

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК, Н. В. ОЛЕНЕВ

Украина, Одесский институт Сухопутных войск

Дата поступления в редакцию  
18.04 2003 г.

Оппонент В. Н. КОВАЛЬЧУК  
(«Сатурн-Микро», г. Киев)

## ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Обсуждаются недостатки традиционных способов микроволнового нагрева диэлектрических материалов и возможности альтернативных «нерезонансных» решений проблемы.*

Полувековой период развития технологии микроволнового нагрева сплошных и кусочно-однородных сред с диэлектрическими потерями характеризуется не только теоретическими обобщениями [1, 2], но и экспериментальными. Это способствовало совершенствованию технологических процессов нагрева материалов и в промышленном производстве [3, 4], и в обработке пищевой продукции [5], и в экспериментальной лабораторной практике [6], и в быту [7]. Однако применение металлических (для ослабления фоновых излучений) резонансных камер порождает проблемы неравномерного по объему неконтролируемого нагрева в узлах и пучностях “стоячей” волны в камере, что неизбежно ухудшает качество обработки. Это обстоятельство, а также мешающие фоновые излучения через технологические шлюзы — все это сдерживает спрос на такое оборудование.

В последние годы, с использованием данных радиофизики, термоэлектродинамики, физики твердого тела и микроэлектродинамики, нами получены новые результаты, созданы установки, обеспечивающие нагрев диэлектрических материалов в режиме “бегущей” волны в камере, модернизированной в соответствии с новыми принципами ее построения [8, 9], что снимает множество проблем традиционного микроволнового нагрева.

Известно, что обычное тепловое воздействие на материалы и продукцию органического и неорганического происхождения при заданных температуре и времени — это, по-видимому, самый распространенный технологический процесс и в производстве, и в быту, как правило, требующий равномерного и гибко управляемого нагрева. Однако при любой попытке интенсифицировать этот технологический процесс с применением обычных источников контактного, конвективного или электрического нагрева рассчитывать на высокое качество продукции не приходится из-за весьма ограниченной теплопроводности диэлектрических материалов.

Действительно, наивно рассчитывать, например, на высокую скорость и высокую степень полимеризации при изготовлении детали из полимерного диэлектрического материала, когда вместо требуемого равномерного по объему нагрева образец вынужденно подвергается внешнему его перегреву с одновременным внутренним недогревом. Точно так же теряется качество выход-

ного продукта из-за недостаточной равномерности теплового нагрева в технологии сушки диэлектрических материалов, например, оксидов и сульфатов металлов или порошкообразных материалов, содержащих химически связанную воду.

Появление в 1950-х годах микроволновых систем нагрева диэлектрических материалов породило новые надежды. Возможности глубокого проникновения поля в обрабатываемые материалы, непосредственное воздействие энергии электромагнитного поля, например, на отверждаемые диэлектрические материалы или на удаляемую влагу, высокая степень радиопрозрачности сухой продукции — все это казалось вначале факторами, гарантирующими решение многих существенных проблем интенсификации нагрева при сохранении требуемого качества продукции.

Проследим физику микроволнового нагрева. Интенсивность нагрева диэлектрических материалов  $dT/dt$  с удельной их электропроводностью  $\sigma$  и электропроводностью влаги  $\sigma_v$ , подлежащей удалению, связана с напряженностью электромагнитного поля  $E$  уравнением термозлектродинамического баланса:

$$[\sigma_v w + \sigma(1-w)]E^2 = C \frac{dT}{dt} p \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

где  $w, C, p$  — концентрация влаги, теплоемкость и плотность нагреваемого материала, соответственно;

$\eta$  — коэффициент теплоизолированности процесса нагрева.

Из уравнения следует, что поскольку обычно  $\sigma_v \gg \sigma$ , то рост температуры, например, продукции, подвергаемой сушке, является значительным лишь там, где выше влажность. Кроме того, видно, что на заключительном этапе, когда интенсивность нагрева значительно уменьшается, нагрев продолжается лишь там, где остается влага.

Однако все это справедливо лишь при постоянном уровне напряженности электромагнитного поля  $E$ . Последнее же условие при применении традиционного (подчеркнем это) микроволнового оборудования всегда не выполняется ввиду принципиального конструктивного несовершенства этих камер микроволнового нагрева.

