УДК 536.24 : 537.8
DOI 10.58649/1694-9099-2026-3-521-526

Кайрыев Н.Ж., Айтбаева Т.К.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Кайрыев Н.Ж., Айтбаева Т.К.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Kairyev N.Z., Aitbaeva T.K.
KNU Jusup Balasagyn

МИКРОТОЛКУНДУУ КАМЕРАДА СУУНУ ЫСЫТУУ ПРОЦЕССИН МОДЕЛДӨӨ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ВОДЫ В МИКРОВОЛНОВОЙ КАМЕРЕ
SIMULATION OF THE WATER HEATING PROCESS IN A MICROWAVE CAVITY

Кыскача мүнөздөмө: Бул эмгекте 2,45 ГГц жыштыгында иштеген микротолкундуу камерада сууну ысытуу процессин комплекстүү сандык моделдөөнүн жыйынтыктары берилди. Нурлануунун кубаттуулугу, объекттин геометриялык параметрлери жана анын камерадагы жайгашуу абалы боюнча айырмаланган төрт сценарий каралды. Негизги көңүл табигый конвекциянын температуралык талаанын бөлүштүрүлүшүнө тийгизген таасирин талдоого бурулду. Кубаттуулукту жутуу коэффициентинин убакытка жана идиштин геометриялык параметрлерине көз карандылыгы аныкталып, диэлектриктин көлөмү критикалык деңгээлден төмөн болгондо ысытуунун натыйжалуулугу кыйла төмөндөй тургандыгы көрсөтүлдү. Алынган жыйынтыктар өнөр жайдын ар кандай тармактарында микротолкундуу ысытуунун технологиялык процесстерин оптималдаштыруу үчүн колдонулушу мүмкүн.

Аннотация: В данной работе представлены результаты комплексного численного моделирования процесса нагрева воды в микроволновой камере с частотой 2,45 ГГц. Рассмотрены четыре сценария, отличающиеся мощностью излучения, геометрическими параметрами объекта и его положением в камере. Основное внимание уделено анализу влияния естественной конвекции на распределение температурного поля. Получены количественные зависимости коэффициента поглощения мощности от времени и геометрических параметров сосуда, показавшие существенное снижение эффективности при уменьшении объема диэлектрика ниже критического уровня. Результаты могут быть применены для оптимизации технологических процессов микроволнового нагрева в различных отраслях промышленности.

Abstract: This paper presents the results of a comprehensive numerical simulation of the water heating process in a 2.45 GHz microwave chamber. Four scenarios were considered, differing in radiation power, geometric parameters of the object, and its position in the chamber. The main focus is on analyzing the effect of natural convection on the distribution of the temperature field. Quantitative dependencies of the power absorption coefficient on time and geometric parameters of the vessel were obtained, showing a significant decrease in efficiency when the dielectric volume decreases below a critical level. The results can be applied to optimize microwave heating technological processes in various industrial sectors.

Негизги сөздөр: микротолкундуу ысытуу; математикалык моделдөө; COMSOL Multiphysics; табигый конвекция; электромагниттик толкун; Умов–Пойнтинг вектору; жутулуу коэффициенти; жылуулук алмашуу.

Ключевые слова: микроволновый нагрев; математическое моделирование; COMSOL Multiphysics; естественная конвекция; электромагнитная волна; вектор Умова-Пойнтинга; коэффициент поглощения; теплообмен.

Keywords: microwave heating; mathematical modeling; COMSOL Multiphysics; natural convection; electromagnetic wave; Poynting vector; absorption coefficient; heat transfer.

Введение. Микроволновый нагрев диэлектрических сред, в частности воды и водосодержащих продуктов, является одной из динамично развивающихся технологий современной теплофизики и пищевой промышленности. В отличие от традиционных методов теплопередачи — конвекции или теплопроводности от внешнего источника — микроволновый нагрев характеризуется объемным распределением источников энергии, высокой скоростью процесса и малой инерционностью.

Однако одной из ключевых проблем остается неоднородность температурного поля, обусловленная формированием стоячих волн внутри камеры, а также зависимостью диэлектрических свойств среды от температуры. Исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом опирается на фундаментальные положения, изложенные в классических работах А. К. Метэксаса и Р. Дж. Мередита [1]. Авторами были заложены теоретические основы микроволнового нагрева, определившие зависимость эффективности поглощения энергии от комплексной диэлектрической проницаемости среды.

Особое место в изучении нагрева жидкостей занимает вопрос теплопереноса. В работах В. Ханумана и А. Датты [2] было количественно показано, что в жидких средах естественная конвекция является доминирующим механизмом распределения энергии. Их исследования подтвердили, что игнорирование гидродинамических потоков приводит к существенным погрешностям при определении локальных температурных максимумов.

