

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.365.5

Модернизация и калибровка экспериментальной установки для иммерсионной СВЧ термообработки пищевых изделий

В.В. Комаров

В работе представлены результаты измерений и численного анализа процессов распространения электромагнитных волн в экспериментальной СВЧ-установке комбинированного нагрева пищевых материалов. Рассматриваются основные этапы калибровки и модернизации данной СВЧ-системы.

Введение

Комбинированные методы тепловой обработки диэлектрических материалов широко применяются в современных СВЧ технологиях. Это, в первую очередь, связано с тем, что электромагнитное (ЭМ) поле проникает в объем материала, а другие источники тепла (горячий воздух, инфракрасное (ИК) излучение, пар и др.) обеспечивают поверхностный нагрев. При этом равномерность термообработки достигается оптимальным сочетанием этих методов, например при нагреве пищевых изделий [1,2], керамики [3], кожи [4], древесины [5].

Очень серьезной проблемой СВЧ нагрева различных материалов является возникновение эффекта краевого перегрева образца, вызванного неравномерным распределением ЭМ поля в объеме изделия, особенно вблизи острых ребер и углов [6]. Одна из новых СВЧ технологий, получившая название иммерсионной, позволяет устранить этот эффект посредством погружения, например герметично запакованных пищевых образцов в жидкость (как правило воду). Первые практические результаты внедрения данной технологии для СВЧ стерилизации пищевых материалов были получены в работе [7]. В ходе проведения предварительных исследований различных режимов комбинированной термообработки авторами работы [8], была предложена конструкция камеры лабораторного анализа, показанная на рис. 1. Она состоит из прямоугольного резонатора, возбуждае-

мого двумя симметрично расположенными рупорами и вспомогательных элементов: поворотов, тройника с индуктивными металлическими штырями, направленных ответвителей и отрезков стандартного прямоугольного волновода (ПрВ) с поперечным сечением 248×124 мм, в доминантный диапазон которого попадает частота 915 МГц. Между рупорами и резонатором размещаются специальные диэлектрические окна, выполненные из пластика марки Ultem толщиной 25.4 мм. Габаритные размеры этих окон несколько превышают размеры раскрытов рупоров. Конфигурация и размеры базового элемента камеры приведены на рис. 2. Установка предусматривает также систему подачи в резонатор водопроводной воды, нагреваемой до нужной температуры. В резонаторе поддерживается давление, необходимое для того, чтобы при температуре $T = 121.2$ °С вода могла оставаться в жидком состоянии. Микробиологические исследования показывают [9], что при $T = 80$ °С гибнет основная часть болезнетворных бактерий (пастеризация), но лишь при $T = 121.2$ °С можно говорить о полном их уничтожении (стерилизация). Применение СВЧ энергии в этом случае дает возможность не только интенсифицировать сам процесс термообработки, но и создать такой темп нагрева, при котором обеспечивается гибель всех видов бактерий, умеющих быстро адаптироваться к изменениям температуры.

Образцы пищевых материалов (протеиновые гели, измельченный вареный картофель, другие изделия) в виде брикетов размером $X \times Y \times Z = 140 \times 90 \times 30$ мм в специальной пластиковой упаковке, герметично запакованные по-

В.В. Комаров

г. Саратов, Саратовский государственный технический университет

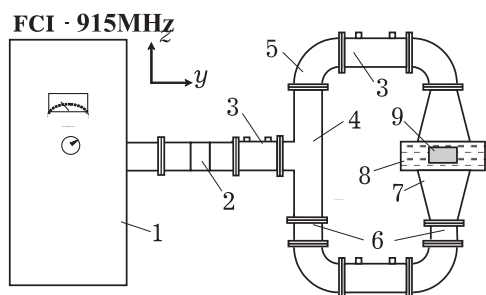


Рис. 1. Экспериментальная установка для иммерсионной СВЧ термообработки пищевых материалов: генератор (1); ферритовый циркулятор (2); направленный ответвитель (3); тройник (4); поворот в Е-плоскости (5); вспомогательный отрезок волновода (6); рупор (7); прямоугольный резонатор (8); образец (9)

