

Моделирование электродинамических параметров микроволнового стерилизатора

В.Б. Байбурин¹, В.В. Комаров¹ , В.П. Мещанов²

¹ Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
410054, Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77

² ООО НПП «Ника-СВЧ»
410050, Россия, г. Саратов, Первый Усть-Курдюмский пр-д, 2

Аннотация – Для стерилизации медицинских инструментов анализируется технология их иммерсионной термообработки интенсивным СВЧ-излучением на частоте 2,45 ГГц. Показаны преимущества данной технологии по сравнению с традиционными методами. Построена электродинамическая модель микроволнового стерилизатора хирургических инструментов, учитывающая зависимость комплексной диэлектрической проницаемости иммерсионной среды (воды) от температуры. В качестве его базового элемента был использован прямоугольный резонатор с волноводным элементом возбуждения. С помощью численной модели на методе конечных элементов определены величины отраженной и поглощенной мощности, а также темп нагрева воды в стерилизаторе для рабочей мощности 600 Вт. Анализ тепловых процессов, выполненный по упрощенной методике, показал достаточно высокую эффективность такого устройства, обеспечивающего высокий темп нагрева на заданной частоте.

Ключевые слова – электромагнитное поле; СВЧ-излучение; стерилизация; медицинские инструменты; математическое моделирование.

Введение

Процессы высокотемпературного воздействия энергией электромагнитных (ЭМ) волн на различные объекты лежат в основе не только терапевтических, но и некоторых вспомогательных медицинских технологий. Одним из примеров таких вспомогательных технологий является стерилизация медицинских инструментов, которая чаще всего проводится путем либо их кипячения в воде традиционными методами, либо обработки горячим воздухом или специальными химическими веществами, что бывает не всегда удобно. При этом продолжительность стерилизации инструментов может оказаться значительной: горячим воздухом – до нескольких десятков минут, в автоклаве при давлении 0,8...3,5 Бар – порядка 15 мин. В ряде случаев, когда важнейшим фактором успешного хирургического вмешательства становится время, ускорить процесс стерилизации позволяет использование для этих целей высокоинтенсивного микроволнового излучения.

Для микроволновых технологий подобного типа выделены специальные частоты: 915 МГц, 2,45 ГГц, 5,8 ГГц, 24,125 ГГц, получившие название ISM-частоты (*industrial, scientific, medicine*). Как известно [1], интенсивность СВЧ-нагрева прямо пропорциональна частоте излучения, но с увеличением частоты снижается глубина проникно-

вения ЭМ-поля в диэлектрик с потерями. Чаще всего в системах микроволновой термообработки встречается частота 2,45 ГГц, обеспечивающая необходимый компромисс.

Процессы микроволновой стерилизации медицинских инструментов существенно отличаются от аналогичных процессов тепловой обработки в области пищевых технологий, где нагрев образцов пищевых изделий осуществляется при температуре 121,2°, которая необходима для уничтожения одной из самых опасных бактерий типа *Salmonella* [2].

В данной работе рассматривается технология высокоинтенсивного воздействия ЭМ-излучения с частотой 2,45 ГГц на медицинские инструменты, погруженные в иммерсионную среду, в качестве которой используется обычная водопроводная вода.

1. Постановка задачи

В качестве базовых элементов микроволновых стерилизаторов чаще всего предлагаются [3–5] прямоугольные резонаторные СВЧ-камеры со стоячей волной, возбуждаемые стандартным прямоугольным волноводом WR340 с размерами поперечного сечения $a \times b = x \times y = 86 \times 43$ мм и рабочей частотой 2,45 ГГц. Рассмотрим аналогичную конфигурацию микроволнового стерилизатора,