Значительный вклад в развитие методологии численного моделирования сопряженных задач электродинамики и теплофизики внесли В. М. Лелевкин и его ученики [3–5]. В их трудах, опубликованных в 2007–2021 гг., подробно рассмотрены математические модели нагрева воды в различных геометрических конфигурациях, а также обоснована необходимость учета нелинейной зависимости теплофизических параметров от температуры.

В последние годы фокус исследований сместился в сторону многофизического анализа с применением высокопроизводительных вычислительных комплексов. Так, в работах Santos и др. [6] и Domínguez-Tortola и др. [7] рассматриваются вопросы оптимизации операционных переменных при микроволновой обработке воды. Современные публикации 2025–2026 гг., например [8], подчеркивают важность точного позиционирования объекта в камере и выбора радиуса сосуда, поскольку данные факторы определяют структуру стоячих волн и, как следствие, общий коэффициент поглощения мощности.

Несмотря на наличие глубоких теоретических разработок, вопрос влияния критического уменьшения объема диэлектрика на эффективность поглощения энергии при наличии интенсивной конвекции остается актуальным и требует дальнейшего уточнения. Именно это обстоятельство определило направление настоящего исследования.

Постановка задачи. Пусть в центре микроволновой камеры, имеющей форму параллелепипеда размером 330 × 309 × 211 мм, размещен цилиндрический стеклянный сосуд с водой. Электромагнитная волна микроволнового диапазона подводится к камере по прямоугольному волноводу сечением 80 × 50 мм в основной моде TE_{10} (рис. 1).

Часть мощности подводимой волны поглощается водой, что приводит к ее нагреву. При этом учитывается кондуктивный отвод тепла от воды к стенкам стеклянного сосуда, а также через воздушную среду — к стенкам микроволновой камеры. В воде дополнительно учитывается естественная конвекция.

В работе рассматриваются четыре расчетных варианта, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные варианты численного моделирования

№ варианта	Мощность (P_{in}), Вт	Радиус сосуда (R), мм	Расположение
1	300	30	центральное
2	600	30	центральное

3	300	30	нижнее
4	300	15	центральное

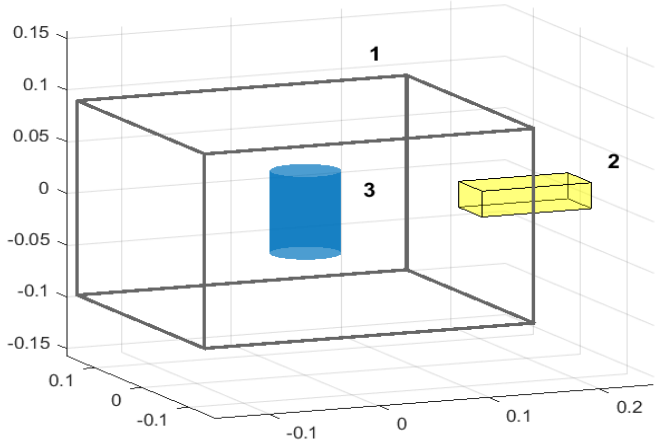


Рисунок 1. Геометрическая модель микроволновой системы: 1 – рабочая камера; 2 – волновод; 3 – сосуд с водой

Математическая модель. Математическое описание строится на сопряжении трех физических интерфейсов. Электродинамическая часть описывается волновым уравнением Гельмгольца:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2(\tau_r - j\sigma / \omega\tau_0)\mathbf{E} = 0 .$$

Движение жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса в приближении Буссинеска для учета плавучести:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \rho\mathbf{g}\beta(T - T_0) .$$

Распределение температуры определяется уравнением энергии:

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla T\right) = \nabla\cdot(k\nabla T) + Q .$$

Здесь T – температура, $\mathbf{E}$ -напряженность электрического поля, $\mathbf{u}$ -скорость, $\tau_r = \mathrm{Re}(\tau_r) - i\cdot\mathrm{Im}(\tau_r)$ - комплексная диэлектрическая проницаемость воды, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, σ - электропроводность, μ - вязкость, k - теплопроводность.

Для корректного решения системы связанных уравнений были сформулированы следующие граничные условия.

Электродинамическая задача. На всех внутренних металлических стенках камеры и волновода задавалось условие идеального электрического проводника. Это условие предполагает полное отражение электромагнитных волн от стенок. На входном сечении волновода задавалась суперпозиция падающей и отраженной электромагнитной волны для основной моды TE_{10} на частоте 2,45 ГГц.

