

Решение проблемы СВЧ-нагрева композиционных материалов

Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, В.И. Анфиногентов,
Д.А. Веденькин, С.В. Смирнов, С.Р. Ганиева

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

В работе рассматривается задача СВЧ-нагрева полимеров, асфальто-парафиновых отложений при заполнении металлического, короткозамкнутого цилиндра. Решается задача формирования и оптимизации электромагнитных полей. Приводятся результаты моделирования возбуждения цилиндров с использованием минимаксных и интегральных критериев.

Ключевые слова: СВЧ, математическая модель, полимер, асфальт, парафин, смола, диэлектрик, Бессель.

Введение

Многообразие геометрических размеров и форм обрабатываемых диэлектриков, различие их электрофизических параметров затрудняет создание универсальных СВЧ-камер для обработки диэлектриков, систем многоэлементного возбуждения электромагнитного поля с рациональной структурой и параметрами [1].

Процессы нагрева в СВЧ-камерах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и, в отсутствие массопереноса, уравнения теплопроводности [2]. Исследование подобных систем дифференциальных уравнений сопряжено с большими трудностями не только вычислительного, но и принципиального характера [2].

Во многих технологических процессах электромагнитное поле воздействует на диэлектрик, находящийся в металлической оболочке цилиндрической формы [3].

В данной работе исследуются задачи формирования и оптимизации электромагнитных и температурных полей в цилиндрических областях.

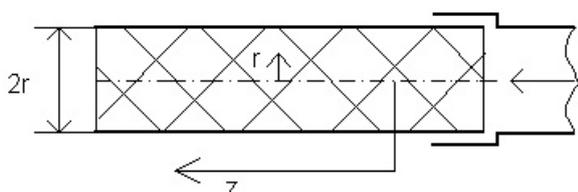


Рис. 1. Электродинамическая модель

1. Формирование и оптимизация электромагнитных полей

Во многих технологических процессах СВЧ-нагрева и плавления диэлектрика требуется обеспечить равномерный нагрев в объеме обрабатываемого материала. Учитывая низкую теплопроводность многих диэлектриков и короткое время обработки, можно считать это требование равносильным требованию создания ЭМП с равномерным распределением модуля напряженности электрического поля.

Приемлемой моделью для анализа может служить представление цилиндрического объема в виде короткозамкнутого круглого волновода с однородным заполнением (рис. 1). Для повышения равномерности распределения ЭМП в заданном объеме может быть использован как выбор типа волны и ее параметров, так и многомодовое возбуждение со специально подобранными составом и амплитудами типов волн.

В любом из вариантов возбуждения параметры, влияющие на процесс формирования ЭМП в заполненной части волновода, выбираются из условия равномерности модуля напряженности электрического поля. В качестве критерия, в зависимости от конкретного типа технологического процесса, могут выбираться как минимаксные

$$\Theta_1 = \min_V |\vec{E}(r, \varphi, z)|^2, \quad (1)$$

$$\Theta_2 = \frac{\min_V |\vec{E}(r, \varphi, z)|^2}{\max_V |\vec{E}(r, \varphi, z)|^2}, \quad (2)$$

так и интегральные критерии

$$\Theta_3 = \int_V \left| \text{const} - |\vec{E}(r, \varphi, z)|^2 \right|^2 dv, \quad (3)$$

где V – объем обрабатываемого материала.

Задача оптимизации возбуждения состоит в определении управляющих параметров $|x\rangle$, при которых обеспечивается максимальное значение критериев Θ_1 и Θ_2 , или минимальное для критерия Θ_3 . Конкретный вид выражения для $|\vec{E}(r, \varphi, z)|^2$ и параметров $|x\rangle$ определяется способом возбуждения. Далее рассматривается ряд вариантов осуществления оптимизации возбуждения.