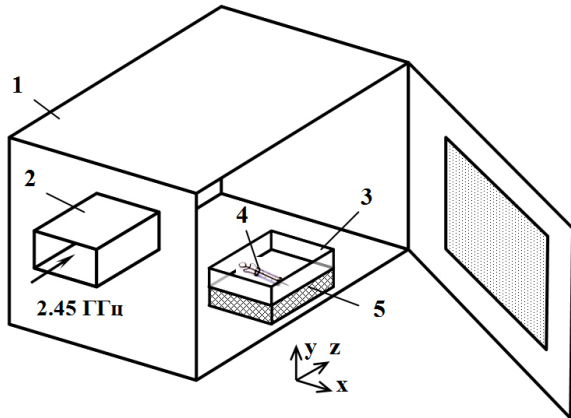


Рис. 1. Модель микроволнового стерилизатора: прямоугольный резонатор (1), волновод (2), контейнер с водой (3), медицинский инструмент (4) и подставка (5)

Fig. 1. Microwave sterilizer model: rectangular resonator (1), waveguide (2), water container (3), medical instrument (4) and stand (5)

внутри которого, как показано на рис. 1, на специальной диэлектрической подставке располагается контейнер с инструментами, заполненный обычной водопроводной водой. Контейнер и поставка выполняются из радиопрозрачного материала, например РТФЕ. Медицинские инструменты представляют собой конфигурационно сложные металлические объекты (рис. 2), количество которых в контейнере может быть произвольным.

Распределение ЭМ-полей в резонаторной камере с объемно-неоднородным диссипативным заполнением в общем виде описывается системой уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma_e \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau} + \vec{J}_{cm}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho + \rho_{cm}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

где \vec{E} и \vec{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; \vec{D} и \vec{B} – векторы электрической и магнитной индукции; σ_e – электропроводность среды; \vec{J}_{cm} – плотность стороннего тока; ρ – удельная плотность заряда; ρ_{cm} – удельная плотность стороннего заряда. Все параметры, входящие в уравнения (1)–(4), в общем виде являются функцией координат и времени: $\vec{E}(\vec{r}, \tau)$, $\vec{H}(\vec{r}, \tau)$, $\vec{D}(\vec{r}, \tau)$, $\vec{B}(\vec{r}, \tau)$, $\vec{J}_{cm}(\vec{r}, \tau)$, $\rho(\vec{r}, \tau)$, $\rho_{cm}(\vec{r}, \tau)$. Здесь \vec{r} – радиус-вектор точки трехмерного пространства; τ – время.

Свойства воды как диссипативной среды по отношению к ЭМ-полю определяются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ (здесь ϵ' – диэлектрическая прони-



Рис. 2. Хирургические инструменты
 Fig. 2. Surgical instruments

цаемость, ϵ'' – коэффициент диэлектрических потерь) и комплексной магнитной проницаемостью $\hat{\mu} = \mu' - j\mu''$ (μ' – магнитная проницаемость, μ'' – коэффициент магнитных потерь), а также электропроводностью.

Принимая во внимание тот факт, что магнитные свойства воды ($\mu' = 1$, $\mu'' = 0$) не оказывают влияния на процессы рассеяния и поглощения ЭМ-волн внутри резонатора, а КДП воды на фиксированной частоте зависит только от температуры (T), перепишем уравнения Максвелла с использованием метода комплексных амплитуд [6]:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \hat{\epsilon}(T) \epsilon_0 \dot{E} + \dot{J}_{cm}, \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \dot{E} = -j\omega \mu_0 \dot{H}, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \epsilon_0 \hat{\epsilon}'(T) \dot{E} = \dot{\rho}_{cm}, \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \dot{H} = 0, \quad (8)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Г/м, \dot{E} и \dot{H} – комплексные амплитуды электрического и магнитного полей в заданной точке пространства: $E(\tau) = \operatorname{Re}(\dot{E}e^{j\omega\tau})$; $H(\tau) = \operatorname{Re}(\dot{H}e^{j\omega\tau})$.

