

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: badem@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
23.10 2009 г. — 23.05 2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП «Сатурн», г. Киев)

МИКРОВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В НЕРЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМАХ

Обсуждаются принципы построения нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрической среды и результаты их экспериментальной реализации, при которой достигаются свойства систем, отличные от традиционных.

Преимуществами микроволновой обработки диэлектрических сред (связанной, прежде всего, с потерями электромагнитной энергии на преодоление взаимного притяжения их поляризованных молекул) перед другими способами обработки (например, нагревом) являются прямое объемное, экологически чистое воздействие, высокая интенсивность, гибкая управляемость процесса, независимость от дефицитных источников энергии [1]. Именно поэтому микроволновая обработка диэлектрических материалов в камерах различного назначения получила широкое распространение несмотря на некоторые недостатки, а именно [2, 3]:

— «стоячие» волны в объеме резонансной камеры вызывают локальные перегревы диэлектрических материалов в пучностях и недогревы в узлах стоячей волны;

— поверхностные токи в стенках резонансной камеры наводят в шлюзах камеры внешние излучения, что создает помехи для электронного оборудования;

— из-за взаимной расстройки резонансных частот камеры и генератора при малой загрузке камеры потери энергии в системе увеличиваются на десятки процентов;

— работа генератора на несогласованную нагрузку вызывает его перегрев из-за стоячих волн в питающем волноводе.

Актуальность совершенствования систем микроволновой обработки определяется, таким образом, нереализованностью потенциальных возможностей существующего способа воздействия электромагнитного поля на диэлектрическую среду в резонансной системе, востребованного в настоящее время.

Целью статьи является обсуждение физических основ процесса микроволновой обработки, которое направлено на совершенствование способа обработки диэлектрических материалов и на создание более совершенных микроволновых систем — нерезонансных, которые могут обеспечить более высокое качество обработки материалов, энергетическую эффек-

тивность, экологическую безопасность процесса микроволновой обработки.

В ходе настоящих исследований были сформулированы физико-технические принципы создания нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрических материалов. Их применение в совокупности позволяет обеспечивать равномерное электромагнитное поле в обрабатываемой среде, безопасный уровень излучений из камеры, независимость КПД системы от уровня загрузки камеры. Принципы, основанные в [4—6], впервые сформулированы в следующем виде.

◦ Резонансные свойства камеры микроволновой обработки целесообразно нейтрализовывать с помощью покрытия, наносимого на стенки камеры, преобразующего балластную энергию поля в тепловую.

◦ Электромагнитную энергию, вводимую в камеру, необходимо концентрировать в объеме обрабатываемого образца диэлектрического материала с помощью излучателя, имеющего такую диаграмму направленности, у которой размеры поперечного сечения в картинной плоскости соответствуют среднестатистическим размерам сечения обрабатываемых образцов.

◦ Продольный размер обрабатываемого образца диэлектрического материала должен быть согласован с глубиной проникновения поля в материал этого образца.

◦ Размеры камеры микроволновой обработки целесообразно согласовывать с соответствующими усредненными размерами обрабатываемых образцов.

◦ Электромагнитная балластная энергия, падающая на покрытие, преобразующее ее в тепловую, должна отводиться с помощью теплообменника и использоваться для интенсификации процесса обработки.

◦ Раскрыв излучателя должен быть удален от обрабатываемого образца на расстояние, большее чем расстояние до ближней границы дальней зоны излучения электромагнитных колебаний.

Для реализации преимуществ нерезонансной системы микроволновой обработки необходимо применение в ее конструкции трех дополнительных элементов: концентратора (излучателя) электромагнитной энергии, покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую и теплообменника.

Реализация покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую требует применения термостойких и влагостойких радиопоглощающих покрытий с малым коэффициентом отражения и коэффициентом прохождения типовых сред на уровне $-(5-10)$ дБ/мм [7].