Удельная объемная плотность мощности (левая часть равенства (1)), вносимая электромагнитным полем в диэлектрический (например, немагнитный) материал органического или неорганического происхождения, помещенный в это поле, зависит, как видим, только от его результирующей удельной электропроводности  $\bar{\sigma}$  и электрической напряженности  $E$ , которая изменяется в объеме традиционной камеры

микроволнового нагрева по закону, близкому к синусоидальному. Это является следствием интерференции падающей ( $E^0$ ) и отраженной ( $E^-$ ) волн с комплексными амплитудами в виде

$$\dot{E}_m^0 = \bar{x}_0 \dot{A} e^{-ikz}; \quad (2)$$

$$\dot{E}_m^- = \bar{x}_0 \dot{B} e^{ikz}; \quad k = \frac{2\pi}{c} f. \quad (3)$$

При волновом сопротивлении нагреваемого диэлектрического материала ( $\dot{\rho}$ ) и металла стенки камеры ( $\dot{\rho}_M$ ) отраженный сигнал с учетом соотношений

$\dot{B} = \dot{A}(\dot{\rho}_M - \dot{\rho})/(\dot{\rho}_M + \dot{\rho})$  и  $|\dot{\rho}_M| \leq |\dot{\rho}|$  целесообразно представить в виде

$$\dot{E}_m^- = -\bar{x}_0 \dot{A} \left( \frac{\dot{\rho}_M}{\dot{\rho}} - 1 \right)^2 e^{ikz}. \quad (4)$$

Складывая амплитуду падающего сигнала (2) и отраженного от металлической стенки камеры (4), получим поле в объеме нагреваемого продукта:

$$\dot{E}_m = \bar{x}_0 \cdot 2\dot{A} \cdot e^{-i\frac{\pi}{2}} \left( \sin kz + \frac{\dot{\rho}_M}{\dot{\rho}} e^{ikz} \right). \quad (5)$$

Этот результат означает, что поле нагрева в объеме продукции в камере традиционной конструкции имеет практически нулевой уровень интенсивности через каждую половину длины волны, что, естественно, исключает возможность равномерного воздействия на обрабатываемые материалы. При этом не может быть реализовано точно дозированное воздействие.

Вряд ли в этой ситуации можно гарантировать заданное высокое качество продукта при микроволновом быстром объемном нагреве. Для обеспечения требуемого качества допустимо лишь щадящее воздействие, т. е., по существу, нагрев в расчете на медленное уравнивание температур в объеме продукта. Это означает, к сожалению, потерю надежды на высокопроизводительный и строго контролируемый нагрев. Получается, как и ранее: технология и оборудование вроде бы современные, а проблемы те же, хорошо знакомые.

Заметим, что термин “объемный микроволновый нагрев” из-за его некорректности требует специального пояснения, хотя бы по причине всегда конкретной глубины проникновения поля в нагреваемый диэлектрический материал.

Выясняя количественную зависимость этой глубины эффективного воздействия (т. е. длины пути, пройденного полем в толще, например, немагнитного материала, при котором поле ослабляется в  $e$  раз), мы вынужденно наталкиваемся здесь на весьма распространенное заблуждение многих авторов, утверждающих, что эта глубина  $\Delta$  обратно пропорциональна частоте электромагнитных колебаний  $f$ , тангенсу угла потерь материала  $\text{tg}\delta$  и корню из его диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  [5, 7]. Ссылка при этом на объективно существующее соотношение

$$\Delta = \frac{c}{\pi f \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot \text{tg}\delta}, \quad (6)$$

мягко говоря, не выдерживает критики. Поясним это утверждение.

Проведем простое преобразование (6) с учетом общеизвестной зависимости для  $\text{tg}\delta$ . Тогда получим:

$$\text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0 2\pi f} \Rightarrow \Delta = \frac{2c\epsilon_0\sqrt{\epsilon}}{\sigma}. \quad (7)$$

Как видим, глубина проникновения поля прямо пропорциональна корню из диэлектрической проницаемости и обратно пропорциональна удельной электропроводности материала. А уменьшение  $\Delta$  с увеличением частоты колебаний поля, действительно, почти всегда наблюдается, однако оно наблюдается из-за того, что почти всегда имеет место значительное уменьшение проницаемости с увеличением частоты, и весьма часто это сопровождается увеличением удельной электропроводности материалов, обрабатываемых на более высоких частотах.