На частоте 2,45 ГГц диэлектрические свойства воды являются функцией температуры, и в интервале $0 \leq T \text{ } ^\circ\text{C} \leq 100$ их можно оценить с помощью соотношений, полученных в [7]:

$$\epsilon'(T) = -4,6 \cdot 10^{-6} T^3 + \quad (9)$$

$$+ 0,00131T^2 - 0,414T + 88,15,$$

$$\epsilon''(T) = -5 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0103T^2 - \quad (10)$$

$$- 0,8064T + 26,675.$$

Используя подход, описанный в [8; 9], преобразуем уравнения (5)–(8) в уравнение Гельмгольца для термодинамических сред:

$$\nabla^2 \dot{E} + k_0^2 \hat{\epsilon}(T) \dot{E} + \operatorname{grad} \left[\frac{\dot{E}}{\hat{\epsilon}(T)}, \operatorname{grad} \epsilon'(T) \right] = \quad (11)$$

$$= j\omega \mu_0 \dot{J}_{cm} - \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \operatorname{grad} \left(\frac{\operatorname{div} \dot{J}_{cm}}{\epsilon'(T)} \right),$$

где $k_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0$ – волновое число свободного пространства.

В случае $\dot{J}_{cm} = 0$ уравнение (11) преобразуется в хорошо известное из литературы [10] однородное уравнение Гельмгольца для сред, свойства которых зависят от T °С:

$$\nabla^2 \dot{E} + k_0^2 \dot{\varepsilon}(T) \dot{E} + \text{grad} \left[\frac{\dot{E}}{\dot{\varepsilon}(T)}, \text{grad} \varepsilon'(T) \right] = 0 \quad (12)$$

Решения этого уравнения должны удовлетворять граничным условиям на металлических стенках:

$$\dot{E}_t = 0, \quad \partial \dot{E}_n / \partial n = 0, \quad (13)$$

где \dot{E}_n и \dot{E}_t – нормальная и тангенциальная компоненты напряженности электрического поля, а и на границе раздела сред при неоднородном заполнении СВЧ-камеры должно выполняться условие

$$\dot{E}_t^i = \dot{E}_t^{i+1}, \quad (14)$$

где i – номер среды заполнения.

На входе стерилизатора должен быть задан источник ЭМ-поля в виде

$$\dot{E}^{(1)} = M_{11} \exp(j\beta_{11}z) + S_{11} M_{11} \exp(-j\beta_{11}z), \quad (15)$$

где M_{11} – собственные функции ЭМ-волны, распространяющейся в ПрВ; S_{11} – коэффициент отражения; β_{11} – фазовая постоянная ЭМ-волны на входе камеры. Для основной волны H_{10} ПрВ:

$$M_{11} = \dot{E}_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right), \quad (16)$$

где a – размер широкой стенки входного волновода, \dot{E}_0 – максимальное значение амплитуды поля в поперечном сечении волновода.

2. Анализ тепловых процессов

Общепринятый подход к анализу процессов взаимодействия ЭМ-волн с диссипативными средами связан с решением так называемой связанной краевой задачи электродинамики и тепло-массопереноса для термодинамических сред, алгоритм которого хорошо известен [11]. В случае СВЧ-термообработки жидких сред формулировка такой задачи включает в себя уже не уравнение теплопроводности, а уравнение энергии и уравнения гидродинамики, учитывающие потоки жидкой среды внутри нагреваемого объема под действием тепловых источников [9].

Важнейшим параметром, оказывающим влияние на формирование теплового поля в области взаимодействия ЭМ-поля с жидкими средами, оказывается кинематическая вязкость (ν_t), входящая в дифференциальные уравнения гидродинамики, которая связана с динамической вязкостью (μ_t) как [12]:

$$\mu_t(T) = \nu_t(T) \rho_t(T), \quad (17)$$

где ρ_t – плотность вещества.

Анализ вариаций этого параметра для воды [12]: $0,282 \cdot 10^{-3} \leq \mu_t$, $\text{Па} \cdot \text{с} \leq 1,52 \cdot 10^{-3}$ – в интервале температур $0 \leq T$ °С ≤ 100 показывает, что высокие скорости гидродинамических потоков внутри жидкости приводят к практически мгновенному выравниванию температуры по всему объему. То есть в случае интенсивного воздействия СВЧ-излучения на воду можно пренебречь градиентами температур в области взаимодействия. Это, в свою очередь, позволяет ограничиться рассмотрением только электродинамической части связанной задачи, осуществляя оценку тепловых процессов в зоне нагрева по упрощенной методике [13], согласно которой темп нагрева

$$T(\tau) = \frac{q_v(T)}{C_t(T) \rho_t(T)} \tau + T_0, \quad (18)$$

$$q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon''(T) \dot{E}^2, \quad (19)$$

где C_t – теплоемкость воды, q_v – плотность тепловых источников, T_0 – начальная температура.