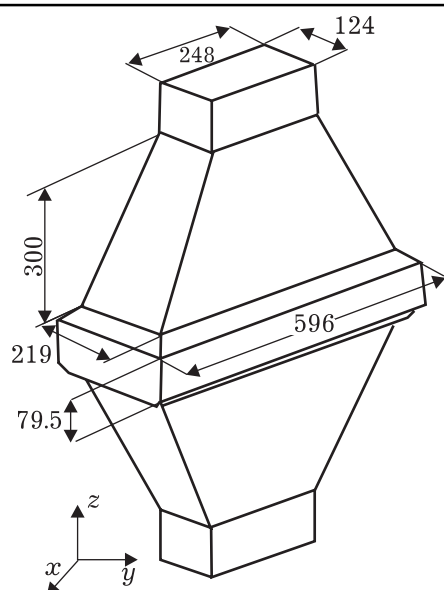


Рис. 2. Базовый элемент СВЧ камеры. Все размеры даны в мм

лиэтиленовой пленкой, размещаются на поддоне, выполненном из того же материала Ultem, что и диэлектрические окна камеры. Причем определяющий размер образца может быть ориентирован как вдоль оси X , так и вдоль оси Y . Измерения полей температур в объеме образца осуществлялись с помощью оптических сенсоров FISO и посредством камеры инфракрасного (ИК) излучения AGEMA470. В обоих случаях производится цифровая обработка сигнала с последующей визуализацией изображения по тепловому излучению или в виде зависимости $T(\tau)$, где τ — время.

Математическое моделирование ЭМ полей в рабочей камере (рис. 2) экспериментальной СВЧ установки, выполненное авторами работы [8] показало, что наилучшая равномерность тепловых источников достигается при нулевом фазовом сдвиге ($\Delta\phi$) ЭМ волн, проникающих в камеру из рупоров. Так как тройниковое соединение, как

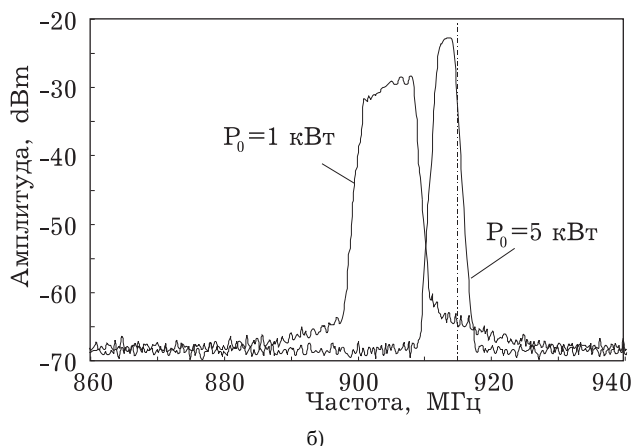
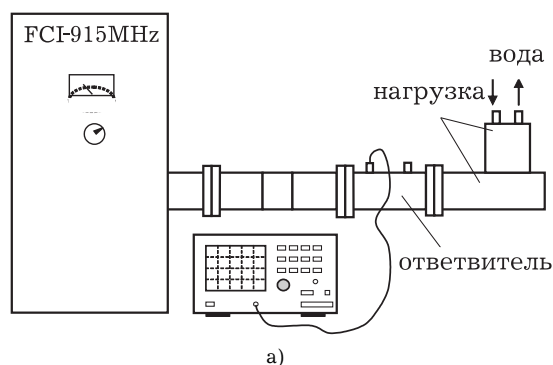


Рис. 3. Измерительная схема для калибровки магнетронного СВЧ генератора FCI-915MHz (а) и его частотный спектр для двух различных значений выходной мощности (б)

