = 8,8510^{-12} \text{ ф/м}$ – абсолютная диэлектрическая постоянная; σ – электропроводность; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ гн/м}$ – абсолютная магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды.

2.3. Приближение однородных коэффициентов. Для построения аналитических решений и качественного исследования взаимодействия электромагнитного поля с веществом, находящимся в твердом, жидком, газообразном или плазменном состояниях, большую роль играют одномерные задачи, связанные с распространением электромагнитных волн в однородной среде. Например, полагая зависимость комплексной диэлектрической проницаемости среды от одной пространственной переменной, В.Л. Гинзбург в монографии [33] получил ряд аналитических решений уравнения (8) в декартовой системе координат.

Развивая данную методику исследования, рассмотрим случаи, когда вещество взаимодействует с электромагнитным излучением заданной мощности, а коэффициенты уравнений (8), (9), электропроводность и комплексная диэлектрическая проницаемость – заданы в виде ступенчатого однородного распределения:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq R_c : \sigma = \text{const} = \sigma_0, \quad \varepsilon_k = \text{const} = \varepsilon_{k0}, \\ x > R_c : \sigma = 0, \quad \varepsilon_k = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Подобная аппроксимация электропроводности и диэлектрической проницаемости (11) широко применяется в рамках «каналовых моделей» при исследовании нагрева плазмы в дуговых, высокочастотных и СВЧ (микроволновых) разрядах [39]. Как было отмечено Ю.П. Райзером [39], применение «каналовых моделей» позволило достаточно просто решить нелинейные уравнения, установить физическую закономерность горения электрических разрядов, определить связь между внешними управляющими параметрами и характеристиками плазмы. Данная методика была использована при численном анализе нагрева керамических материалов и жидких сред (дистиллированная вода) в работах [14, 23], где «токопроводящий канал» полагался равным характерному размеру исследуемого вещества с интенсивной диссипацией мощности электромагнитного излучения.

2.4. Решение волнового уравнения в рамках приближения однородных коэффициентов среды, дает возможность аналитически решить волновое уравнение (8) или (9), определить отражение, прохождение и поглощение мощности электромагнитного излучения, задать источник тепла и решить уравнение энергии.

Рассмотрим взаимодействие электромагнитного излучения с различными состояниями вещества: керамика, вода, плазма. Предполагается, что исследуемое вещество представляет собой среду с однородными коэффициентами (s, ε_k): плоский слой (толщина $D = 2R_c$) с двухсторонним (симметричным) или односторонним подводом плоской электромагнитной волны, цилиндр (радиуса R_c) в поле симметричной цилиндрической электромагнитной волны типа «радиальная линия» [25, 27], шар (радиуса R_c) в поле излучения сферических электромагнитных волн [27].

Решение уравнения (8) в области диссипации мощности электромагнитного излучения в рассматриваемых средах (керамика, вода, плазма), можно записать так:

а) для плоской пластины ($|x| < R_c$):

$$\vec{E} = \vec{e}_z E_0 \tilde{\Psi}_1(kx);$$

б) для бесконечного цилиндра ($r < R_c$):

$$\bar{E} = \bar{e}_z E_0 \tilde{\Psi}_2(kr);$$

в) для шара ($r < R_c$):

$$\bar{E} = \frac{3}{2} E_0 \left\{ \bar{e}_\theta \sin \theta \cdot \frac{1}{kr} \frac{d}{dr} [r \tilde{\Psi}_3(kr)] - \bar{e}_r 2 \cos \theta \cdot \frac{\tilde{\Psi}_3(kr)}{kr} \right\}.$$

Здесь через $\bar{e}_z$, $\bar{e}_r$, $\bar{e}_\theta$ обозначены соответственно единичные орты: вдоль оси z в декартовой и цилиндрической системах координат, и вдоль осей r , θ – в сферической системе; E_0 соответствует амплитуде микроволнового электрического поля в начале координат, а функции $\tilde{\Psi}_n$ ($n = 1, 2, 3$) выражаются через гармоническую функцию, цилиндрическую $J_0(\zeta)$ и сферическую $j_1(\zeta)$ функций Бесселя, в следующем виде:

$$\tilde{\Psi}_1(\zeta) = \cos \zeta, \quad \tilde{\Psi}_2(\zeta) = J_0(\zeta), \quad \tilde{\Psi}_3(\zeta) = j_1(\zeta).$$

Вне области диссипации мощности электромагнитного излучения решением уравнения (8) являются суперпозиции падающих (подводимых) на вещество и отраженных от него электромагнитных волн соответствующей симметрии, которые выражаются через амплитуду напряженности электрического поля:

а) для плоской пластины ($|x| > R_c$):

$$\bar{E} = \bar{e}_z \{ C_\pm \exp(\pm i k_0 x) + B_\pm \exp(\mp i k_0 x) \},$$

где $C_\pm = C_\pm^*$, $B_\pm = B_\pm^*$ – амплитуды падающих (подводимых) и отраженных (* комплексно сопряженных) плоских электромагнитных волн;

б) для бесконечного цилиндра ($r > R_c$):

$$\bar{E} = \bar{e}_z \{ C H_0^{(1)}(k_0 r) + B H_0^{(2)}(k_0 r) \},$$

здесь C , B – амплитуды падающей (подводимой) и отраженной цилиндрических волн; $H_0^{(1,2)}$ – функции Ханкеля 1-го и 2-го рода нулевого порядка;

в) для шара ($r > R_c$):

$$\begin{aligned} \bar{E} = C \left\{ \bar{e}_\theta \sin \theta \cdot \frac{1}{k_0 r} \frac{d}{dr} [r h_0^{(1)}(k_0 r)] - \bar{e}_r 2 \cos \theta \cdot \frac{h_0^{(1)}(k_0 r)}{k_0 r} \right\} + \\ + B \left\{ \bar{e}_\theta \sin \theta \cdot \frac{1}{k_0 r} \frac{d}{dr} [r h_0^{(2)}(k_0 r)] - \bar{e}_r 2 \cos \theta \cdot \frac{h_0^{(2)}(k_0 r)}{k_0 r} \right\}, \end{aligned}$$

где C , B – амплитуды падающей (подводимой) и отраженной сферических волн; $h_0^{(1,2)}$ – сферические функции Ханкеля.

Поглощаемая мощность диссипации электромагнитного излучения Q_d и коэффициент поглощения – η в среде рассматриваемого вещества, находятся из следующих выражений:

$$Q_d = Q - Q_r = \eta Q, \quad \eta = Q / Q = 1 - |B / C|^2.$$

Полученные значения мощности подводимого и отраженного электромагнитного излучения – Q_n, Q_r , выраженные через амплитуды падающей и отраженной электромагнитных волн, приведены в таблице 1. Единицы измерения размерности мощности подводимого и отраженного электромагнитного излучения используются в системе СИ: $Вт/м^2$ – для плоской волны; $Вт/м$ – для цилиндрической волны; $Вт$ – для сферической волны).

Таблица 1 – Мощность подводимого и отраженного электромагнитного излучения

Симметрия	Q_n	Q_r
Плоская	$\frac{1}{\mu_0 c} C ^2$,	$\frac{1}{\mu_0 c} B ^2$
Цилиндрическая	$\frac{2}{\mu_0 \omega} C ^2$,	$\frac{2}{\mu_0 \omega} B ^2$
Сферическая	$\frac{4\pi\mu_0 c}{3} C ^2$,	$\frac{4\pi\mu_0 c}{3} B ^2$

2.5. Определение коэффициентов поглощения и отражения. При симметричном подводе мощности электромагнитного излучения к плоскому слою исследуемого вещества, коэффициенты поглощения и отражения электромагнитного излучения (η, k_r) связаны между собой следующим соотношением:

$$k_r + \eta = 1. \quad (12)$$

Для определения коэффициента отражения необходимо использовать условия на границе раздела двух сред, дающие линейную связь между амплитудой электрического поля E_θ , с амплитудами C и B . Такими условиями являются непрерывность тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей в пренебрежении плотностью поверхностных электрических токов.