При этом для расчета q_v можно использовать методы теории диссипативных СВЧ-многополюсников:

$$q_v = \frac{P_n}{V}, \quad (20)$$

$$P_n = \left(1 - S_{11}^2\right) P_0, \quad (21)$$

где P_n – поглощенная СВЧ-мощность, P_0 – входная (рабочая) мощность, V – объем нагреваемой жидкости, S_{11} – коэффициент отражения.

Плотность воды при ее нагреве от 20 °С до 100 °С лежит в пределах: $958,4 \leq \rho_t$, $\text{кг}/\text{м}^3 \leq 998,2$, а теплоемкость – $4,18 \leq C_t$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \leq 4,22$ [12], поэтому в первом приближении мы можем использовать их усредненные значения: $\rho_t = 978,3$ $\text{кг}/\text{м}^3$ и $C_t = 4,2$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

3. Численное моделирование

Для численной реализации электродинамической модели микроволнового стерилизатора в данной работе были использованы метод конечных элементов (МКЭ) и пакет программ на его основе COMSOL V.5.2.

Геометрическая модель стерилизатора включает в себя прямоугольный резонатор размером $x \times y \times z = 30 \times 19 \times 30$ см с элементом возбуждения в виде волновода WR340, расположенным в центре боковой стенки резонатора, как показано на рис. 1. В центре резонатора на высоте 25 мм от нижней стенки на специальной подставке из PTFE разме-

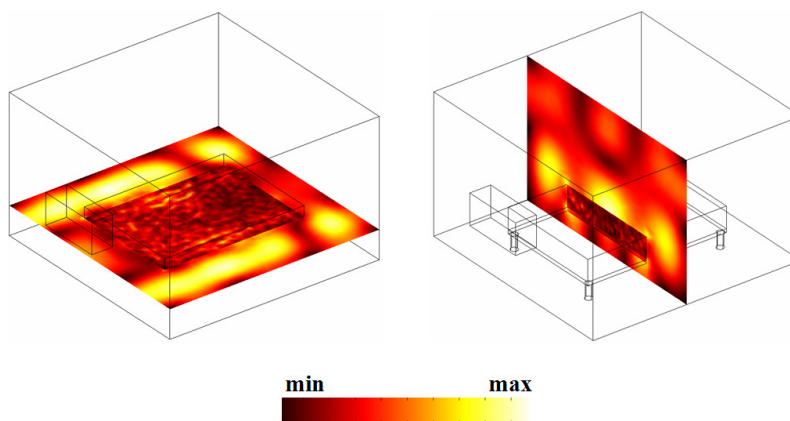


Рис. 3. Распределение электрического поля в вертикальной плоскости симметрии yz стерилизатора на частоте 2,45 ГГц
 Fig. 3. Distribution of the electric field in the vertical plane of symmetry yz of the sterilizer at a frequency of 2,45 GHz