Более того, представляет заметный технологический интерес зависимость характеристики глубины  $\Delta$  эффективного воздействия поля на материал от температуры этого материала. Исследования показывают, что определяющие эту характеристику параметры  $\epsilon$  и  $\sigma$  всегда изменяются при изменении температуры, и это зависит от молекулярной структуры материала и от связанной с ней диэлектрической поляризуемости.

Известно, что электронная или ионная поляризация происходит без преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую. Другие же виды поляризации (дипольная, ионно-релаксационная, миграционная и спонтанная) сопровождаются нагревом диэлектрика за счет указанного преобразования.

Электронная поляризация сопровождается упругим смещением и упругой деформацией электронных оболочек атомов. Диэлектрики с электронной поляризацией — это неполярные или слабополярные твердые вещества (полистирол, полиэтилен, фторопласт, парафин, нафталин и др.), жидкости (бензол, крезол, толуол и др.), газы (водород и др.). При повышении температуры величина их диэлектрической проницаемости уменьшается, что происходит из-за уменьшения плотности диэлектрика.

Ионная поляризация представляет собой смещение упруго связанных ионов. Диэлектрики с ионной поляризацией — это кристаллические твердые тела с плотной упаковкой ионов (кварц, слюда и др.). Диэлектрическая проницаемость таких материалов с повышением температуры растет, что связано с ослаблением связей между ионами.

Дипольная поляризация сопровождается изменением ориентации диполей и радикалов в объеме обрабатываемого полем материала. Диэлектрики с такой поляризацией — это полярные жидкости, например вода, у молекул которой центр электрического заряда не совпадает с центром массы. Это органические жидкие вещества (эпоксидные смолы), органические твердые вещества (целлюлоза и др.). Диэлектрическая проницаемость этих материалов имеет максимальное значение при определенной температуре. При меньших значениях температуры диэлектрическая проницаемость таких веществ меньше из-за более сильных межатомных связей в молекулах,

при более высоких значениях температуры этот параметр становится меньше из-за увеличения хаотического теплового движения молекул, препятствующего процессу поляризации. Однако во всем диапазоне изменения значений температуры (от меньших к большим) при микроволновом нагреве полярных жидкостей наблюдается устойчивое уменьшение их удельной электропроводности (рис. 1). Это обусловлено устойчивым ослаблением релаксационного взаимодействия поля с полярными молекулами этих веществ по мере увеличения их температуры. Причем на больших частотах колебаний поля это сказывается меньше.

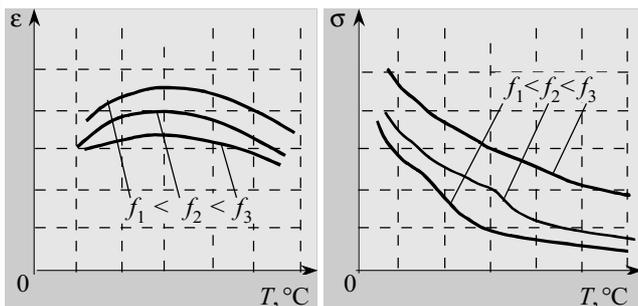


Рис. 1. Характерные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и удельной электропроводности  $\sigma$  от температуры для полярных жидкостей

Заметим, что конкретные значения параметров  $\epsilon$  и  $\sigma$  на рис. 1, естественно, зависят от типа полярной жидкости, нагреваемой в электромагнитном поле. Так, для воды (природной) при изменении температуры от 1,5 до 95°C на частоте 2450 МГц величина  $\epsilon$  изменяется в пределах от 65 до 78 и снова до 64, а величина  $\sigma$  уменьшается при этом от 2,6 до 0,6 Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>.

*Ионно-релаксационная поляризация* связана с изменением направлений ориентации векторов собственного электрического поля ионов неорганических стекол, фарфора и кристаллических диэлектриков с неплотной упаковкой ионов. С повышением температуры поляризуемость этих материалов выше, что объясняется ослаблением связей между ионами.