Из приведенных выше решений получим следующие выражения для коэффициента отражения при различных геометрических конфигурациях рассматриваемого вещества:

а) для плоского слоя:

$$k_r = \left| \frac{\cos kR_c - i\sqrt{\varepsilon} \sin kR_c}{\cos kR_c + i\sqrt{\varepsilon} \sin kR_c} \right|^2; \quad (13)$$

б) для бесконечного цилиндра:

$$k_r = \left| \frac{J_0(kR_c)H_1^{(1)}(k_0R_c) - \sqrt{\varepsilon}J_1(kR_c)H_0^{(1)}(k_0R_c)}{J_0(kR_c)H_1^{(2)}(k_0R_c) - \sqrt{\varepsilon}J_1(kR_c)H_0^{(2)}(k_0R_c)} \right|^2; \quad (14)$$

в) для шара:

$$k_r = \left| \frac{j_1(kR_c) \frac{d}{dr}(rh_1^{(1)}(k_0r))_{r=R_c} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}h_1^{(1)}(k_0R_c) \frac{d}{dr}(rj_1(kr))_{r=R_c}}{j_1(kR_c) \frac{d}{dr}(rh_1^{(2)}(k_0r))_{r=R_c} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}h_1^{(2)}(k_0R_c) \frac{d}{dr}(rj_1(kr))_{r=R_c}} \right|^2. \quad (15)$$

Рассмотрим особенности изменения коэффициента отражения для микроволнового диапазона частот в пространстве переменных (n, κ) . Показатель преломления n и коэффициент поглощения k связаны с комплексной диэлектрической проницаемостью следующим соотношением:

$$\varepsilon_k = (n - i\kappa)^2 = \varepsilon_r - i\varepsilon_i = \varepsilon - i\sigma / \varepsilon_0 \omega.$$

Выразим показатель преломления и коэффициент поглощения через действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь следующим образом:

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \varepsilon_r (1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{1}{2} \varepsilon_r (-1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})}, \quad \tan \delta = \varepsilon_i / \varepsilon_r.$$

2.6. Анализ результатов расчета. В результате расчета, в качестве примера, рассмотрим особенности распространения электромагнитного излучения в таких состояниях вещества, как алюминиевая керамика, дистиллированная вода, СВЧ-плазма в воздухе и аргоне. Коэффициенты электропроводности и диэлектрической проницаемости берутся из тех же источников, что и в работах [26].

Как показали результаты расчета (рисунок 2), нагрев какого-либо вещества электромагнитным излучением обусловлен диапазоном изменения характеристик данных сред: показателем преломления и коэффициентом поглощения (n, κ) . Например, при изменении температуры плазмы СВЧ (микроволнового) разряда в аргоне от 4000К до 6000К при атмосферном давлении, границы изменения коэффициента поглощения изменяются в интервале $k \sim 1,50$, при микроволновом нагреве дистиллированной воды до температуры кипения они составляют $k \sim 0,5, 3$, а при нагреве керамики (оксид алюминия Al_2O_3) от 300К до 2000К – изменяются в пределах $k \sim 0,01, 0,1$ (рисунок 2).

Рисунок 2 – Функциональная связь между показателем преломления и коэффициентом поглощения для различных сред (керамика, вода, плазма), $\omega = 10 \text{ ГГц}$

Распределение модуля напряженности электрического поля в рассматриваемых средах, имеющих форму плоского слоя, выразим через показатели преломления и поглощения:

$$|E(x)| = E_0 \sqrt{(ch2k_0\kappa x + \cos 2k_0nx) / 2} . \quad (16)$$

В соответствии с данным выражением (16), изменение модуля напряженности электрического поля в центре плоского слоя какой-либо среды ($x=0: E = E_0$) по отношению к модулю напряженности электрического поля на его боковой поверхности ($x=R_c: E = E_c$), определяется выражением:

$$|E_c / E_0| = \sqrt{\frac{ch2p\kappa + \cos 2pn}{2}} ,$$

где $p = k_0R_c = \omega R_c / c = 2\pi R_c / \lambda_0$ – безразмерный параметр. Из проведенного расчета по изменению модуля отношения напряженностей электрического поля $|E_c / E_0|$ в пространстве переменных $(pn, p\kappa)$ видно (рисунок 3), что в полосе изменения $0 \leq p\kappa < 1.5$ поведение модуля имеет осциллирующий характер, а при значениях $p\kappa > 2$ – переходит в экспоненциально нарастающий.

Рисунок 3 – Линии уровня уменьшения напряженности электрического поля в центре плоского слоя по отношению к боковой поверхности в пространстве переменных $(pn, p\kappa)$

Из отношения амплитуд напряженностей электрического поля в области переменных (n, κ) , для случая $p\kappa \gg 1$, следует:

$$|E_0 / E_c| \approx 1/2 \exp(-p\kappa) \ll 1.$$

Данное выражение определяет физику взаимодействия электромагнитного излучения с плоским слоем какого-либо вещества (керамика, вода, плазма). Отметим, что в этом случае нагрев исследуемого вещества электромагнитным излучением происходит в узкой области вблизи боковой поверхности стенок плоского слоя. В равной степени этот вывод относится к микроволновому нагреву вещества в форме протяженного цилиндра или шара.

Определение параметров (p, κ) необходимо для исключения или, наоборот, для рассмотрения определенных режимов нагрева вещества электромагнитным излучением. Например, при реализации режима микроволнового нагрева вещества, когда источники

тепла достаточно равномерно распределены по всему объему среды, необходимо выполнить условие: $p\kappa \approx 1$. В этом случае следуют следующие характерные электромагнитные частоты и пространственные масштабы:

- для плазмы СВЧ разряда: $p \sim 1/10$, $w \sim 10$ ГГц, $R_c \sim 3$ мм;
- для дистиллированной воды: $p \sim 1$, $w \sim 30$ ГГц, $R_c \sim 1$ см;
- для керамического материала: $p \sim 10$, $w \sim 200$ ГГц, $R_c \sim 3$ см.

Коэффициент отражения. Для рассмотрения особенностей изменения коэффициента отражения в зависимости от показателей преломления и уменьшения (ослабления) электромагнитного излучения при распространении в какой-либо среде, вводятся следующие функции:

$$\begin{aligned} f_1(\xi, \zeta) &= (1 + n^2 + \kappa^2) \operatorname{ch} 2\zeta + (1 - n^2 - \kappa^2) \cos 2\xi, \\ f_2(\xi, \zeta) &= 2n \operatorname{sh} 2\zeta + 2\kappa \sin 2\xi, \end{aligned} \quad (17)$$

где переменные ξ, ζ соответственно равны $\xi = pn$, $\zeta = p\kappa$. Тогда формулу (13) можно представить следующим образом:

$$k_r = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}, \quad (18)$$

Как следует из полученных выражений (17) и (18), при малых значениях показателя затухания электромагнитного излучения ($p\kappa \ll 1$) имеет место квазипериодическая зависимость коэффициента отражения для плоского слоя относительно показателя преломления (рисунок 4).

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента поглощения плоского слоя от параметра $\xi = k_0 R_c n$

В рассматриваемом диапазоне параметров выражения для определения коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения, можно упростить и привести к следующему виду:

$$k_r = \frac{1 - F}{1 + F}, \quad \eta = \frac{2F}{1 + F}, \quad F = \frac{2\kappa\xi(1 + \frac{\sin 2\xi}{2\xi})}{1 + (n^2 - 1)\sin^2 \xi}, \quad \xi = k_0 R_c n. \quad (19)$$

Из полученного выражения (19) следует, что зависимость коэффициента поглощения от параметра ξ , представляющего собой частоту электромагнитного поля или толщину плоского слоя, имеет колебательный характер с периодом, близким к числу p (рисунок 4). Вблизи точек максимума, соответствующим целочисленным значениям величины ξ/π , происходит резонансное поглощение микроволновой мощности в процессе нагрева заданной среды. При ξ/π в данной среде на толщине плоского слоя укладывается целое число длин волн. При полуцелых значениях ξ/π , коэффициент поглощения минимален, а коэффициент отражения имеет точки максимума.