2. Одномодовое возбуждение

В простейшем случае в рассматриваемом волноводе возбуждается единственный тип волны. Варьируемыми параметрами являются тип волны и частота колебаний. Исходя из требования равномерности распределения $|\vec{E}(r, \varphi, z)|^2$, должны использоваться либо моды с нулевой азимутальной зависимостью – E_{0n}, H_{0n} , либо парные моды, возбуждаемые в пространственной и временной квадратуре, например $H_{11}^{(x)} \pm jH_{11}^{(y)}$. В любом случае при анализе можно ограничиться исследованием двумерных распределений, усредненных по азимутальной координате $|\vec{E}(r, z)|^2$. Наибольший практический интерес

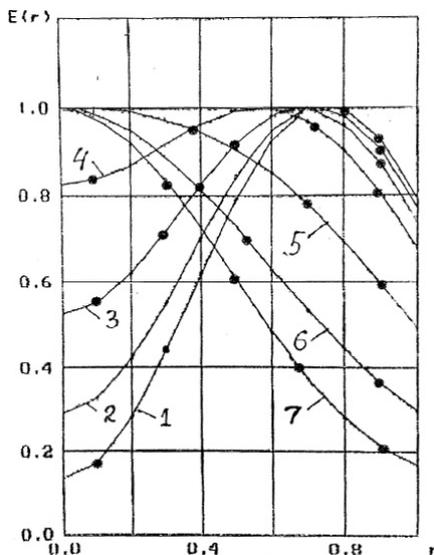


Рис. 2. Зависимости модуля напряженности электрического поля для волны E_{01} от радиуса при разных значениях λ / η_0

представляют моды с наибольшими значениями критической длины волны E_{01} и H_{11} .

Выражение для интенсивности поля можно представить в виде

$$|\vec{E}(r, z)|^2 = \int_0^{2\pi} \left\{ \left| \vec{E}_{mn}^\perp(r, \varphi, z) \right|^2 \times \right. \\ \times \left| \exp(-\gamma_{mn}z) - \exp(-\gamma_{mn}(2L - z)) \right|^2 + \\ \left. + \left| \vec{E}_{mn}^z(r, \varphi, z) \right|^2 \times \right. \\ \left. \times \left| \exp(-\gamma_{mn}z) + \exp(-\gamma_{mn}(2L - z)) \right|^2 \right\} d\varphi, \quad (4)$$

где $\vec{E}_{mn}^\perp(r, \varphi, z)$, $\vec{E}_{mn}^z(r, \varphi, z)$ – поперечные и продольные составляющие напряженности электрического поля волн mn -типа; γ_{mn} – постоянная распространения; L – длина заполненной части волновода.

Для волн электрического и магнитного типа указанные составляющие имеют вид:

для волны \vec{E}_{01} поперечная составляющая –

$$E_r(r, z) = -j \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}} \right)^2} \times \\ \times \left(-J_1(\eta_{01} \frac{r}{\eta_0}) \right) \exp(-jhz), \quad (5)$$

продольная составляющая –

$$E_z(r, z) = J_0(\eta_{01} \frac{r}{\eta_0}) \exp(-jhz), \quad (6)$$

для волны H_{11} поперечные составляющие –

$$E_r(r, z) = j \frac{Z_b}{\mu_{11} r} \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} J_1(\mu_{11} \frac{r}{\eta_0}) \exp(-jhz), \quad (7)$$

$$E_\varphi(r, z) = j Z_b \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} J_1(\mu_{11} \frac{r}{\eta_0}) \exp(-jhz), \quad (8)$$

где $\lambda_{кр} = 2\pi\eta_0 / \eta_{01}$ для волны \vec{E}_{01} и $\lambda_{кр} = 2\pi\eta_0 / \mu_{11}$ для волны H_{11} , а $Z_b = \sqrt{\mu_a / \epsilon_a}$ – волновое сопро-

Таблица 1

λ / η_0	ор.нач.	Θ_3
0,5500000	0,6444284	0,2428160
0,8000000	0,7046255	0,1287258
1,0500000	0,7923860	0,0431070
1,3000000	0,8870471	0,0111597
1,5500000	0,8389985	0,0400984
1,8000000	0,6941408	0,1236596
2,0500000	0,5989680	0,2488346

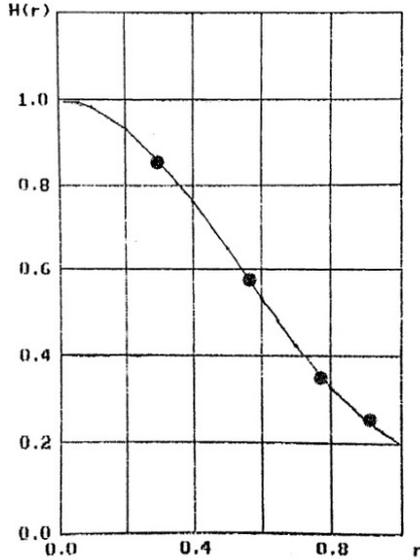


Рис. 3. Зависимости модуля напряженности электрического поля для волны H_{11} от радиуса при разных значениях λ / η_0

тивление; $J_0(\eta_{01} \frac{r}{r_0})$, $J_1(\mu_{11} \frac{r}{r_0})$ — функции Бесселя.