*Миграционная поляризация* свойственна твердым телам с неоднородной структурой. В случае, если в среде объемом  $V_2$  с относительной диэлектрической поляризацией  $\epsilon_2$  и удельной электропроводностью  $\sigma_2$  в объеме, равном  $V_2+V_1$ , размещены включения с объемом  $V_1$  произвольной формы с параметрами  $\epsilon_1$  и  $\sigma_1$ , то, следуя рекомендациям Лихтенкера, нетрудно получить оценочные соотношения для результирующих параметров  $\bar{\epsilon}$  и  $\bar{\sigma}$  в виде

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)^{\frac{V_1}{V_1+V_2}}; \quad \bar{\sigma} = \sigma_2 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{\frac{V_1}{V_1+V_2}}. \quad (8)$$

Естественно предположить, что точную зависимость этих параметров от температуры целесообразно обсуждать лишь в конкретных условиях, поскольку в общем случае она обусловлена и параметрами составляющих композиции, и концентрацией включений, т. е. наполнителя, и формой частиц включений, и характером их упаковки.

Более того, если наполнитель характеризуется высокой диэлектрической проницаемостью и удельной электропроводностью, по сравнению со связующей основой, то результирующие параметры отвержденной композиции при определенной концентрации наполнителя, когда его частицы начинают контактировать, скачкообразно увеличиваются при наступлении порога перколяции  $q_n$ , что особенно характерно для величины удельной электропроводности. При этом резко (в соответствии с (7)) уменьшается глубина проникновения поля в нагреваемую среду в виде, например, ферритонаполненной композиции.

Пример такого изменения параметров  $\epsilon$  и  $\sigma$  в зависимости от концентрации  $q$  полупроводникового ферритового наполнителя — оксида переходных металлов (в составе композиции на основе термоэластопласта) приведен на рис. 2 ( $q=V_1/(V_1+V_2)$ ).

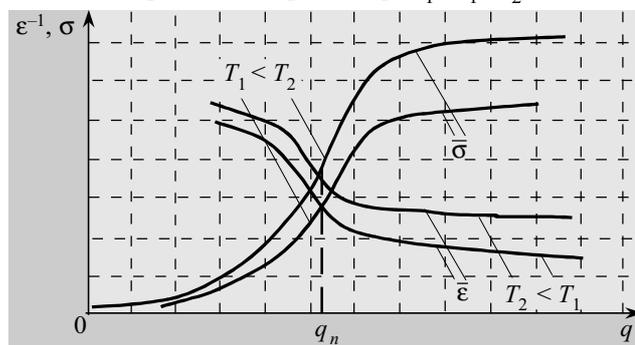


Рис. 2. Характерные зависимости  $\bar{\epsilon}$  и  $\bar{\sigma}$  от концентрации наполнителя

Насколько актуально учитывать эти зависимости от температуры, определяется конкретной задачей нагрева конкретного материала. Так, если нагреву подлежит весьма радиопрозрачный материал толщиной значительно меньшей, чем колебания глубины его нагрева, то учет эффекта не имеет смысла. Другое дело, когда речь идет о нагреве диэлектрических или полупроводниковых материалов в объеме с толщиной, соизмеримой или значительно превышающей глубину проникновения поля  $\Delta$ .

Однако учитывая, что в подавляющем большинстве случаев речь идет о нагреве диэлектрических материалов с малыми потерями, проблема неравномерного по глубине прогрева стоит значительно менее остро, чем проблема неравномерного нагрева из-за “стоячих” волн в традиционной микроволновой камере резонансного типа, а также другие проблемы, вызванные той же причиной.

В итоге, обобщая сказанное и опираясь на наши опытные данные, позволим себе предположить, что весьма сдержанное распространение технологии микроволнового нагрева, особенно в производственных условиях, обусловлено, к сожалению, совокупностью недостатков микроволновых камер традиционной конструкции (резонансного типа). К ним относятся:

— наличие локальных перегревов в пучностях и недогревов в узлах “стоячей” волны во всем объеме нагреваемого продукта;

— уменьшение примерно в 2 раза к.п.д. камеры при ее недогрузке из-за смещения спектра ее собственных частот от частоты СВЧ-генератора;

— высокий уровень фоновых излучений камеры, что часто приводит к отказу от обработки продукции на потоке, вызывает проблемы со здоровьем оператора и создает помехи в работе электронной аппаратуры;

— снижение эксплуатационной надежности камеры из-за высокой вероятности самоперегрева генератора, работающего в режиме "стоячей" волны в питающем волноводе при несовпадении собственных частот камеры и генератора.