Полученные результаты имеют универсальный характер, так как показатель преломления и коэффициент затухания электромагнитного поля не связаны с выбором конкретной средой. При исследовании какой-либо среды (твердые, жидкие, газообразные, плазма) и задания зависимостей $n(T)$ и $\kappa(T)$, можно выполнить следующее графическое построение: рассчитать и построить набор изолиний функции $k_r(n, \kappa)$ для некоторого диапазона изменения переменных n и k (рисунок 5).

Рисунок 5 – Характер изменения коэффициента отражения в пространстве переменных (n, k) на разных масштабах показателя затухания k и параметра p : $p = 0,1$ (а, б); $p = 5$ (в, г).
Изолинии (б, г) для функции $k_r(n, k)$ рассчитываются от 0 до 1 с шагом 0,05

Проведем расчет и построим график зависимости $\kappa(n)$ для исследуемых сред (алюминиевая керамика, плазма СВЧ-разряда в воздухе), используя данные $n(T)$ и $\kappa(T)$, как средство параметрического задания функции $\kappa(n)$ (рисунки 6, 7, пунктир). Пересечение линии $\kappa(n)$ с изолиниями поля $k_r(n, \kappa)$ позволяет восстановить температурную зависимость коэффициента отражения и поглощения.

Рисунок 6 – Изолинии функции двух переменных $k_r(n, \kappa)$: для примера пунктиром отмечено параметрическое представление температурных зависимостей $n(T)$ и $\kappa(T)$ для алюминиевой керамики (слева), температурная зависимость коэффициента отражения (справа)

Рисунок 7 – Изолинии коэффициента отражения $k_r(n, \kappa)$ и параметрическое представление (пунктир) температурных зависимостей $n(T)$ и $\kappa(T)$ для плазмы СВЧ-разряда в воздухе (слева), температурная зависимость коэффициента отражения воздуха (справа)

Цилиндр и сфера. Рассмотрим выражения (17) и (18), полученные для коэффициента отражения плоского слоя в случае протяженного цилиндра и сферы. При условии $pn \gg 1$, асимптотические формулы для функций Бесселя и Ханкеля (14), (15) приводятся к виду, аналогичному выражению (18) с функциями f_1 и f_2 , определенными формулами (17):

$$k_r = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}.$$

Как показывают расчеты, это реализуется при значениях $pn > 3$. Если модифицированную переменную ξ заменить в (17) на разность $\xi - \Theta$, то параметр θ будет соответственно равен:

- для пластины $\theta = 0$,
- для цилиндра $\theta = p/4$,
- для шара $\theta = p/2$.

Тогда для коэффициента поглощения микроволновой мощности излучения при условии $pk \ll 1$, можно сделать обобщение формулы (19):

$$\eta = \frac{2F}{1+F}, \quad F = \frac{\sqrt{\varepsilon'} \xi \tan \delta \left(1 + \frac{\sin 2(\xi - \Theta)}{2\xi}\right)}{1 + (\varepsilon' - 1) \sin^2(\xi - \Theta)}.$$

В этом случае для протяженного цилиндра и шара имеют место отмеченные выше закономерности изменения коэффициентов отражения и поглощения, полученные для плоского слоя с учетом сдвига переменной ξ на параметр Θ , учитывающий особенности геометрии нагреваемого объекта.

Коэффициент отражения плоского слоя. Рассмотрим характер поведения коэффициента отражения плоского слоя в зависимости от показателя преломления и параметра $p = \omega R_c / c$, рассчитанного при фиксированном малом значении показателя уменьшения (ослабления) электромагнитного поля (рисунок 8).

Рисунок 8 – Изменение коэффициент отражения электромагнитного излучения как функция двух переменных (n, p) , $k = 0, 1$

В силу линейной зависимости параметра p от частоты электромагнитного поля и от линейного размера среды, коэффициент отражения имеет вид затухающих квазипериодических колебаний (при фиксации переменной n). Сечение поверхности $k_r(n, \kappa)$ плоскостью $p = \text{const}$ дает линию, у которой число точек экстремумов растет при увеличении

значений параметра p . Следовательно, при однозначной связи показателя преломления, температуры и малом значении показателя ослабления (уменьшения) электромагнитного излучения, температурная зависимость коэффициента отражения имеет осцилляционный характер. В этом случае число точек максимума коэффициента k_r растет при увеличении частоты микроволнового излучения.

3. Нагрев керамической пластины в микроволновой печи

В настоящее время интенсивно развиваются современные технологии нагрева керамических материалов микроволновым излучением [19–23]. Для этих целей в Институте прикладной физики РАН разработаны специальные гиротронные комплексы с электромагнитным излучением мощностью до 100 кВт в диапазоне частот до 200 ГГц в непрерывном и импульсном режимах работы. Керамические материалы, полученные с помощью данных устройств, обладают высокими механическими и физическими свойствами, так как в многомодовых камерах при микроволновом нагреве реализуется высокая степень однородного объемного распределения энергии.

Для теоретического исследования характеристик керамической пластины в зависимости от мощности и частоты электромагнитного излучения предлагается математическая модель нагрева керамической пластины в микроволновой печи, разработанная с участием автора [21–23].

3.1. Математическая модель. Рассматривается нестационарный нагрев плоской керамической пластины в микроволновой печи (рисунок 2.1) с симметричным подводом мощности плоской электромагнитной волны с компонентами:

$$\vec{E}(0, 0, E_z = E(x)) \exp(i\omega t), \quad \vec{H}(0; H_y = H(x), 0) \exp(i\omega t).$$

Моделирование процесса микроволнового нагрева керамической пластины проводится на основе решения нестационарного уравнения баланса энергии и приведенного волнового уравнения:

$$\rho_c C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \varepsilon_i \omega \varepsilon_0 E E^*, \quad (20)$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + k_0^2 \varepsilon_K E = 0.$$

Вследствие симметрии, расчетная область задается в интервале $0 \leq x \leq R$. В случае охлаждаемых стенок камеры микроволновой печи начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq R: \quad T(x, 0) = T_R, \quad E(x, 0) = 0;$$

$$t > 0, \quad x = 0: \quad \partial T / \partial x = 0, \quad \partial E / \partial x = 0;$$

$$x = R, \quad T = T_R, \quad E = E_R.$$

На поверхности (пластина – газовая среда) полагается непрерывность температуры и тепловых потоков, а электрическое поле на стенках камеры $E_R(t)$ определяется заданным значением подводимой мощности электромагнитного излучения $Q_n(t)$.

3.2. Метод решения. Как показали результаты [23], при микроволновом нагреве керамического материала из окиси алюминия, вследствие высокой теплопроводности, распределение температуры практически постоянно по сечению плоского слоя. Поэтому, при решении приведенного волнового уравнения (20) и определения напряженности электрического поля, можно воспользоваться приближением однородных коэффициентов:

$$E(x, t) = E_0(t) \cos kx, \quad k = k_0 \sqrt{\varepsilon_K}. \quad (21)$$

В центре пластины $E_0(t)$ связана с величиной подводимой мощности микроволнового излучения $Q_n(t)$ и максимальной температурой в центре пластины $T_0(t)$ через зависимость коэффициентов от T_0 , следующим соотношением [20]:

$$E_0(t) = \sqrt{4\mu_0 c Q_i(t)} / \left| \cos(kR_c) + i\sqrt{\varepsilon_K} \sin(kR_c) \right|. \quad (22)$$

При заданном законе изменения подводимой мощности электромагнитного излучения, выражения (21), (22) определяют источник тепла в уравнении энергии (20). Численное решение уравнений (20) проводится методом контрольного объема в системе компьютерной математики MatLab 7 с использованием функции ode23t (приложение 1).