известно, обеспечивает $\Delta\phi = 180^\circ$, ими было предложено использовать дополнительные отрезки волноводов, как показано на рис. 1. Однако экспериментальная проверка такой конструкции системы выявила два главных ее недостатка, а именно: неравномерность распределения температуры в образцах и дисбаланс энергетических потоков (СВЧ мощности) внутри камеры. Это объясняется погрешностью численной модели, обусловленной несоответствием математического описания реальным физическим процессам. При создании такой модели авторы [8], во-первых, не учитывали вариации рабочей частоты магнетронного генератора от мощности, во-вторых, использовали диэлектрические свойства воды на частоте 2.45 ГГц для описания сред, взаимодействующих с СВЧ-излучением и, в-третьих, ограничились рассмотрением лишь базового узла (рис. 2) без оценки влияния других элементов системы.

Целью данной работы является модернизация экспериментальной установки, показанной на рис. 1. Для минимизации погрешности исходных данных новой математической модели СВЧ-камеры на методе конечных разностей во временной обла-

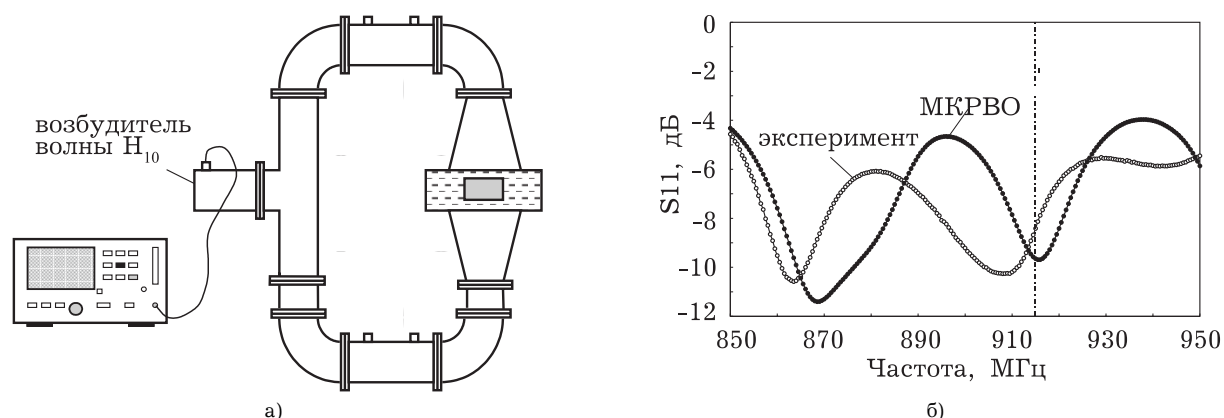


Рис. 4. Измерительная схема для исследования S-параметров (а) и коэффициент отражения в резонаторной СВЧ камере, заполненной водой и двумя образцами протеиновых гелей (б)

сти (МКРВО) была проведена калибровка всей СВЧ-системы. Процедура калибровки заключалась в измерении технических характеристик отдельных узлов, включая СВЧ-генератор, рабочих режимов установки в целом, а также тепловых полей в области взаимодействия.

Численная модель, построенная с помощью программы QuickWave-3D (www.qwed.com.pl) включала не только базовый (рис. 2), но и вспомогательные элементы (ответвители, повороты, тройник) СВЧ камеры для чего потребовалось более 1.5×10^6 ячеек конечно-разностной сетки, плотность которой регулировалась исходя из критерия сходимости Куранта. В частности, в области резонатора максимальный размер ячейки составлял 3 мм, а в остальной части модели — 8 мм. Численный анализ ЭМ полей выполнялся с учетом параметров входного сигнала (частота, амплитуда, фаза) и поляризации падающей волны возбуждающего источника.