Термостойкой основой для таких покрытий являются полимеры органической или неорганической природы (например, эпоксикремнийорганические смолы и каолиниты). В качестве наполнителя композитных материалов целесообразно применять ферриты на основе электропроводящих оксидов переходных металлов со структурой шпинели обращенного типа [8]. Именно эти наполнители позволяют обеспечить не только требуемый уровень электропроводности композитного преобразователя энергии, но и необходимую его суммарную намагниченность вследствие неполной компенсации антиферромагнитного упорядочения спиновых систем их элементарной молекулярной ячейки.

Прогнозирование ожидаемого значения коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую для покрытия с градиентом электромагнитных потерь поля существенно упрощает трудоемкую и малопроизводительную процедуру построения преобразователей с требуемыми свойствами [9]. Такая аналитическая оценка проводится по результатам предварительно измеренных значений коэффициентов отражения и прохождения каждого из слоев этого многослойного покрытия.

Модель нерезонансной системы для микроволновой обработки диэлектрических сред приведена на рис. 1. Новые узлы конструкции, вводимые в известную систему, здесь заштрихованы, а параметры в блоке логических переходов обозначают следующие: r_0 и s_0 — соответственно продольный размер и площадь поперечного сечения образца; r — глубина проникновения электромагнитного поля в образец; s — площадь поперечного сечения (у поверхности обрабатываемого образца) диаграммы направленности концентратора-излучателя электромагнитной энергии, вводимой в рабочую камеру.

На рис. 2 представлен общий вид нерезонансной системы производственного назначения с осесимметричным воздействием электромагнитного поля для обработки (например, сушки) формованной продукции.

Общий вид нерезонансной камеры (печи) бытового назначения для нагрева различной продукции с односторонним воздействием поля приведен на рис. 3,

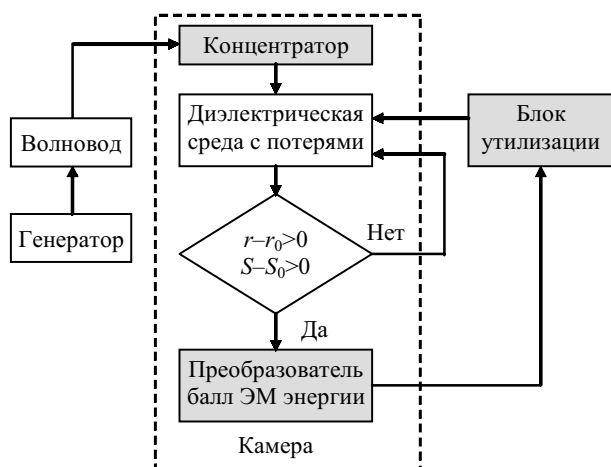


Рис. 1. Модель нерезонансной системы микроволновой обработки материалов

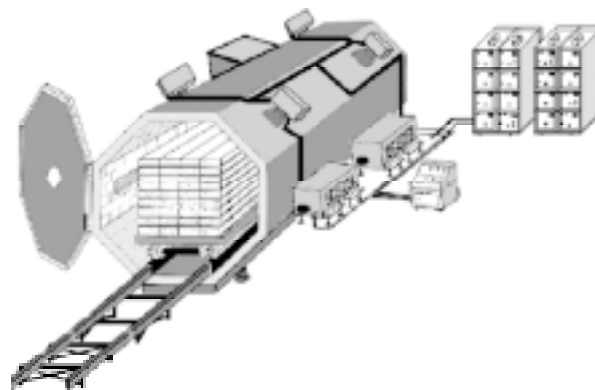


Рис. 2. Камера производственного назначения нерезонансного типа

а зависимости КПД таких камер от уровня их относительной загрузки, построенные по экспериментальным данным, полученным до и после модернизации микроволновых печей известных зарубежных (Японии, Италии, Кореи) и отечественных производителей, представлены на рис. 4. Здесь m — загружаемая масса, m_0 — номинальная масса загрузки (принята равной 2 кг).