Для коэффициентов отражения и поглощения (ρ , η) электромагнитной мощности в керамическом материале выводятся следующие зависимости от температуры в центре пластины [1]:

$$\rho = \left| \frac{\cos kR_c - i\sqrt{\varepsilon_K} \sin kR_c}{\cos kR_c + i\sqrt{\varepsilon_K} \sin kR_c} \right|^2, \quad \eta = 1 - \rho. \quad (23)$$

Для относительно прозрачных материалов $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, $k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} \operatorname{tg} \delta \ll 1$, коэффициент поглощения пластины (23) определяется выражением [23]:

$$\eta = \frac{2F}{1+F}, \quad F = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} \xi \operatorname{tg} \delta (1 + \frac{\sin 2\xi}{2\xi})}{1 + (\varepsilon_r - 1) \sin^2 \xi}, \quad \xi = k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (24)$$

Формула (24) показывает, что зависимость изменения $\eta(\xi)$ имеет значительные квазипериодические колебания резонансного характера с периодом, близким к π , а амплитуда колебаний практически линейно зависит от величины $k_0 R_c \sqrt{\varepsilon_r} \operatorname{tg} \delta$ (рисунок 9). Вследствие этого имеет место немонотонная связь между подводимой мощностью электромагнитного излучения и температурой в центре пластины (рисунки 10, 11).

Максимумы зависимости $Q_n(T_0)$ играют особую роль при нестационарном нагреве керамических материалов и позволяет выделить участки устойчивого ($dQ_n/dT_0 > 0$) и неустойчивого ($dQ_n/dT_0 < 0$) процессов нагрева.

3.3. Результаты. Проводится расчет микроволнового нагрева плоской керамической пластины из окиси алюминия Al_2O_3 при $Q_n = 80 \text{ кВт/м}^2$, $f = 30 \text{ ГГц}$, $R_c = 15 \text{ мм}$ в камере с охлаждаемыми стенками и радиусом $R = 50 \text{ мм}$, заполненной воздухом при атмосферном

Рисунок 9 – Зависимость коэффициента поглощения пластины от безразмерного параметра ξ / π

Рисунок 10 – Коэффициент отражения и плотность подводимой мощности как функции частоты электромагнитного излучения и температуры в центре керамической пластины

Рисунок 11 – Зависимость подводимой мощности и коэффициента отражения электромагнитного излучения от температуры в центре керамической пластины

давлении. Коэффициенты ($\lambda, \rho, C_p, \varepsilon_k$) для керамического материала из окиси алюминия на частоте $f = 30 \text{ ГГц}$ и для воздуха берутся из тех же источников, что и в [23].

Как следует из результатов расчетов (рисунок 12), для данного режима микроволнового нагрева керамической пластины повышение температуры до $T_0 = 1000\text{K}$ в течение 15 часов идет практически пропорционально времени нагрева. Следует отметить, что вследствие высокой теплопроводности окиси алюминия профиль температуры по сечению пластины практически постоянный: $T(x, t) \approx \text{const}$, а в окружающем пластину воздухе камеры печи температура изменяется по параболическому закону от температуры на поверхности керамического материала T_c до температуры на охлаждаемых стенках: $T = T_R = 20^\circ\text{C}$.

Диссипация мощности электромагнитного излучения в керамическом материале изменяется незначительно $Q_d \approx 2 \text{ кВт/м}^2$, а коэффициент отражения $\rho \approx 95\%$. Далее, в течение двух часов нагрева в интервале ($15 < t < 17$ часов) коэффициент отражения резко уменьшается практически до 30% , возрастает поглощение мощности электромагнитного излучения $Q_d \sim 50 \text{ кВт/м}^2$, быстро увеличивается температура керамической пластины до 1700K . При $t > 17$ часов нагрева скорость повышения температуры пластины постепенно уменьшается, и температура 2000K достигается за время $t \approx 18,3$ часа.

В процессе нагрева (рисунок 12) можно выделить следующие режимы: быстрый нагрев ($\max |E_o|(T_o), \min \rho(T_o)$), медленный ($\min |E_o|(T_o), \max \rho(T_o)$) и квазистационарный нагрев ($|E_o|(T_o) \approx \text{const}, \rho(T_o) \approx \text{const}$).

Время нагрева $t_{\max}$ пластины до заданной температуры 2000K нелинейным образом зависит от частоты и подводимой мощности электромагнитного поля (рисунок 13). При частоте $f = 30 \text{ ГГц}$ время нагрева керамического изделия, как функции подводимой мощности электромагнитного излучения, изменяется по закону, близкому к экспоненциальному. Зависимость времени нагрева от частоты и подводимой мощности электромагнитного поля имеет более сложный осциллирующий характер. Это связано с немонотонным характером изменения коэффициентов отражения и поглощения электромагнитной энергии в керамическом материале (рисунок 10). С ростом частоты электромагнитного излучения происходит уменьшение времени нагрева плоской керамической пластины до заданной температуры.

3.4. Теплоизолированные стенки камеры. Большой интерес для практических целей представляет нагрев керамических изделий в камере с теплоизолированными стенками, когда перенос тепла теплопроводностью в окружающий воздух и на охлаждаемые стенки камеры микроволновой печи отсутствует. Поэтому для ускорения процесса нагрева пластины следует исключить область камеры микроволновой печи, занимаемую воздухом ($R_c \leq x \leq R$) и поставить «адиабатические стенки» непосредственно на границе керамической пластины:

$$\delta = R_c : \partial T / \partial x = 0.$$

«Адиабатические стенки» должны быть сделаны из материала со следующими свойствами: $\lambda \approx 0, \varepsilon_r = \text{const}, \varepsilon_i \approx 0$. Практически не отводить тепло от керамической пластины в процессе нагрева и не оказывать влияние на распространение электромагнитных волн.

Как показали результаты расчета (рисунок 14), при нагреве плоской керамической пластины в такой «адиабатической» упаковке, профиль температуры практически не меняется по сечению пластины. Температура керамической пластины увеличивается практически линейно от времени нагрева (рисунок 14) на участках незначительного изменения

Рисунок 12 – Изменение T, η, E плоской керамической пластины и воздуха при нагреве в камере микроволновой печи с охлаждаемыми стенками

Рисунок 13 – Влияние подводимой мощности электромагнитного поля на нагрев керамической пластины

Рисунок 14 – Микроволновой нагрев керамической пластины в камере с «адиабатическими» стенками в режиме с фиксированной подводимой мощностью $Q_n = 80 \text{ кВт/м}^2$ (вверху) и в режиме линейного увеличения температуры (внизу)

Рисунок 15 – Зависимость времени нагрева t_{max} от частоты электромагнитного поля и толщины пластины: $R_c = 15 \text{ мм}$, $f = 30 \text{ ГГц}$, $Q_n = 30 \text{ кВт/м}^2$

коэффициента поглощения, а на участках резонансного изменения зависимости $\eta(\xi)$ наблюдается резкое повышение температуры. Нагрев керамического материала происходит в 1,5 раза быстрее ($t = 11,8$ часа), чем в камере с охлаждаемыми стенками. Характер изменения характеристик $T(t)$, $\rho(t)$, $Q_d(t)$ качественно остается таким же, как и при нагреве с охлаждаемыми стенками. Реализуется равномерный объемный нагрев микроволновым излучением керамической пластины с практически постоянным распределением температуры $T(x, t) \approx T_0(t)$.

В этом случае в камере с теплоизолированными стенками динамика нагрева пластины микроволновым излучением и характеристики самой пластины определяются из решения достаточно простого уравнения баланса энергии:

$$\rho_c C_p \frac{dT_0}{dt} = \frac{\eta Q_i}{2R_c}. \quad (25)$$

Рассмотрим следующие режимы нагрева керамической пластины электромагнитным излучением:

1. Задана постоянная подводимая мощность электромагнитного излучения. Тогда из уравнения (25) находится время нагрева керамической пластины до заданной температуры:

$$t(T_0) = \frac{2R_c}{Q_i} \int_{T_R}^{T_0} \frac{\rho_c C_p}{\eta} dT. \quad (26)$$

Из выражения (26) видно, что время нагрева t_{max} до заданной температуры T_0 квазипериодическим образом зависит от частоты электромагнитного излучения и от толщины пластины (рисунок 15).