Важный момент, который необходимо учитывать при моделировании источника, заключается в том, что в инженерной практике эксплуатации магнетронных СВЧ-генераторов часто возникает ситуация, когда при малых рабочих мощностях P_0 наблюдается снижение рабочей частоты f_0 от заданного значения. В данной работе были проведены экспериментальные измерения зависимости $f_0(P_0)$ промышленного СВЧ-генератора FCI-915MHz с $f_0 = 915$ МГц. Измерения осуществлялись посредством анализатора спектра HP8594E и схемы, представленной на рис. 3,а. Как показали наблюдения, при малых выходных мощностях f_0 оказываются ниже частоты 915 МГц (рис. 3,б) и кривую $f_0(P_0)$ можно аппроксимировать логарифмической функцией:

$$f_0 = 5.44 \ln P_0 + 904.67, R^2 = 0.98, \quad (1)$$

где R — коэффициент корреляции [10], $0.5 \leq P_0 \leq 6$ кВт.

Другой очень важный момент, оказывающий влияние на точность описания процессов распространения ЭМ волн в различных средах, связан с оценкой комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ (где ϵ' — диэлектрическая проницаемость, ϵ'' — коэффициент потерь), которая является функцией температуры ($T^\circ \text{C}$), влагосодержания ($W\%$) и частоты (f). Так как при иммерсионной СВЧ термообработке $W = \text{const}$ (образец герметично запаян полиэтиленом), а $f = f_0$, то наибольший интерес представляет зависимость $\epsilon(T)$. Диэлектрические свойства исследуемых пищевых материалов (протеиновых гелей) на частоте 915 МГц и пластика марки Ultem ($\epsilon' = 3.15, \epsilon'' = 0.0013$) можно найти в работе [11]. Зависимости $\epsilon(T)$ для водопроводной воды (жесткость 116 ~ 268 мг/л, содержание фтора 0.6 ~ 2.6 мг/л, серы ≤ 28 мг/л, натрия 23.4 ~ 48.7 мг/л, железа 0.2 ~ 1 мг/л) были установлены в данной работе с помощью измерительной системы, описанной в [9,11]:

$$\epsilon' = -16.308 \ln(T) + 133.75, R^2 = 0.99, \quad (2)$$

$$\epsilon'' = -5.86 \cdot 10^{-6} T^3 + 1.53 \cdot 10^{-3} T^2 - 0.1312T + 6.415, R^2 = 0.99. \quad (3)$$

Эти соотношения справедливы в интервале $20 \leq T^\circ \text{C} \leq 120$ для $f_0 = 915$ МГц.

Для дальнейших экспериментальных исследований в работе использовалась измерительная схема, показанная на рис. 4а, одним из важнейших элементов которой является возбудитель ЭМ волны H_{10} , представляющий собой короткозамкнутый отрезок ПрВ длиной 306 мм с коаксиальным зондом, для которого была проведена специальная калибровка в трех режимах: бегущей

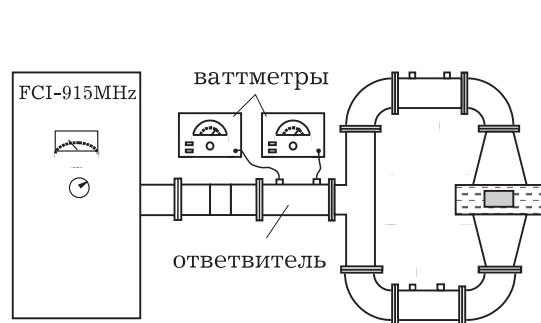


Рис. 5. Измерительная схема для определения уровней отраженной мощности в модернизированной СВЧ камере при различных рабочих температурах

волны с привлечением калориметрической согласованной нагрузки, показанной на рис. 3а; холостого хода и короткого замыкания. В качестве главного измерительного инструмента на данном этапе применялся автоматизированный анализатор СВЧ цепей HP8753C.