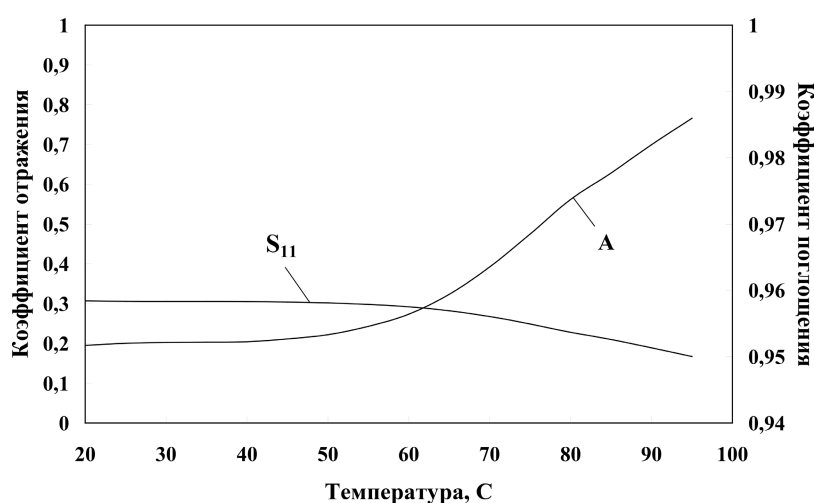


Рис. 4. Электродинамические характеристики стерилизатора
 Fig. 4. Electrodynamic characteristics of the sterilizer

щается кювета с водой размером $x \times y \times z = 150 \times 30 \times 200$ мм, нагрев которой осуществляется СВЧ-излучением с частотой 2,45 ГГц мощностью 600 Вт. Влияние толщины стенок кювета не учитывалось, чтобы снизить вычислительные затраты [14].

Сеточная 3D-модель всей электродинамической системы включала в себя более $4 \cdot 10^4$ тетраэдрических векторных элементов Уитни первого порядка. Плотность сетки в зоне взаимодействия задавалась выше, чем в остальных областях резонатора. На входе волновода задавались условия распространения волны H_{10} ПрВ и основные параметры СВЧ-сигнала.

Численная полноволновая модель была дополнена функциональными зависимостями (9) и (10) для термодинамической среды, и были найдены распределения ЭМ-поля в объеме стерилизатора. На рис. 3 показана структура электрического поля в резонаторе на рабочей частоте стерилизатора для температуры иммерсионной среды 95 °С. Да-

лее были установлены значения коэффициента отражения и коэффициента поглощения (A), причем

$$A = \sqrt{1 - S_{11}^2}. \quad (22)$$

Температурные зависимости этих двух параметров на частоте 2,45 ГГц приведены на рис. 4. Из этих данных видно, что с ростом T °С отраженная мощность плавно снижается почти в два раза, а поглощаемая мощность минимальная величина которой составляет $P_n = 543$ Вт при комнатной температуре 20 °С, плавно возрастает примерно в 1,06 раза и достигает величины 578 Вт. Интересно отметить, что этот эффект наблюдается, несмотря на уменьшение параметра $\epsilon''(T)$.

Расчет темпа нагрева по упрощенной методике с учетом вариаций диэлектрических свойств воды от температуры показал квазилинейную зависимость $T(\tau)$. При этом рабочая температура 100 °С достигается менее чем за 9 минут.

Заключение

Таким образом, с помощью электродинамической модели (12)–(16) и методики приближенной оценки тепловых процессов в области взаимодействия были установлены эксплуатационные характеристики микроволнового стерилизатора медицинских инструментов с рабочей частотой 2,45 ГГц. Конечно-элементное моделирование стерилизатора на базе прямоугольного резонатора с волноводным элементом возбуждения и объемно-неоднородным диссипативным заполнением показало приемлемый уровень согласования источника с нагрузкой на уровне $S_{11} < 0,31$, то есть менее 10 % отраженной мощности. Кроме того, было найдено, что при объеме кюветы с водой $V = 900 \text{ см}^3$, которая используется в качестве иммерсионной среды для нагрева инструментов, темп нагрева составляет примерно 10 °С в минуту

при входной мощности 600 Вт, что позволяет нагреть воду до 100 °С менее чем за 9 мин. Здесь необходимо отметить, что при заполнении кюветы медицинскими инструментами объем иммерсионной среды уменьшается и в реальных условиях будет достигнут более высокий темп нагрева. Для интенсификации таких процессов и повышения эффективности микроволновой стерилизации в качестве иммерсионной среды могут быть использованы солевые растворы различной концентрации. Однако при этом возможно увеличение такого параметра, как вязкость, и для оценки тепловых процессов в области взаимодействия необходимо решать более сложную связанную краевую задачу [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00357).