2. Задана скорость линейного увеличения температуры керамической пластины:

$$T_0(t) = T_R + (T_m - T_R)t / t_m.$$

Из уравнения (25) находится зависимость подводимой мощности микроволнового излучения, обеспечивающая линейный рост температуры от времени через коэффициенты (ρ_c, C_p, η) :

$$Q_i(t) = \frac{2R_c(T_m - T_R)}{t_m} \frac{\rho_c C_p}{\eta}.$$

Озеро Сары-Челек. Кыргызстан

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bykov Yu.V., Semenov V.E.* State of the art of the millimeter wave processing of materials // Proc. 7th Intern. Conf. on Microwave and High Frequency Heating / ed. by D. Sánchez-Hernández et al. (Valencia: Servicio de Publicaciones UPV). 1999. Pp. 459–462.
2. *Bykov Yu., Rybakov K., Semenov V.* High-temperature microwave processing of materials // Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. Vol. 34. Pp. 55–75.
3. *Параносенков В.П., Быков Ю.В., Холопцев В.В. и др.* Микроволновое спекание керамики на основе нитрида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 1997. № 1. С. 11–13.
4. *Tiegs T.N., Kiggans J.O., Kimrey H.D.* Microwave processing of silicon nitride // Microwave Processing of Materials II / ed. by W.B. Snyder, W.H. Sutton, M.F. Iskander et al. Pittsburgh, PA, 1990. Pp. 267–272 (Materials Research Society // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 189).
5. *Kiggans J.O., Tiegs T.N.* Characterization of sintered reaction-bonded silicon nitride processed by microwave heating // Microwave Processing of Materials III / ed. by R.L. Beatty, W.H. Sutton, M.F. Iskander. Pittsburgh, PA, 1992. Pp. 285–289 (Materials Research Society: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 269).
6. *Chang I.A., Nguyen U.D.* Thermal modeling of lesion growth with radiofrequency ablation devices // Bio Medical Engineering On Line. 2004.
7. *Labonte S., Blais A., Legault S.R. et al.* Monopole antennas for microwave catheter ablation // IEEE Trans. on Microwave theory and techniques. 1996. Vol. 44. N 10. Pp. 1832–1840.

8. Князев В.Ю., Косый И.А., Малых Н.И., Ямпольский Е.С. Проникновение микроволнового излучения в воду (эффект “самопросветления”) // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 133–136.
9. Адамович А.Л., Гринчик Н.Н., Кундас С.П., Терехов В.И. Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах при микроволновом нагреве // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 2. С. 1–18.
10. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968. 312 с.
11. Postnikov A.V., Moldosanov K.A. Phonon-assisted radiofrequency absorption by gold nanoparticles resulting in hyperthermia // In Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics / eds.: A. Maffucci, S.A. Maksimenko. Springer: Dordrecht. The Netherlands, 2016. Pp. 171–201.
12. Postnikov A.V., Moldosanov K.A., Kairiyev N.J., Lelevkin V.M. Prospects for Terahertz Imaging the Human Skin Cancer with the Help of Gold-Nanoparticles-Based Terahertz-to-Infrared Converter. Chapter 9. In: Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics II; Antonio Maffucci and Sergey A. Maksimenko. The Netherlands: Springer Publisher, 2019. Pp. 151–173.
13. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Нагрев столба воды в круглом волноводе // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 10. С. 15–20.
14. Лелевкин В.М., Кулумбаев Э.Б., Козлов П.В., Кайыров Н.Ж. Моделирование микроволнового нагрева воды. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. 161 с.
15. Лелевкин В.М. Взаимодействие микроволнового излучения с твердыми и жидкими веществами // Матер. межд. конф. «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании». Бишкек: Известия КГТУ. 2011. № 24. С. 389–393.
16. Лелевкин В.М. Микроволновой нагрев плоского слоя воды // Вестник КНУ. 2011. Вып. 1. С. 42–48.
17. Козлов П.В. Моделирование микроволнового нагрева плоского слоя воды // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 3. С. 37–43.
18. Лелевкин В.М. Математическое моделирование микроволнового нагрева воды. LAMBERT, Academic Publishing. 2012. 200 с.
19. Kozlov P.V., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M. Channel model of ceramic plate heating with help of microwave space // Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Moscow: Yanus-K, 2006. Pp. 343–346.
20. Kozlov P.V., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M. Stationery thermal conditions the ceramic cylinder in the field of microwave radiation // Strong Microwave in Plasmas. IAP. Nizhny Novgorod. 2006. Vol. 2. Pp. 709–714.
21. Козлов П.В., Лелевкин В.М. Стационарный микроволновой нагрев керамической пластины // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 3. С. 1–5.
22. Kozlov P.V., Rafatov I.R., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M. On modelling of icrowave heating of a ceramic material // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. Pp. 2927–2935.
23. Моделирование и технология получения керамики на основе кремния / под общ. ред. В.М. Лелевкина, О.Н. Каныгиной. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2008. 222 с.
24. Lelevkin V.M., Otorbaev D.K., Schram D.C. Physics of non-equilibrium plasmas. North-Holland. Amsterdam (the Netherlands), 1992. 412 p.

25. ВЧ-СВЧ плазмотроны / С.В. Дресвин, А.А. Бобров, В.М. Лелевкин и др. // Низкотемпературная плазма. Т. 6. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1992. 319 с.
26. Лелевкин В.М., Кулумбаев Э.Б., Семенов В.Ф. Моделирование и расчет электрических разрядов // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том Х1–5 Прикладная химия плазмы. М.: ЯНУС-К. 2006. С. 437–501.
27. Масару Эмото. Послания воды: тайные коды кристаллов льда / пер. с англ. М.: ООО Изд. дом «София», 2005.
28. Петрянов И.В. Самое необыкновенное вещество в мире. М.: Изд-во Педагогика, 1981. 96 с.
29. Киреева Т.А. Конспект лекций: Гидрогеохимия. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016.
30. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин А.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: учебник для вузов. М.: Физматлит, 2008. 184 с.
31. Tesla N. Investigation of the damped oscilation in discharges // Electr. Eng. 1881. Pp. 13–23.
32. Hittorf W. Veber der Electrizaritsatsleitung der Gases // Ann. Physics. 1884. № 1. Pp. 90–38.
33. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: ГИФМЛ, 1960. 552 с.
34. Бабат Г.И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы // Вестник электропромышленности. 1942. № 3. С. 47–51.
35. Капица П.Л. Свободный плазменный шнур в высокочастотном поле при высоком давлении // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып. 6 (12). С. 1801–1866.
36. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ-генераторы плазмы: физика, техника, применение. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
37. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
38. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
39. Зенин С.В. Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса // Докл. РАН. 1993. Т. 332. № 3. С. 328–329.
40. Зенин С.В., Тяглов Б.В. Гидрофобная модель структуры ассоциатов молекул воды // Журнал физ. химии. 1994. Т. 68. № 4. С. 636–641.
41. Чижевский А.Л., Шишина Ю.Г. В ритме солнца. М.: Наука, 1969. 112 с.
42. Физический энциклопедический словарь. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1960; Энциклопедический словарь юного химика / сост. В.А. Крицман, В.В. Станцо. М.: Педагогика, 1982. 368 с.
43. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
44. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
45. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.–Л., 1958.
46. Buchner R., Barthel J., Stauber J. The dielectric relaxation of water between 0 °C and 35 °C // Chemical Physics Letters. 306. 1999. Pp. 57–63.
47. Meissner T., Wentz F.J. The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water From Microwave Satellite Observations // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. Vol. 42. N 9. September, 2004.
48. Калмыков Ю.П., Тутов С.В. О поглощении миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в водяном паре // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 75. № 3. С. 610–616.

49. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
50. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
51. *Collacico G.* Electrical potential of the water surface // *Chemica Scripta*. 1988. Vol. 28. N 2. Pp. 141–144.

UDC 53.072
BBK 32.86-01
L 43

Reviewers:

A.Zh. Zhainakov, doctor of physico-mathematical sciences,
professor, academician of the NAS of the Kyrgyz Republic;

G.S. Denisov, doctor of physico-mathematical sciences,
professor Published by decision of the KRSU SEB

Recommended for publication by Scientific
and Technical Council of KRSU

Lelevkin V.M.

L 43 THE MICROWAVE HEATING OF WATER: The Monograph. – Bishkek: Publishing house of KRSU, 2021. – 211 p.
DOI: 10.36979/978-9967-19-768-8-2021

ISBN 978-9967-19-768-8

The monograph is devoted to the mathematical modeling of fundamental school of modern physics: interaction of electromagnetic radiation with fluid medium. Electromagnetic and thermophysical phenomena, which occur at heating of water by microwave radiation, are considered on the example of simple models and “strict” numerical calculations. The new laws of water characteristics changes depending on frequency and power of electromagnetic field, geometry and size of glass vessel with water, methods of microwave radiation power input etc. were obtained.

The monograph is intended for wide circle of scientists, engineers and technologists, who works on problems of the interaction of electromagnetic radiation with a substance. This book can be useful as a tutorial for teachers, post-graduate and undergraduate students.

UDC 53.072
BBK 32.86-01

ISBN 978-9967-19-768-8

© SEIHVE KRSU, 2021
© Lelevkin V.M., 2021

CONTENTS

PREFACE	7
NOTATION KEYS.....	10
INTRODUCTION.....	11
Chapter 1. WATER, WATER PROPERTIES, MICROWAVE HEATING OF WATER	14
1.1. Main properties of water	14
1.2. Structure of water	20
1.3. Chemical properties of water	23
1.4. Physical properties of water	25
1.5. Water ratio	28
1.6. Microwave heating of water.....	32
1.7. Magnetic hydrodynamics equations.....	36
1.8. Water ions movement in the periodic electric field.....	40
1.9. Heat-transfer and gas dynamics equations	43
Chapter 2. ONE-DIMENSIONAL MODELS OF MICROWAVE HEATING OF WATER.....	46
2.1. Modelling of microwave water heating	46
2.2. Interaction of radiation with the isothermal layer of water.....	48
2.3. Heating of the flat water layer with symmetrical electromagnetic radiation power supply	61
2.4. The flat water level microwave heating analyses.....	66
2.5. Thermal insulation of the microwave oven walls and vessel with water	83
2.6. The influence of the walls width and material of the ceramic container	87
2.7. Homogeneous coefficient model	92
2.8. Water heating in the weak microwave field	94
2.9. Water flat layer intensive heating model	98
2.10. One-side supply of microwave radiation power	101
2.11. Water heating in the glass cylinder vessel.....	108
2.12. Water heating in the spherical vessel.....	118
2.13. Gas bubbles influence on the water heating characteristics	127
2.14. Linear changing of the electromagnetic radiation power supply	128
Chapter 3. 2-DIMENSIONAL MODELS OF MICROWAVE WATER HEATING	132
3.1. Microwave water heating in the circular waveguide.....	132
3.2. Microwave water heating with due regard to the flow dynamics.....	143
3.3. Microwave water heating in the rectangular waveguide	150
CONCLUSIONS	167

OPINION	171
SUPPLEMENT	176
1. Numerical solutions of differential equations	176
2. Generalized solution of wave equation	179
3. The ceramic plate heating in the microwave oven	190
LITERATURE	197
REVIEWERS	201
CONTENTS.....	202
OPINION	204
LITERATURE (TRANSLITERATION).....	208

Озеро Иссык-Куль и величественный Тянь-Шань. Кыргызстан

OPINION

The monograph presented the process of water heating by electromagnetic radiation. It is an attempt to familiarize students in detail with surprising properties and structure of water the molecule of which consists of very plain elements – hydrogen and oxygen. Though the structure of a water molecule is elementary, water heating by microwave radiation is a complex physical phenomenon. It is due to the poorly studied nonlinear processes that take place in interacting of the electromagnetic radiation with fluid media, water in particular.

That is why the monograph pays much attention to building various mathematical models of microwave water heating. For this purpose magnetic hydrodynamic equations were applied; numerical and analytical methods for solving were developed, the findings were calculated and analyzed. The research makes it possible to provide a picture of water characteristics and electromagnetic field changing depending on the power and microwave radiation frequency supply and the vessel with water geometrical size and material. Calculating of thermal, gas dynamic and electromagnetic characteristics of microwave water heating in spherical and rectangular waveguides identified the impact of thermal conductivity and the convective transfer of heat to water heating. Such an approach to investigating the interaction of water with electromagnetic radiation seems to be the most advisable today.

The microwave water heating process can be conditionally divided into the following stages.

1. Interacting of the electromagnetic radiation with water that results in a big emission of heat in the water due to the microwave radiation power dissipation in the antinode area of the electric field.

2. Occurrence of conductive and convective flows redistributing heat over the water in the glass vessel, and removing of the heat through the vessel walls and the ambient air to the walls of the microwave oven that are being cooled.

3. Gradual water heating with due regard to gas bubbles forming, growth, emission and the further boiling process.

The research established that it is quite difficult to answer the question put in the beginning of the monograph: *How the water heating process in the oven is triggered?* In order to give a full answer we need to know the frequency and power of the electromagnetic radiation, water properties, the vessel geometry, the radiation dissipation influence, convective heat flow and thermal conductivity influence on the water heating process. Besides, water in microwave heating is not a continuous one-phase medium. Gas bubbles start appearing and growing in it. Forming of the two-phase media (water – gas) in the water results in the electric fields and all the physics of water heating reconstruction in reaction to the new mechanism of heat exchange and the flow hydrodynamics connected with the gas bubbles forming and moving.

Apparently, the question raised above by the students can have a short traditional answer: *Interaction of electromagnetic radiation with water takes place in the microwave oven that results in heating the fluid by the microwave radiation energy.*

The theoretical models developed in the monograph make possible describing the thermal heating of distilled water by the microwave radiation within the continuous one-phase medium in the glass and ceramic vessels in flat-layers shapes, cylinder or sphere.

The mathematical models application can be widened, for example, for calculating water from the tap, spring or river. One only needs to set the necessary values of thermo-physical, removable and electric magnetic characteristics of water ($\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\sigma = \sigma(T, \omega)$, $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, \omega)$) comprised in magnetic hydrodynamics equations coefficients. Salts and impurities presence, the isotopic composition, the dependence on the temperature, pressure and the electric magnetic field frequency should be taken into consideration.

When considering water heating in different from glass or ceramics vessels, made from other dielectric and synthetic materials, or in any gas medium, it is necessary to set in the mathematical models the corresponding coefficients characterizing the vessel material ($\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\sigma = \sigma(T, \omega)$, $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, \omega)$) and gas properties ($\lambda = \lambda(T)$, $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\eta(T)$).

At present the developed methods of mathematical modelling for investigating the interaction of electromagnetic radiation with the substance can find a widespread use in many spheres of science, technology and medicine. Let us consider some of them for students and young scientists' knowing.

- Theoretical modelling and calculating of optimal environmentally friendly regimes of ceramic materials volumetric heating by electromagnetic radiation for making special products in microwave ovens.
- Converter heating of ultrafine nanoparticles at dissipation of electromagnetic energy of interaction with terahertz source radiation (object – man) in the infrared range of the electromagnetic waves scale. It can be used for detecting weapon hidden under the clothes (struggle against terrorism) or early diagnosing of cancer tumors.