Принципы модернизации камеры, разработанные в Одессе в последнее десятилетие, являются, на наш взгляд, найденным теоретическим и экспериментальным решением существующей проблемы микроволнового нагрева, позволяющим дать перспективной технологии новый импульс в развитии путем устранения недостатков, перечисленных выше.

Вопросы технической реализации принципов модернизации камер являются предметом отдельной статьи, здесь же отметим следующие три принципиально важных момента.

1. Устранение случайных по месту и времени локальных перегревов и недогревов диэлектрических материалов в новой микроволновой камере позволяет за счет точно дозированного, гибко управляемого объемного воздействия гарантированно получать на потоке продукцию высокого качества при реализации различных технологических процессов: сушки, отверждения покрытий с более высокой степенью полимеризации, коррекции электрофизических свойств композиционных материалов и др.

2. Именно в такой камере возможна реализация избирательного нагрева компонентов смеси, отличающихся удельной электропроводностью  $\sigma$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , массовой плотностью  $\rho$  и удельной теплопроводностью  $C$ .

Нами установлено, что при кратковременной экспозиции (когда время экспозиции значительно меньше времени теплопередачи в среде) отношение температур нагрева компонентов (назовем его коэффициентом избирательности нагрева) равняется

$$\gamma = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\sigma_1 / C_1 \rho_1 \epsilon_1^2}{\sigma_2 / C_2 \rho_2 \epsilon_2^2} . \quad (9)$$

3. Исключение в новой технологии микроволновой обработки фактора неопределенности нагрева по месту и времени при интенсивном воздействии, по-

видимому, будет способствовать освоению весьма перспективных нетрадиционных технологий, не существовавших ранее, например, гарантированной стерилизации препаратов, смесей и жидкостей при низкой температуре, вспенивания гранулированных полимеров, получения плазменных образований в пространстве и т. д.

\*\*\*

В заключение выразим надежду на постепенный переход в теории и на практике от затронутых возможностей и перспективных ожиданий к их реальному внедрению, прежде всего, в Украине.

Естественно, это произойдет лишь при выполнении трех необходимых условий: во-первых, при объединении усилий ученых, практиков производства и владельцев капиталов, реально определяющих приоритеты вложения средств; во-вторых (и это, быть может, еще более сложное условие), при преодолении психологической инерции людей, как правило, вначале отвергающих новое (что естественно); в-третьих, при опережении реакции многочисленных и могущественных зарубежных производителей традиционного микроволнового оборудования для нагрева (производственного и бытового назначения). Благо у них больше оснований проявлять осторожность при переходе на новые технологии, когда старые производственные фонды и прибыли от производства старого, но имеющего спрос микроволнового оборудования оцениваются миллиардами евро и долларов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны.— М.: ИИЛ, 1960.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Гостехиздат, 1982.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов.— Л.: Машиностроение, 1989.
4. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных оксидов. Т. 2.— М.: Мир, 1976.
5. Клоков Ю. В., Остапенков А. М. О глубине проникновения ЭМП СВЧ в пищевые продукты // Электронная обработка материалов.— 1988.— № 5.— С. 65—68.
6. Кингстон Г. М., Джесси Л. Б. Пробоподготовка в микроволновых печах.— М.: Мир, 1991.
7. Рогов И. А., Некрутман С. В. СВЧ-нагрев пищевых продуктов.— М.: Агропромиздат, 1986.
8. Пат. 2726606 России. Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов / Б. А. Демьянчук, В. Е. Полищук.— 20.02 1999 г.
9. Пат. № 34517 України. Спосіб мікрохвильового нагріву / Б. О. Дем'яничук, Б. Л. Бахчеван.— 15.03 2001 р.



Украина, 69035,  
Запорожье,  
пр. Ленина, 166.  
тел.: (0612) 33-32-94  
факс: (0612) 34-23-79  
E-mail:  
ukom@zp.ukrtel.net

## ХАРТРОН-ЮКОМ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

*Научно-техническая продукция общепромышленного назначения:*

- приборы и системы управления и контроля в переработке, транспортировании и хранении газа, нефти и нефтепродуктов;
- автоматизированные системы и приборы управления технологическими процессами промышленных и энергетических объектов;

- высокочувствительные электронные газоанализаторы широкого спектра назначения;
- аппаратура скоростного канала передачи данных сейсмоакустической приёмной антенны для геолого-разведочных работ;
- волоконно-оптические системы передачи информации и оптоволоконные элементы атомных электростанций.