Гидродинамическая задача (уравнение движения). Для описания течения воды использовались следующие условия: на внутренних стенках сосуда — условие прилипания, при котором вектор скорости жидкости на границе равен нулю; на свободной поверхности воды — условие скольжения: нормальная составляющая скорости равна нулю, а касательные напряжения отсутствуют, что позволяет конвективным потокам свободно перемещаться вдоль поверхности раздела фаз.

Тепловая задача (уравнение энергии). На внешних границах стенок микроволновой камеры задавалось граничное условие третьего рода — конвективный теплообмен с окружающей средой: $q = h\cdot(T_{ext} - T)$, где $T_{ext} = 293{,}15\,\text{К}$ — температура внешней среды (комнатная температура); h —

коэффициент теплоотдачи, 10 Вт/(м²·К). А на других границах “стекло–вода”, “стекло–воздух”, “вода-воздух” учитывалось условие непрерывности теплового потока.

Методы решения и численная реализация. Численное решение сопряженной задачи электродинамики, теплопередачи и гидродинамики выполнено методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Данный метод позволяет преобразовать систему дифференциальных уравнений в частных производных в систему алгебраических уравнений путем дискретизации расчетной области [9].

В работе использовался алгоритм двусторонней связи (*bidirectional coupling*). Расчет выполнялся последовательно: на каждом временном шаге интерфейс Electromagnetic Waves, Frequency Domain рассчитывал распределение вектора напряженности электрического поля и источников джоулева тепла. Полученные данные передавались в интерфейсы Heat Transfer in Fluids и Laminar Flow для определения полей температуры и скоростей конвективных потоков [10; 11]. С учетом температурной зависимости диэлектрической проницаемости воды измененные параметры среды возвращались в электродинамический блок для итерационного уточнения расчетных данных.

Для аппроксимации геометрии использовалась нерегулярная, или неструктурированная, тетраэдрическая сетка. Выбор тетраэдрических элементов обусловлен их способностью достаточно точно описывать криволинейные границы цилиндрического сосуда, а также градиенты полей в области волновода.

Особое внимание уделено плотности сетки в области поглощающей среды (воды). Размер элементов выбирался исходя из критерия разрешения длины волны в среде:

$$h_{max} < \frac{\lambda_0}{6\sqrt{|\mathrm{T}_r|}},$$

где λ_0 — длина волны в вакууме.

Результаты и обсуждение. Анализ временных зависимостей основных характеристик процесса позволил выявить ключевые закономерности нагрева воды для четырех рассматриваемых расчетных конфигураций.

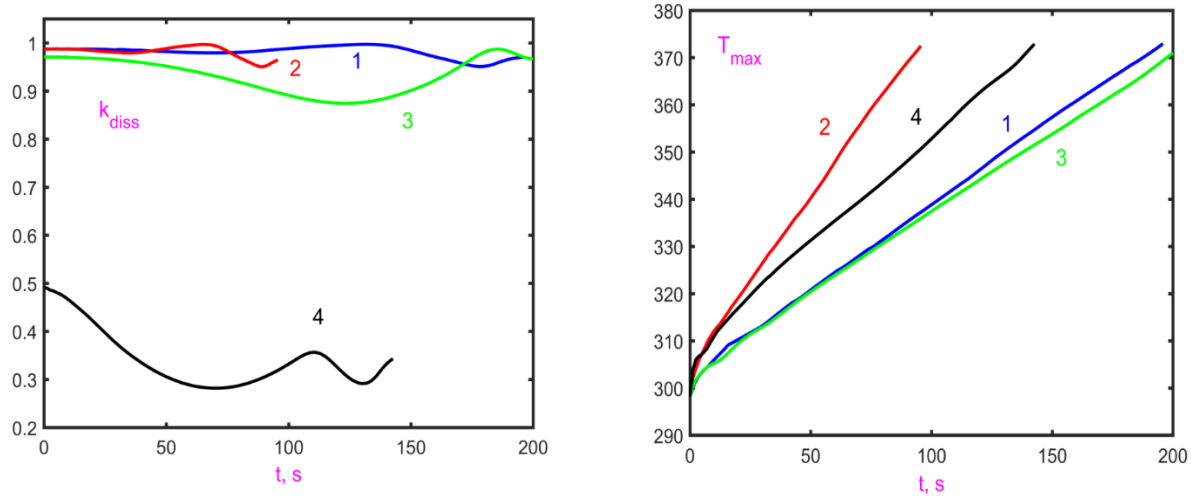


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента поглощения электромагнитной волны в воде (вверху) и её максимальной температуры (внизу) в вариантах 1–4