- Reducing of an echo electromagnetic signal from the objects (stealth technology) for decreasing the risk of detecting air, sea, and land-based facilities by radar capabilities by means of radar absorbent coating of flying units, ships and other equipment.
- Developing of methods and materials for radar absorbent coating (paints, aerosols) for walls, ceilings, computers and special screens for information defending from bugging in rooms and for electromagnetic radiation absorbing in the comb mobile frequencies range.

Another area of research is influencing of radiation on biological objects in medicine, for example, malignant tumors non-invasive treatment methods development:

- an electromagnetic radiation focusing on the location of the tumor in the human body and influencing it by the microwave radiation with a definite frequency and power results in the thermal heating of water in the cells of the malignant tumor to the temperature higher than 42 °C, and dying of the affected cells.
- in plasma photo dermal therapy the malignant tumor with accumulated nanoparticles of gold in it is exposed to the laser infrared radiation that results in the laser light energy transforming into heat, heating of the cancerous cells to the temperature higher than 42 °C and their death.

Besides purely practical purposes like heating of fluid in the microwave oven, the research is of great importance for the human safety evaluation in case of electromagnetic radiation. Some of the sources of this problem are highlighted below.

1. Man is approximately 60 % made of water. Wikipedia says that a newborn human is made of 60 % of fluid. At the age of 5–7 years old this figure reduces to 0 %. A healthy male at 40 has 62–70 % of water, an elderly person – 50 %. Besides, man synthesizes in its body primary “juvenile” water that is received after food and tissue combustion.

2. Man lives in electromagnetic fields of natural and technological (man-made) radiation sources. Natural radiation sources are presented mainly by the irradiance of the Sun and electric charges radiation. For example, in 11 years Sun rhythm the intensity of electromagnetic radiation in the radio and microwave frequency range changes from maximum 10^{-17} to minimum $\sim 10^{-24}$ Bт/м². Гц of the Sun activity [30]. Cosmic radiation of radio galaxies, quasars and pulsars do not exceed 10^{-26} Bт/м² Гц. Man has lived on Earth before now mainly in the rhythm of the Sun electromagnetic radiation and felt thunderstorm electromagnetic radiation. At present these natural factors are intensified by powerful technological radiation made by man.

3. Due to industrial society development, electricity, the radio, cable, telephone are invented the work of which is connected with electromagnetic waves radiation. Today cybernetics, electric computing machines technologies, atomic and nuclear energy are intensively developed. New digital communication and cosmic connection systems are devised today. The Internet has firmly come to our life and joined all the countries and people by accessible computer information.

4. We see a qualitative transition of the human activity from industrial society to information society of personal computers, tablets, smartphones and microwave radiation. An exceeding quantity of information, electric computing machines, comb phones, information reception and sending improving by means of electromagnetic radiation is ahead of man physiological development and his adaptation to the new challenges of modern technique and technology.

5. Due to his activity on planet Earth, Man widens the man-made ocean of electromagnetic radiation that becomes deeper every day and the radiation power stronger over the entire frequency range. For example, today the level of electromagnetic radiation on Earth 1000 times

exceeds the Sun radiation, although Earth size is vice versa 1000 times less than the size of the Sun. Practically Man lives in the ocean of electromagnetic radiation the electromagnetic waves of which influence him every moment with different frequency and intensity. The power of electromagnetic radiation is growing, no matter if it is necessary for human survival or unnecessary harmful one. According to the published data, for the recent decades the total capacity of electromagnetic fields has hundreds and thousands times increased in different areas of Earth in comparison with the natural phone.

6. From the calculations of the interaction of water with electromagnetic radiation can be assumed that part of radiation goes through the human, another – reflects from his surface or internal human organs, and the third – is absorbed in tissues and heats the cells, blood, brain and other human organs. Then a lot of questions arise:

- *Is radiation dangerous for health?*
- *What maximal values of electromagnetic power and frequency are safe for the human?*
- *Will radiation influence result in genetic changes of the human DNA structure?*

If appropriate measures are not taken, it is quite possible that with time lasting influence of radiation on human organism will lead to irreversible genetic mutation and even extinction of man as a species. For example, one of the most ancient species of insects a cockroach leaves houses and towns where electromagnetic (microwave) radiation is high. Thus, detailed research of influencing radiation on biological objects human in particular is necessary today, as well as defining maximum admissible values of electromagnetic radiation power and frequency.

7. For Humanity evolution developing of new progressive technologies connected with different sources of radiation is necessary. But to preserve biological life on Earth, Man in particular, it is necessary to develop and make devices with safe technologies of electromagnetic radiation usage, especially on the reception and transmission of information.

Further development of theoretical research is necessary for learning water heating by electromagnetic radiation with due regard to its transition into another aggregate state, appearing, growing and emitting of the water gas bubbles and forming of two-phase medium (water – gas). At present new mechanisms of the interaction of electromagnetic radiation with the two-phase medium appear as well as of the heat change, hydrodynamics of the flow, forming, moving and transition of the mass by the water gas bubbles. The gas composition change over the water surface should be taken into consideration in the system of gas dynamics equations coefficients. On the water surface – two media border (water, water steam + air) – the interaction of thermal, hydrodynamic and gas dynamic flows should be considered. It is in fact a new little-known field of physics of two-phase media microwave heating.

The approach suggested in the monograph needs developing: investigating water heating by electromagnetic radiation beginning from the temperature of 0 °C with regard to its structural soundness, possible presence of ice crystals and clusters as well as presence of impurities, dissolved salts and different types of isotopic composition.

These are difficult tasks requiring the transition to the new level of physical processes modelling. Future theoretical models probably must consider electromagnetic water heating on the nanoscale level with due regard to water structural soundness, as well as isotopic composition, nonlinear and probably quantum effects while forming and interacting of clusters, molecules and water atoms in electromagnetic radiation field.

Высокогорное озеро Сон-Куль, Кыргызстан

LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. *Bykov Yu.V., Semenov V.E.* State of the art of the millimeter wave processing of materials // Proc. 7th Intern. Conf. on Microwave and High Frequency Heating; ed. by D. Sánchez-Hernández et al. (Valencia: Servicio de Publicaciones UPV). 1999. Pp. 459–462.
2. *Bykov Yu., Rybakov K., Semenov V.* High-temperature microwave processing of materials // Journal of Physics D: Applied Physics 2001. Vol. 34. Pp. 55–75.
3. *Paranosenkov V.P., Bykov Yu.V., Kholoptsev V.V.* et al. Microwave sintering of ceramics based on silicon nitride // Refractories and technical ceramics. 1997. No. 1. Pp. 11–13.
4. *Tiegs T.N., Kiggans J.O., Kimrey H.D.* Microwave processing of silicon nitride // Microwave Processing of Materials II; ed. by W.B. Snyder, W.H. Sutton, M.F. Iskander et al. Pittsburgh, PA, 1990. Pp. 267–272 (Materials Research Society / Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 189).
5. *Kiggans J.O., Tiegs T.N.* Characterization of sintered reaction-bonded silicon nitride processed by microwave heating // Microwave Processing of Materials III; ed. by R.L. Beatty, W.H. Sutton, M.F. Iskander. Pittsburgh, PA, 1992. P. 285–289. (Materials Research Society / Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 269).
6. *Chang I.A., Nguyen U.D.* Thermal modeling of lesion growth with radiofrequency ablation devices // Bio Medical Engineering On Line, 2004.
7. *Labonte S., Blais A., Legault S.R.* et al. Monopole antennas for microwave catheter ablation // IEEE Trans. on Microwave theory and techniques. 1996. Vol. 44. No 10. Pp. 1832–1840.
8. *Knyazev V.Yu., Kossyi I.A., Malykh N.I., Yampolsky E.S.* Penetration of microwave radiation into water (“self-clarification” effect) // ZhTP. 2003. T. 73. Iss. 11. Pp. 133–136.