Экспериментальные испытания в данном случае проводились с предварительным подогревом воды до $T = 121.2^\circ\text{C}$, поступающей в СВЧ камеру из специального резервуара. Температура воды внутри камеры определялась оптическими датчиками. По прошествии некоторого времени, необходимого для равномерного нагрева образцов горячей водой до $T = 121.2^\circ\text{C}$, выполнялись измерения коэффициента отражения. Одновременно посредством МКРВО осуществлялось численное моделирование системы. На рис. 4б приведен пример кривых $S_{11}(f)$ (где S_{11} — коэффициент отражения), полученных экспериментально и теоретически для случая, когда в СВЧ камере находятся два пищевых образца и горячая вода, являющаяся иммерсионной средой. Как видно из этих данных, вблизи рабочей частоты СВЧ генератора было получено хорошее согласование двух подходов. Аналогичные исследования были проведены для различных режимов работы установки и заполнений резонатора пищевыми образцами. Сравнение результатов моделирования и измерений позволило минимизировать основные погрешности математической модели, связанные с неадекватным описанием реального объекта, неточным представлением исходных данных и особенностями вычислительного процесса. Кроме того, было установлено, что наилучшая стабильность работы анализируемой установки, с точки зрения баланса мощности и равномерности нагрева, достигается при $\Delta\varphi = 180^\circ$. В связи с этим в данной работе был предложен симмет-

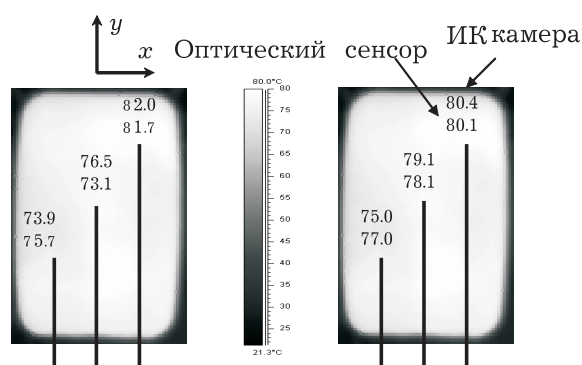


Рис. 6. Тепловые поля в образцах пищевых изделий нагретых до 80°C при $\Delta\varphi = 0^\circ$ (а) и 180° (б)

ричный вариант конструкции СВЧ камеры, как показано на рис. 5.

Далее измерения коэффициента отражения при включенном СВЧ генераторе выполнялись с использованием схемы (рис.5), в которую входят ваттметры Agilent и направленные ответвители MEGA. В таблице представлены значения коэффициента отражения на входе камеры, измеренные с помощью ваттметров и смоделированные МКРВО для различных значений мощности СВЧ генератора в момент времени, когда температура процесса достигнет заданной величины.

Некоторое различие численных и экспериментальных данных объясняется тем, что на данном этапе МКРВО решалась лишь электродинамическая часть задачи без учета тепловых процессов. Однако даже в этом случае для некоторых точек наблюдается хорошее совпадение результатов расчета и измерения.

Наконец с помощью оптических сенсоров и ИК-камеры были установлены тепловые поля в образцах протеиновых гелей, нагретых до $T = 80^\circ\text{C}$ горячей водой и СВЧ-излучением. Три оптических сенсора размещались в центральном слое образца, как показано на рис.6. Применение сенсорных устройств, соединенных с регистрирующей аппаратурой, позволяет измерить зависимость $T(t)$ для таких процессов. Исследования продемонстрировали, что равномерность нагрева пищевых образцов в модернизированной установке существенно улучшается, по сравнению с ситуацией, когда СВЧ камера обеспечивает нулевой фазовый сдвиг.

Таким образом, параллельное использование эмпирического и теоретического методов исследования процессов иммерсионной СВЧ термообработки пищевых изделий дает возможность значительно повысить достоверность численных

данных моделирования и одновременно снизить затраты на проведение экспериментальных измерений за счет применения оптимизированных математических моделей расчета ЭМ полей.