Список литературы

1. Metaxas A.C., Meredith R.J. *Industrial Microwave Heating*. London: Peter Peregrinus, 1983. 356 p.
2. Decareau R.V. *Microwaves in the Food Processing Industry*. New York: Academic Press, 1985. 236 p.
3. Patent 5858303 US. Method and system for simultaneous microwave sterilization of multiple medical instruments / Schiffmann R.F., Held J.S.; priority 12.01.1999. 23 p.
4. Патент на полезную модель 2004136734/22 (45271). Устройство сверхбыстрой стерилизации медицинских инструментов / Байбурин В.Б., Тертышник В.В., Шуб Г.М., Волков Ю.П., Капрелов Р.И.; приоритет от 14.12.2004. 5 с.
5. Патент на полезную модель 2013122446/15 (136718). Устройство для стерилизации медицинских инструментов / Байбурин В.Б., Тертышник В.В.; приоритет от 15.05.2013. 3 с.
6. Баскаков С.И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Либроком, 2012. 416 с.
7. Ratanadecho P., Aoki K., Akahori M. The characteristics of microwave melting of frozen packed beds using a rectangular waveguide // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002. Vol. 50, no. 6. P. 1495–1502. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.1006410>
8. Гагарина Л.Г., Холод И.С., Бондаренко С.М. Модель процесса управления микроволновым нагревом // *Известия вузов. Электроника*. 2003. № 5. С. 94–95.
9. Комаров В.В. Исследование процессов СВЧ-нагрева диссипативных сред с учетом конвективного теплообмена: теория и эксперимент // *Прикладная физика*. 2006. № 4. С. 34–40.
10. Analysis of microwave heating of materials with temperature-dependent properties / K.G. Ayappa [et al.] // *AIChE Journal*. 1991. Vol. 37, no. 3. P. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690370302>
11. Захаров В.В., Тригорный С.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств // *Вопросы электротехнологии*. 2020. № 3. С. 5–12.
12. *Теплотехника* / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2002. 671 с.
13. Комаров В.В. Погрешность линеаризации решения совместной краевой задачи электродинамики и теплопроводности для некоторых диссипативных диэлектриков // *Радиотехника*. 2006. № 12. С. 78–82.
14. Комаров В.В. Снижение вычислительных затрат компьютерного моделирования устройств микроволновой обработки материалов // *Научно-технические технологии*. 2008. № 8. С. 45–49.

References

1. Metaxas A.C., Meredith R.J. *Industrial Microwave Heating*. London: Peter Peregrinus, 1983, 356 p.
2. Decareau R.V. *Microwaves in the Food Processing Industry*. New York: Academic Press, 1985, 236 p.
3. U.S. Patent 5858303 US. Method and system for simultaneous microwave sterilization of multiple medical instruments. Schiffmann R.F., Held J.S.; priority 12.01.1999, 23 p.
4. Utility model patent 2004136734/22 (45271). Device for ultrafast sterilization of medical instruments. Bayburin V.B., Tertyshnik V.V., Shub G.M., Volkov Yu.P., Kaprelov R.I.; priority from 14.12.2004, 5 p. (In Russ.)

5. Utility model patent 2013122446/15 (136718). Device for sterilization of medical instruments. Bayburin V.B., Tertyshnik V.V.; priority from 15.05.2013, 3 p. (In Russ.)
6. Baskakov S.I. *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow: Librokom, 2012, 416 p. (In Russ.)
7. Ratanadecho P., Aoki K., Akahori M. The characteristics of microwave melting of frozen packed beds using a rectangular waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 6, pp. 1495–1502. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.1006410>
8. Gagarina L.G., Kholod I.S., Bondarenko S.M. Microwave Control Process Model. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2003, no. 5, pp. 94–95. (In Russ.)
9. Komarov V.V. Investigation of the processes of microwave heating of dissipative media taking into account convective heat transfer: theory and experiment. *Prikladnaya fizika*, 2006, no. 4, pp. 34–40. (In Russ.)
10. Ayappa K.G. et al. Analysis of microwave heating of materials with temperature-dependent properties. *AIChE Journal*, 1991, vol. 37, no. 3, pp. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690370302>
11. Zakharov V.V., Trigorlyy S.V. Mathematical modeling of microwave heat treatment of dielectrics taking into account changes in their physical properties. *Voprosy elektrotehnologii*, 2020, no. 3, pp. 5–12. (In Russ.)
12. *Heat Engineering*. Ed. by V.N. Lukanin. Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 671 p. (In Russ.)
13. Komarov V.V. Linearization error of the solution of the joint boundary value problem of electrodynamics and thermal conductivity for some dissipative dielectrics. *Radiotekhnika*, 2006, no. 12, pp. 78–82. (In Russ.)
14. Komarov V.V. Reducing the computational costs of computer simulation of microwave material processing devices. *Naukoemkie tekhnologii*, 2008, no. 8, pp. 45–49. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 4, pp. 52–58