На рисунке 2 показана динамика изменения коэффициента поглощения мощности (k_{diss}) и максимальной температуры воды. Согласно полученным данным, эффективность поглощения наиболее высока в вариантах с радиусом стакана 30 мм (варианты 1, 2, 3), где k_{diss} колеблется в диапазоне 0,9–1,0. Снижение радиуса до 15 мм (вариант 4) приводит к резкому падению коэффициента

поглощения до 0,3–0,4, что свидетельствует о существенном влиянии геометрических параметров на согласование системы. При этом время нагрева до 100 °C для варианта 2 (600 Вт) составляет около 95 с, в то время как для варианта 1 (300 Вт) оно достигает 196 с. Особый интерес представляет развитие конвективных потоков, определяющих равномерность распределения тепла.

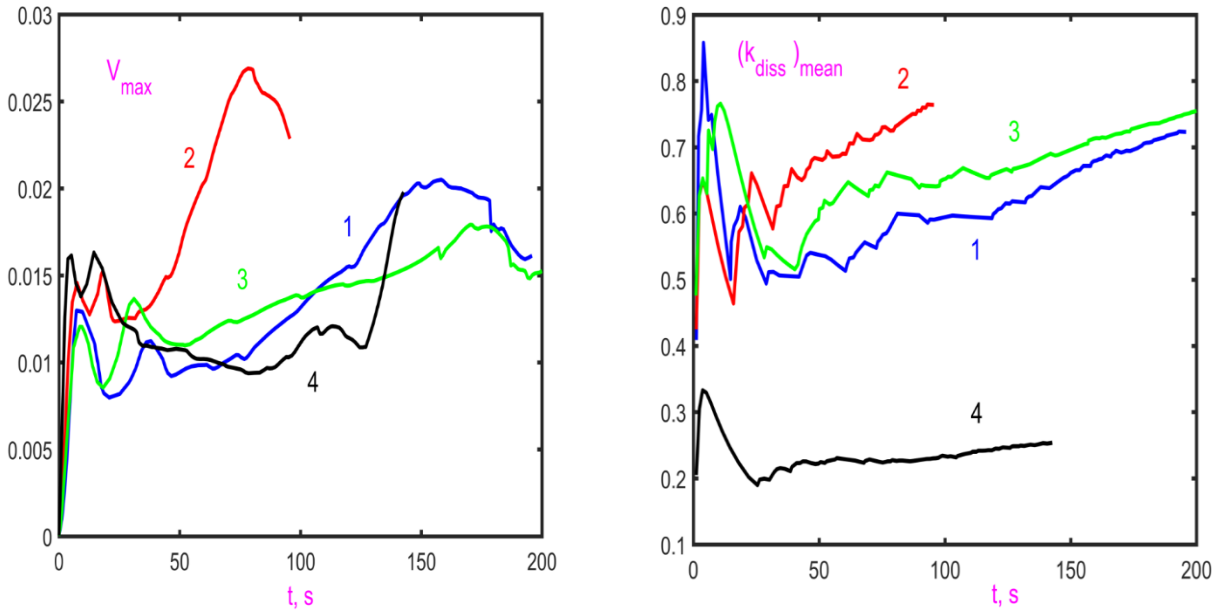


Рис. 3. Эволюции максимальной величины скорости конвективного течения воды (вверху) и усредненного коэффициента поглощения мощности (внизу) в вариантах 1–4.

Максимальная скорость конвекции V_{max} демонстрирует нелинейный рост, достигая пиковых значений 20–27 мм/с для высокомощного режима (вариант 2). Колебания мгновенного значения k_{diss} обусловлены изменением диэлектрической проницаемости воды при росте температуры, что подтверждает необходимость использования сопряженных моделей. Ключевым научным результатом является количественная оценка влияния естественной конвекции на тепловой режим. Сравнительный анализ двух расчетных моделей — с учетом естественной конвекции и без неё — демонстрирует, что пренебрежение движением жидкости приводит к росту температурного градиента до 65 К уже к 75-й секунде процесса. Включение в модель уравнений Навье-Стокса позволяет увидеть реальную картину: интенсивное перемешивание за счет плавучести удерживает градиент температур в пределах 8–10 К на протяжении всего процесса.