В случае одномодового возбуждения варьируемыми величинами являются отношение λ / η_0 и тип волны. Проведены расчеты модуля напряженности электрического поля для волны E_{01} и для волны H_{11} в сечении волновода $z = 0$ в зависимости от радиуса r ($0 \leq r \leq r_0$) для типичных значений параметров заполнения $\epsilon = 2$, $\text{tg } \delta = 0.05$, при этом варьируемым параметром являлось отношение λ / η_0 .

На рис. 2 приведены зависимости модуля напряженности электрического поля для волны E_{01} от радиуса при разных значениях λ / η_0 , которые приведены в первом столбце таблицы, расположенной справа от рисунка (кривые пронумерованы в порядке возрастания значения λ / η_0).

В табл. 1 приведены значения критерия Θ_3 . Приведенные результаты расчетов показывают, что за счет изменения значения λ / η_0 (что

Таблица 3

λ / η_0	Θ_3 для волны E_{01}	Θ_3 для волны H_{11}	Θ_3 для $E_{01} + H_{11}$
0,55	0,08	0,084	0,074
0,8	0,072	0,088	0,068
1,05	0,063	0,093	0,056
1,3	0,073	0,083	0,06
1,55	0,064	0,074	0,054
1,8	0,048	0,081	0,043
2,05	0,06	0,083	0,057

Таблица 2

λ / η_0	ор.нач.	Θ_3
0,5500000	0,6293924	0,2048126
0,8000000	0,6293924	0,2048126
1,0500000	0,6293924	0,2048126
1,3000000	0,6293924	0,2048126
1,5500000	0,6293924	0,2048126
1,8000000	0,6293924	0,2048126
2,0500000	0,6293924	0,2048126

равносильно изменению частоты возбуждения) можно добиться существенного снижения значения критерия Θ_3 .

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости модуля напряженности электрического поля для волны H_{11} . Проведенные расчеты показывают, что значение модуля напряженности электрического поля для волны H_{11} не зависит от величины отношения λ / η_0 . Значения λ / η_0 и значения критерия Θ_3 приведены в табл. 2

Проведены расчеты модуля напряженности электрического поля для волны E_{01} и для волны H_{11} в зависимости от радиуса r ($0 \leq r \leq r_0$) и z ($0 \leq z \leq L$), при этом варьируемым параметром также являлось отношение λ / η_0 .

В табл. 3 приведены значения критерия Θ_3 для волн E_{01} и H_{11} .

Очевидно, что за счет изменения значения λ / η_0 (что равносильно изменению частоты возбуждения) можно добиться существенного снижения значения критерия Θ_3 во всем объеме обрабатываемого материала. Так, например, для волны E_{01} значение критерия Θ_3 улучшается на 40 %, а для волны H_{11} — на 21 %.

3. Многомодовое возбуждение

В рассматриваемом случае возможно осуществление как когерентного, так и некогерент-

ного типа возбуждения [3]. При когерентном возбуждении

$$|\bar{E}(r, z)|^2 = \left| \sum_m^M \sum_n^N \dot{U}_{mn} \bar{E}_{mn}(r, z) \right|^2, \quad (9)$$

где \dot{U}_{mn} – амплитуда падающей волны mn -типа; $\bar{E}_{mn}(r, z)$ – распределение поля указанной моды.

Реализация когерентного возбуждения заключается в одновременном возбуждении требуемых мод с амплитудами U_m генератором фиксированной частоты при помощи некоторого устройства возбуждения. Поскольку в общем случае при возбуждении волны некоторого типа происходит возбуждение волн ряда других типов, то при оптимизации следует учитывать взаимную зависимость амплитуд \dot{U}_{mn} :

$$|\dot{U}_{mn}\rangle = [B]|U_0\rangle, \quad (10)$$

где $|U_0\rangle$ – вектор значений параметров возбудителя; $[B]$ – прямоугольная матрица, зависящая от структуры возбудителя, электрических размеров волновода и частоты.