Сравнительные характеристики уровня плотности потока мощности мешающих излучений из микроволновых камер резонансного типа и из модернизированных рабочих камер нерезонансного типа, измеренные экспериментально с помощью прибора типа TZA-354 (Венгрия) с чувствительностью 0,05 мкВт/см², представлены на рис. 5 и 6.

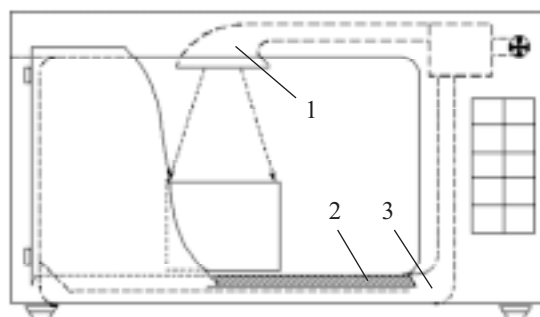


Рис. 3. Бытовая микроволновая печь нерезонансного типа с новыми элементами системы: 1 — концентратор (излучатель); 2 — преобразователь балластной энергии; 3 — элемент теплообменника

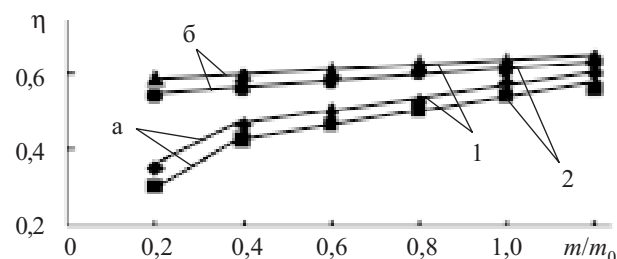


Рис. 4. Зависимость КПД микроволновых камер различного типа от уровня их загрузки до (а) и после (б) модернизации:

1 — камеры типа SMC E70-TFA и Delongi; 2 — камеры типа KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

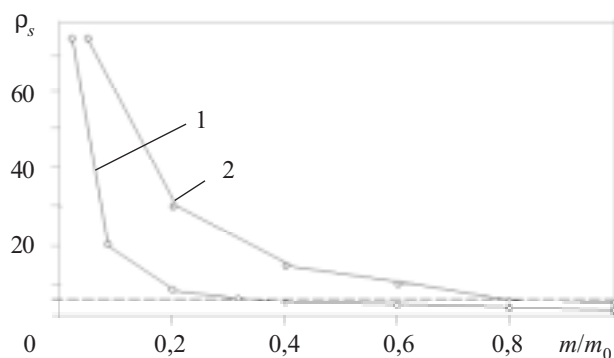


Рис. 5. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из резонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — камеры SMC E 70-TFA и Delongi; 2 — камеры KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

Нерезонансная система микроволновой обработки позволяет, кроме повышения КПД и уменьшения плотности мощности излучений из камеры, реализовать некоторые новые функции, например избирательное воздействие на отдельные компоненты диэлектрической среды. Уровень избирательности обработки двухкомпонентной смеси нетрудно оценить, используя известные уравнения для удельной плотности мощности поля, диссипируемого в обрабатываемой среде и в другом компоненте, например в материале клеток микроорганизмов этой среды. Компоненты отличаются величиной удельной электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ , удельной теплоемкости c и массовой плотности ρ .