9. *Adamovich A.L., Grinchik N.N., Kundas S.P., Terekhov V.I.* Modeling of non-isothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media under microwave heating // Jour. "Thermophysics and Aeromechanics". 2004. T. 11. No. 2. Pp. 1–18.
10. *Pyushner G.* Heating by energy of ultrahigh frequencies. Moscow: Energy, 1968. 312 p.
11. *Postnikov A.V., Moldosanov K.A.* Phonon-assisted radiofrequency absorption by gold nanoparticles resulting in hyperthermia. In Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics; A. Maffucci; S.A. Maksimenko, eds.; Springer: Dordrecht. The Netherlands, 2016. Pp. 171–201.
12. *Postnikov A.V., Moldosanov K.A., Kairiyev N.J., Lelevkin V.M.* Prospects for Terahertz Imaging the Human Skin Cancer with the Help of Gold-Nanoparticles-Based Terahertz-to-Infrared Converter. Chapter 9 in: Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics II; Maffucci Antonio and Maksimenko Sergey A. The Netherlands, 2019. Springer Publisher. Pp. 151–173.
13. *Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M.* Heating a column of water in a round waveguide // Journ. "Bulletin of KRSU". 2008. Vol. 8. No. 10. Pp. 15–20.
14. *Lelevkin V.M., Kulumbaev E.B., Kozlov P.V., Kayryev N.Zh.* Simulation of microwave heating of water. Bishkek: KRSU. 2009. 161 p.
15. *Lelevkin V.M.* Interaction of microwave radiation with solid and liquid substances // Materials of the international conference "Information technology and mathematical modeling in science, technology and education". Bishkek: Bulletin of KSTU. 2011. No. 24. Pp. 389–393.
16. *Lelevkin V.M.* Microwave heating of a flat layer of water // Bulletin of KNU. 2011. Iss. 1. Pp. 42–48.
17. *Kozlov P.V.* Simulation of microwave heating of a flat layer of water // Jour. "Vestnik KRSU". 2011. T. 11. No. 3. Pp. 37–43.
18. *Lelevkin V.M.* Mathematical modeling of microwave heating of water. LAMBERT Academic Publishing. 2012. 200 p.
19. *Kozlov P.V., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M.* Channel model of ceramic plate heating with help of microwave space. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Moscow: Yanus-K, 2006. Pp. 343–346.
20. *Kozlov P.V., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M.* Stationery thermal conditions the ceramic cylinder in the field of microwave radiation // Strong Microwave in Plasmas. IAP. Nizhny Novgorod, 2006. Vol. 2. Pp. 709–714.
21. *Kozlov P.V., Lelevkin V.M.* Stationary microwave heating of a ceramic plate // High Temperature Thermal Physics. 2007. T. 45. No. 3. Pp. 1–5.
22. *Kozlov P.V., Rafatov I.R., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M.* On modeling of microwave heating of a ceramic material // Journ. of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. Pp. 2927–2935.
23. Modeling and technology of silicon-based ceramics / ed. by V.M. Lelevkin, O.N. Kanygin. Bishkek: Publishing house of KRSU, 2008. 222 p.
24. *Lelevkin V.M., Otorbaev D.K., Schram D.C.* Physics of non-equilibrium plasmas. North-Holland. Amsterdam (the Netherlands), 1992. 412 p.
25. RF-microwave plasmotrons / S.V. Dresvin, A.A. Bobrov, V.M. Lelevkin et al. Novosibirsk: Science. Siberian branch, 1992. 319 p. (Low-temperature plasma. Vol. 6).
26. *Lelevkin V.M., Kulumbaev E.B., Semenov V.F.* Modeling and calculation of electrical discharges. Encyclopedia of Low Temperature Plasma // Thematic. Vol. X1-5 Applied Plasma Chemistry. M.: YANUS-K. 2006. Pp. 437–501.

27. *Masaru Emoto*. Messages of water: Secret codes of ice crystals. Transl. from the English M. LLC Publishing House "Sofia", 2005.
28. *Petryanov I.V.* The most extraordinary substance in the world. M.: Publishing house Pedagogika, 1981. 96 p.
29. *Kireeva T.A.* Lecture notes: Hydrogeochemistry, Moscow State University M.V. Lomonosov, 2016.
30. *Kudryashov Yu.B., Perov Yu.F., Rubin A.B.* Radiation biophysics: radio frequency and microwave electromagnetic radiation. Textbook for universities. M.: FIZMATLIT, 2008. 184 p.
31. *Tesla N.* Investigation of the damped oscillation in discharges // Electr. Eng. 1881. Pp. 13–23.
32. *Hittorf W.* Veber der Electrizzitätsleitung der Gases // Ann. Physics. 1884. No. 1. Pp. 90–38.
33. *Ginzburg V.L.* Propagation of electromagnetic waves in plasma. M.: GIFML, 1960. 552 p.
34. *Babat G.I.* Electrodeless discharges and some related issues // Bulletin of Electroindustry. 1942. No. 3. Pp. 47–51.
35. *Kapitsa P.L.* Free plasma column in a high-frequency field at high pressure // ZhETF. 1969. T. 57. Iss. 6 (12). Pp. 1801–1866.
36. *Batenin V.M., Klimovskiy I.I., Lysov G.V., Troitskiy V.N.* Microwave Plasma Generators: Physics, Technology, Application. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 224 p.
37. *Landau L.D., Lifshits E.M.* Continuous media electrodynamics. M.: Nauka, 1982.
38. *Raizer Yu.P.* Gas discharge physics. Moscow: Nauka, 1987. 592 p.
39. *Zenin S.V.* Study of water structure by proton magnetic resonance // Dokl. RAS. 1993. T. 332. No. 3. Pp. 328–329.
40. *Zenin S.V., Tyaglov B.V.* Hydrophobic model of the structure of associations of water molecules // Fiz's magazine. chemistry. 1994. T. 68. No. 4. Pp. 636–641.
41. *Chizhevsky A.L., Shishina Yu.G.* To the rhythm of the sun. Moscow: Nauka, 1969. 112 p.
42. Physical encyclopedic dictionary. M.: Publishing House "Soviet Encyclopedia", 1960; Encyclopedic Dictionary of Young Chemist / Comp. V.A. Kritzman, V.V. Stanzo. M.: Pedagogy, 1982. 368 p.
43. *Vargaftik N.B.* Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids. Moscow: Nauka, 1972. 720 p.
44. Tables of physical quantities. Directory / ed. by academician I.K. Kikoina. M.: Atomizdat, 1976. 1008 p.
45. *Skanavi G.I.* Physics of dielectrics (Strong field area). M.-L., 1958.
46. *Buchner R., Barthel J., Stauber J.* The dielectric relaxation of water between 0 °C and 35 °C // Chemical Physics Letters. 306. 1999. Pp. 57–63.
47. *Meissner T., Wentz F.J.* The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water From Microwave Satellite Observations // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. Vol. 42. No. 9, September, 2004.
48. *Kalmykov Yu.P., Titov S.V.* On the absorption of millimeter and submillimeter radio waves in water vapor // Optics and Spectroscopy. 1993. Vol. 75. №. 3. Pp. 610–616.
49. *Kalitkin N.N.* Numerical methods. Moscow: Nauka, 1978. 512 p.
50. *Patankar S.* Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
51. *Collacicco G.* Electrical potential of the water surface // Chemica Scripta. 1988. Vol. 28. № 2. Pp. 141–144.

В.М. Лелевкин

МИКРОВОЛНОВОЙ НАГРЕВ ВОДЫ

Редактор *И.С. Волоскова*
Компьютерная верстка *М.Р. Фазлыевой*

Подписано в печать 12.05.2021.
Формат 60×84 $\frac{1}{8}$. Офсетная печать.
Объем 26,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 25.

Издательство КРСУ
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии ИП Мельников К.А.
г. Бишкек, пер. Урючный, 13

**Лелевкин Валерий Михайлович,
профессор, д.ф.-м.н.,
автор 280 публикаций,
12 монографий**