При некогерентном возбуждении:

$$|\bar{E}(r, z)|^2 = \sum_m^M \sum_n^N |\dot{U}_{mn}|^2 |\bar{E}_{mn}(r, z)|^2, \quad (11)$$

Осуществить некогерентное возбуждение можно различными путями. Во-первых, возможно последовательное во времени возбуждение волн различных типов, во-вторых – возбуждение одного или различных типов волн с различными частотами.

Достоинством когерентного возбуждения является то, что оно несколько проще в реализации, недостаток – принципиально худшие показатели равномерности распределения поля в осевом направлении. В любом из случаев использование многомодового возбуждения позволяет улучшить показатели равномерности по сравнению с одномодовым возбуждением.

В качестве иллюстрации приведем пример, показывающий возможность улучшения показателя равномерности при некогерентном возбуждении волны E_{01} и волны H_{11} , в котором варьируемым параметром также являлось отношение λ / r_0 . В табл. 3 приведены значения критерия Θ_3 при некогерентном возбуждении волны E_{01} и волны H_{11} . Как показывают расчеты, значение критерия Θ_3 уменьшается по сравнению с наилучшим значением, соответствующим одномодовому возбуждению, на 5 % при $\lambda / r_0 = 2,05$ и на 18 % при $\lambda / r_0 = 1,3$.

Указанный выигрыш разумеется не является предельным при многомодовом возбуждении. Определение наилучшего способа возбуждения, числа и параметров возбуждаемых мод требует проведения детальных исследований для каждого технологического процесса.

Заключение

В последние годы активно проводятся исследования по применению СВЧ электромагнитного излучения при добыче и транспортировке нефти [3]. Наиболее распространенным способом транспортировки высоковязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам является перекачка с подогревом.

В данной работе построена и исследована математическая модель СВЧ-нагрева движущейся жидкости в цилиндрическом трубопроводе, отличающаяся от математической модели исследованной в [3] тем, что в данном случае учитывается изменение температуры не только за счет конвекции, но и за счет механизма теплопроводности.

Приемлемой моделью для исследования СВЧ-нагрева жидкости в трубопроводе может служить представление трубопровода в виде цилиндрического волновода, в котором возбуждается один или несколько типов волн.

При построении математической модели предполагается, что поперечная составляющая скорости нефти равна нулю, а продольная составляющая скорости при ламинарном течении нефти в трубопроводе (число Рейнольдса < 2000) не изменяется по длине трубы и имеет параболическую зависимость от радиуса [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части Государственного задания 3.1962.2014/К.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные микроволновые технологии // под ред. Г.А. Морозова, Ю.Е. Седелникова. М.: Радиотехника, 2003.
2. Анфиногентов В.И. Численное моделирование сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева несжимаемой вязкой жидкости, движущейся в цилиндрической трубе // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. Т. 11. № 2–3. С. 3–9.
3. Трубопроводный транспорт нефти. Т. 1 / под ред. С.М. Вайншток. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 407 с.
4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2. М.: Наука, 1973. 584 с.

The solution to the problem of microwave heating of composite materials

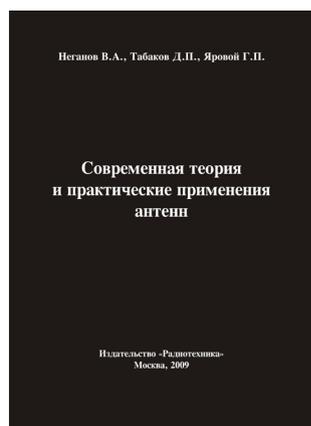
G.A. Morozov, O.G. Morozov, V.I. Anfinogentov,
D.A. Vedenkin, S.V. Smirnov, S.R. Ganieva

This paper considers the problem of microwave heating of polymers, asphalt-paraffin deposits when filling metal, short-circuited cylinder. The problem of formation and optimization of electromagnetic fields. The results of simulation of excitation of a cylinder with the use of maximum and integral criteria.

Keywords: microwave, mathematical model, polymer, asphalt, paraffin, resin, dielectric, Bessel.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.



ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67

ББК 32.845

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.