Исследования, посвященные изучению процессов иммерсионной СВЧ термообработки пищевых изделий, проводились автором в рамках совместного проекта с группой радиочастотного и СВЧ нагрева университета штата Вашингтон (США). Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ: проект РНП 2.1.1.8014.

Литература

1. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. — М.: Агропромиздат, 1986. — 351 с.
2. Funebo T., Ohlsson T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom // Journal of Food Engineering. — 1998. — Vol. 38. — № 3. — P. 353-367.
3. Haala J., Wiesbeck W. Modeling microwave and hybrid heating processes including heat radiation effects // IEEE Trans. — 2002. — Vol. MTT-50. — 5. — P. 1346-1354.
4. Monzo-Cabrera J., Catala-Civera J.M., Diaz-Morcillo A. et al. A threestage microwave-assisted drying model based on the dielectric properties of laminar materials: theoretical development and validation // Microwave and Optical Technology Letters. — 2002. — Vol. 32. — № 6. — P. 465-469.
5. Zhao H., Turner I., Torgovnikov G. An experimental and numerical investigation of the microwave heating of wood // Int. J. Microwave Power and Electromagnetic Energy. — 1998. — Vol. 33. — 2. — P. 121-133.
6. Sundberg M. Analysis of industrial microwave ovens. Ph.D Dissertation. Goteborg. Sweden, 1998. — 72 p.
7. Guan D., Gray P., Kang D.H. et al. Microbiological validation of microwave-circulated water combination heating technology by inoculated pack studies // Journal of Food Science. — 2003. — Vol. 68. — P. 1428-1432.
8. Pathak S.K., Lui F., Tang J. Characterization of a single mode applicator // Int. J. Microwave Power and Electromagnetic Energy. — 2003. — Vol. 38. — P. 37-48.
9. Yang X.H., J. Tang J. Advances in bioprocessing engineering. — London: World Scientific. — 2002. — 172 p.
10. Заварыкин В.М., Житомирский В.Г., Лапчик М.П. Численные методы. — М.: Просвещение, 1990. — 176 с.
11. Wang Y., Wig T.D., Tang J., Hallberg L.M. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization // Journal of Food Engineering. — 2003. — Vol. 57. — P. 257-268.

Таблица 1

Заполнение	Вода				Вода и 6 образцов			
	80		121		80		121	
$P_0, \text{кВт}$	$S_{11}^{\text{измер}}$	$S_{11}^{\text{теор}}$	$S_{11}^{\text{измер}}$	$S_{11}^{\text{теор}}$	$S_{11}^{\text{измер}}$	$S_{11}^{\text{теор}}$	$S_{11}^{\text{измер}}$	$S_{11}^{\text{теор}}$
1	0.75	0.86	0.73	0.76	0.67	0.71	0.60	0.62
2	0.80	0.87	0.71	0.78	0.68	0.73	0.56	0.63
3	0.77	0.88	0.68	0.81	0.69	0.73	0.52	0.62
4	0.78	0.88	0.69	0.82	0.69	0.74	0.47	0.54

Modernization and Calibration of Experimental Setup for Immersion Microwave Thermal Processing of Food Samples

V.V. Komarov

Results of measuring and numerical analysis of processes of electromagnetic waves propagation in experimental microwave setup for combined heating of food samples are represented in this work. Main steps of calibration and modernization of this microwave system are considered.



Комаров Вячеслав Вячеславович, 1965 года рождения. В 1989 г. окончил Саратовский политехнический институт, а в 1994 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на физическом факультете Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Доцент (1996) кафедры радиотехники Саратовского государственного технического университета. Автор и соавтор более 60 научных работ. Область научных интересов – вычислительная электродинамика, компьютерное моделирование и проектирование устройств СВЧ-техники, экспертная оценка пакетов прикладных программ численного моделирования электромагнитных полей