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.52-58

Received 20 May 2022
Accepted 21 June 2022

Modeling of electrodynamic parameters of microwave sterilizer

Vil B. Bayburin¹, Vyacheslav V. Komarov¹ , Valeriy P. Meschanov²

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politechnicheskaya Street,
Saratov, 410054, Russia

² JSC NPP «Nika-SVCh»
2, First Ust-Kurdyumsky Passage,
Saratov, 410050, Russia

Abstract – For the sterilization of medical instruments, a technology for their immersion heat treatment with intense microwave radiation at the frequency of 2,45 GHz is analyzed. The advantages of this technology in comparison with traditional methods are shown. An electromagnetic model of a microwave sterilizer for surgical tools was built, taking into account the temperature dependence of the complex dielectric permittivity of the immersion medium (water). A rectangular cavity with a waveguide excitation was used as its basic unit. With the help of a numerical model on the finite element method, the values of the reflected and absorbed power, as well as the heating rate of water in the sterilizer for an operating power of 600 W, were determined. The analysis of thermal processes, performed according to a simplified method, showed a rather high efficiency of such device, which provides a high heating rate at a given frequency.

Keywords – electromagnetic field; microwave radiation; sterilization; medical tools; mathematical modeling.

Информация об авторах

Байбурин Вил Бариевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.

Область научных интересов: микроволновая электроника, математическое моделирование процессов в мощных вакуумных СВЧ-приборах, биомедицинская радиоэлектроника, радиофизика.

E-mail: baiburinvb@rambler.ru

Комаров Вячеслав Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникации Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.

Область научных интересов: численные методы моделирования, микроволновая и терагерцевая техника, микроволновая обработка материалов, частотно-селективные структуры.

E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-086X>

Мещанов Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор, директор ООО НПП «Ника-СВЧ», г. Саратов, Россия.
Область научных интересов: синтез пассивных микроволновых устройств, методы оптимизации, измерительные СВЧ-системы.
E-mail: nika373@bk.ru

Information about the Authors

Vil B. Bayburin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Department of Information Security, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

Research interests: microwave electronics, mathematical modeling of processes in high-power vacuum microwave tubes, biomedical radio electronics, radio physics.

E-mail: baiburinvb@rambler.ru

Vyacheslav V. Komarov, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

Research interests: numerical methods of modeling, microwave and terahertz engineering, microwave processing of materials, frequency-selective structures.

E-mail: vyacheslav.komarov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-086X>

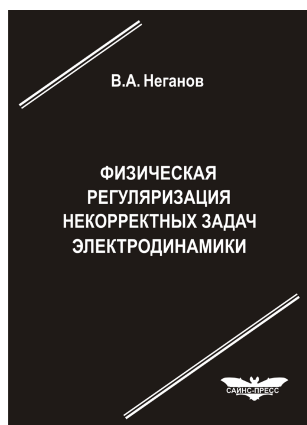
Valeriy P. Meschanov, Doctor of Technical Sciences, professor, director of JSC NPP «Nika-SVCh», Saratov, Russia.

Research interests: synthesis of passive microwave devices, optimization techniques, measuring microwave systems.

E-mail: nika373@bk.ru

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.