Коэффициент избирательности обработки компонентов в этой системе K_T представляет собой отношение ожидаемого уровня повышения температуры $\Delta\theta_k$ клеток микроорганизмов к уровню дополнительного повышения температуры $\Delta\theta_c$ продукта при условии отсутствия теплообмена между компонентами, составляющими обрабатываемую продукцию, т. е. при значительной инерционности теплообмена, когда время, необходимое для эффективного теплообмена, значительно больше времени импульсного воздействия электромагнитного поля. В таких условиях это отношение имеет вид [10]

$$K_T = \frac{\Delta\theta_k}{\Delta\theta_c} = \frac{\sigma_k / (c_k \rho_k \epsilon_k^2)}{\sigma_c / (c_c \rho_c \epsilon_c^2)}.$$

В более общем случае, т. е. при произвольной интенсивности воздействия, равной отношению мощности импульса поля к его длительности, коэффициент избирательности является функцией этой интенсивности и определяется с помощью статистической модели, предложенной в [10].

Таким образом, установлено, что реализация процесса микроволновой обработки диэлектрических сред в нерезонансной системе, осуществленная в опытных образцах, построенных согласно предложенным принципам, в отличие от известных, обеспечивает равномерное поле нагрева, практически нулевой уровень мешающих излучений из камеры (по-

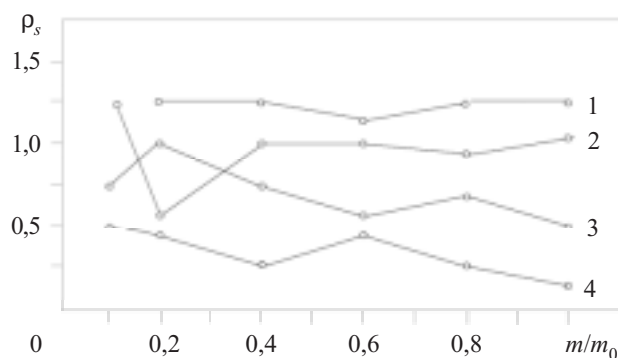


Рис. 6. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из нерезонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — «Дніпрянка-1»; 2 — KOR-6105; 3 — SMC E 70-TFA; 4 — Delongi

мех), энергетическую эффективность, слабо зависящую от уровня загрузки камеры, работу генератора в режиме бегущей волны.

Воздействие поля, имеющего практически одинаковую интенсивность в произвольных точках объема образца обрабатываемой диэлектрической среды, обеспечивает избирательный уровень нагрева компонентов среды, что способствует реализации перспективных технологических режимов щадящего температурного воздействия поля на отдельные компоненты, например на полезные биологически активные термолabileльные составляющие продукции.

Реализация короткоимпульсного электромагнитного поля в предлагаемой системе с концентрацией излучения и с преобразованием (т. е. поглощением) балластной электромагнитной энергии обеспечивает ослабление уровня мешающего излучения из камеры практически до нуля независимо от длительности импульсов энергии поля, подаваемого в эту рабочую камеру.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Copson D. A. Microwave heating. — Avi, Westport, CT, 1975.
2. Jassie L. B., Kingston H. M. Microwave dissolution in closed vessels under elevated temperature and pressure. — Pittsburgh, 1985, Paper № 108A.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989.
4. Демьянчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева. — Одесса: Черноморье. — 2004.
5. Демьянчук Б. А. Модель и новые свойства нерезонансных камер микроволнового нагрева диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, № 4. — С. 373—378.
6. Патент України на винахід 85756. Мікрохвильова піч // Б. О. Дем'янчук. — 25.02 2009.
7. Демьянчук Б. А. Материалы-преобразователи электромагнитной энергии в тепловую: требования, технология // Конструирование и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 5. — С. 31—35.
8. Демьянчук Б. А., Полищук В. Е. Синтез ферромагнитных оксидов-наполнителей радиоматериалов // Конструирование и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 5. — С. 61—64.
9. Дем'янчук Б. О. Метод оцінки рівня відбиття електромагнітних хвиль від багатопшарового покриття на металевій підложці // Вісник НУ «Львівська політехніка». — Електроніка. — 2007. — № 592. — С. 164—168.
10. Демьянчук Б. А. Статистическая модель избирательного воздействия электромагнитного поля на составляющие диэлектрической среды // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 1. — С. 44—48.