Заключение. На основании проведенного мультифизического моделирования процесса нагрева воды в микроволновой камере можно сделать следующие выводы. Установлено, что радиус сосуда с водой оказывает определяющее влияние на поглощательную способность системы. Уменьшение радиуса в два раза приводит к падению коэффициента поглощения более чем в три раза, что снижает общий КПД установки. Доказано, что естественная конвекция является основным механизмом гомогенизации температурного поля в жидких средах при СВЧ-нагреве. Учет движения среды снижает расчетный температурный градиент в 6–7 раз, предотвращая локальные перегревы. Выявлена зависимость эффективности поглощения от температуры, обусловленная изменением диэлектрических свойств воды в процессе нагрева, что требует применения нестационарных адаптивных методов расчета. Результаты подтверждают, что для достижения максимальной скорости нагрева при сохранении равномерности необходимо учитывать не только подводимую мощность, но и пространственное расположение объекта относительно пучностей электрического поля в камере.

Список использованной литературы

1. Метэксас А. К., Мередит Р. Дж. Промышленный микроволновый нагрев / пер. с англ. — Москва: Энергоатомиздат, 1985. — 357 с.
2. Hanumanth V. G., Datta A. K. Analysis of natural convection during microwave heating of liquids // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. — 1996. — Vol. 31, № 4. — P. 228–239.
3. Лелевкин В. М. Микроволновой нагрев воды: монография. — Бишкек: Изд-во КРСУ, 2021. — 211 с.
4. Лелевкин В. М., Кулумбаев Э. Б., Козлов П. В., Кайрыев Н. Ж. Моделирование микроволнового нагрева воды. — Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. — 161 с.
5. Козлов П. В., Лелевкин В. М. Стационарный микроволновой нагрев керамической пластины // Теплофизика высоких температур. — 2007. — Т. 45, № 4. — С. 604–608.
6. Santos H. M. [et al.]. Numerical simulation of heating of water in a microwave oven // Applied Thermal Engineering. — 2010. — Vol. 30, № 16. — P. 2480–2487.
7. Domínguez-Tortola J. [et al.]. CFD Analysis of Microwave-Assisted Water Heating // Digital Science. — 2024. — Vol. 33. — P. 445–452.
8. Wang S. [et al.]. Experimental Design and Numerical Analysis of Volume Internal Heat Generation Source in Fluids Based on Microwave Heating // Energies. — 2025. — Vol. 19, № 2. — Art. 172.
9. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Version 6.2. — Stockholm: COMSOL AB, 2024.
10. RF Module User’s Guide. — Stockholm: COMSOL AB, 2024.
11. Heat Transfer Module User’s Guide. — Stockholm: COMSOL AB, 2024.

Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор Касмамытов Н.К.

УДК 338.48:339.92
DOI 10.58649/1694-9099-2026-3-526-533

Ся Вэньчунь, Сатывалдиева Б.А., Чэнь Юй, Чжан Чжэ
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Ся Вэньчунь, Сатывалдиева Б.А., Чэнь Юй，Чжан Чжэ
КНУ имени Жусупа Баласагына
Xia Wenchun, Satyvaldieva B.A, Chen Yu，Zhe Zhang
KNU Jusup Balasagyn

ИННОВАЦИЯЛЫК КЫРГЫЗСТАН-КЫТАЙ ЧЕК АРАЛЫК БАШКАРУУСУ: САНАРИПТИК СИНЕРГИЯ ЖАНА ПРАКТИКАЛЫК ИННОВАЦИЯЛЫК ЖОЛДОР
ИННОВАЦИОННОЕ КЫРГЫЗСТАНСКО-КИТАЙСКОЕ ТРАНСГРАНИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ: ЦИФРОВАЯ СИНЕРГИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ПУТИ
CHINA-KYRGYZSTAN CROSS-BORDER MANAGEMENT: DIGITAL-DRIVEN SYNERGY AND PRACTICAL INNOVATION PATHS

Кыскача мүнөздөмө: Глобалдык санариптик экономиканын интеграциясы жана «Бир алкак — бир жол» демилгесинин өнүгүшү шартында Кыргызстан менен Кытайдын чек аралык кызматташтыгы салттуу бир багыттуу соода алмашууларынан көп тармактуу биргелешкен өнүгүүгө өттү. Чек аралык башкаруу эки өлкөнүн ресурстарын натыйжалуу бөлүштүрүүнүн жана кызматташтык долбоорлорун туруктуу өнүктүрүүнүн негизги таянычы катары институционалдык шайкешсиздик, маалыматтык асимметрия жана тобокелдиктердин алдын алуу системасынын жеткилең эместиги сыяктуу көйгөйлөргө туш болууда. Бул изилдөөнүн максаты — санариптик технологиялардын негизинде Кыргызстан-Кытай чек аралык башкаруусунун инновациялык биргелешкен жолдорун аныктоо.