

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: p-e@tm.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
21.10 2003 г. — 10.03 2004 г.

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

МИКРОВОЛНОВЫЙ НАГРЕВ: ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ

Предложен способ модернизации технологии микроволнового нагрева диэлектрических материалов. Обосновываются преимущества нерезонансной системы нагрева перед традиционной, резонансной.

Технология микроволнового нагрева с целью отверждения, сушки, коррекции свойств различных диэлектрических материалов или полимерных композитов с токопроводящими наполнителями, в целом, относится к разряду энергосберегающих и повышающих качество продукции [1—3]. Благодаря совпадению направлений убывания (т. е. градиентов) температуры, давления паров, влажности обрабатываемых материалов при таком их нагреве скорость обработки увеличивается в два—три раза. Подобного совпадения в принципе невозможно достичь не только в конвективных, но и в нагревателях инфракрасного или ультрафиолетового диапазона, поскольку волны лишь микроволнового диапазона имеют достаточную (для внутреннего нагрева) глубину проникновения в обрабатываемую продукцию [3, 4].

Однако для традиционной технологии микроволнового нагрева это утверждение справедливо лишь при воздействии в щадящем режиме, когда обеспечивается выравнивание интенсивности поля нагрева в обрабатываемой продукции за счет классической теплопередачи. Специфические особенности действующих при этом механизмов ранее уже обсуждались [5]. Здесь напомним лишь, что именно по причине опасности для человека фоновых излучений нагрев традиционно осуществляют в закрытых металлических и, значит, резонансных камерах. Это приводит, как известно, к проблемам обработки продукции на потоке, к локальным ее перегревам и недогревам из-за "стоячей волны" в объеме камеры, к снижению энергоэкономичности процесса нагрева, например, из-за уходов собственной частоты резонансной камеры при ее недогрузке от частоты микроволнового генератора, "нагруженного" на камеру.

Локальные перегревы и недогревы обрабатываемой продукции в традиционной технологии микроволнового нагрева считаются особенно труднопреодолимым препятствием при широком применении этой технологии — например, для гарантированной стерилизации продукции, для пробоподготовки и для микроволнового синтеза новых материалов [6].

Целью данной статьи является не только конкретизация давно назревшей проблемы модернизации технологии микроволнового нагрева, но, прежде всего, обсуждение возможных путей и особенностей ее решения.

Составными частями проблемы создания новых микроволновых нагревателей являются:

- а) научная и экспериментальная разработка основ модернизации с целью создания микроволновых камер равномерного и СВЧ безопасного нагрева;
- б) исследование термоэлектродинамических свойств новых систем нагрева;
- в) оценка перспектив внедрения новых технологий микроволнового нагрева производственного и бытового назначения.

Отмеченные составляющие указанной триединой проблемы являются следствием трех существенных противоречий.

Во-первых, в настоящее время не существует научно обоснованных принципов построения микроволновых систем равномерного и СВЧ безопасного нагрева, в то время как специалистам по электродинамике хорошо известны общие рекомендации науки и практики, направленные на обеспечение режима бегущей волны в волноводных линиях передачи электромагнитных колебаний, а также рекомендации по ослаблению паразитных излучений в таких линиях [2, 3].

Во-вторых, несмотря на блестящие проработки множеством ученых отдельно взятых научных направлений, а именно, электродинамики, термодинамики, физики твердого тела, физики полупроводников, физики полимерных композитов, до настоящего времени не существует комплексного исследования, нацеленного на развитие специфического и важного для теории и практики направления, назовем его микро-термоэлектродинамикой нагрева.

Не затрагивая общеизвестных издержек узкопрофильной ориентации при подготовке специалистов, в результате которой специалисты по электродинамике имеют ограниченное представление о молекулярной физике и наоборот, отметим здесь, что сетования более чем 40-летней давности по этому поводу известного ученого, по-существу, основоположника микроэлектродинамики А. Хипшеля, остались до наших дней, по-видимому, без достойного внимания [1]. В этом плане исследование термоэлектродинамических, электродинамических свойств нетрадиционного микроволнового нагрева представляется оправданным и принципиально необходимым.

В-третьих, явные издержки традиционного микроволнового нагрева, несмотря на его неоспоримые достоинства, не привели к его широкому внедрению в производство. Понятно, что, скорее всего, это явилось следствием высокой опасности для оператора традиционной микроволновой обработки продукции на потоке. Зато там, где поток не применяется, в быту, преимущества указанного нагрева, несмотря на его явные недостатки, обеспечили массовое внедрение, нуждающееся в настоящее время в придании ему нового дыхания.

Естественной в этой ситуации и перспективной представляется попытка дальнейшего развития достижений многих десятков, сотен и тысяч разработчиков и производителей, предложив целой индустрии и потребителям изменить ориентацию предпочтений на нечто более совершенное, но с риском солидных издержек на нарушение стационарности установившегося процесса производства, сбыта и эксплуатации производственного микроволнового оборудования.

Декомпозиция путей совершенствования технологии микроволнового нагрева в общем виде схематически представлена на **рис. 1**.

Принципы модернизации технологии микроволнового нагрева сводятся, как показывают исследования, проведенные автором, к следующей совокупности приемов:

- нейтрализация резонансных свойств камеры путем концентрации энергии в объеме обрабатываемого образца диэлектрических материалов и преобразования балластной электромагнитной энергии в тепловую;
- утилизация тепловой энергии, преобразованной из балластной электромагнитной, с помощью теплообменника;
- согласование размеров раскрыва излучателя с поперечными размерами обрабатываемого образца или потока продукции;
- согласование размеров камеры с поперечными размерами обрабатываемого образца или потока продукции;

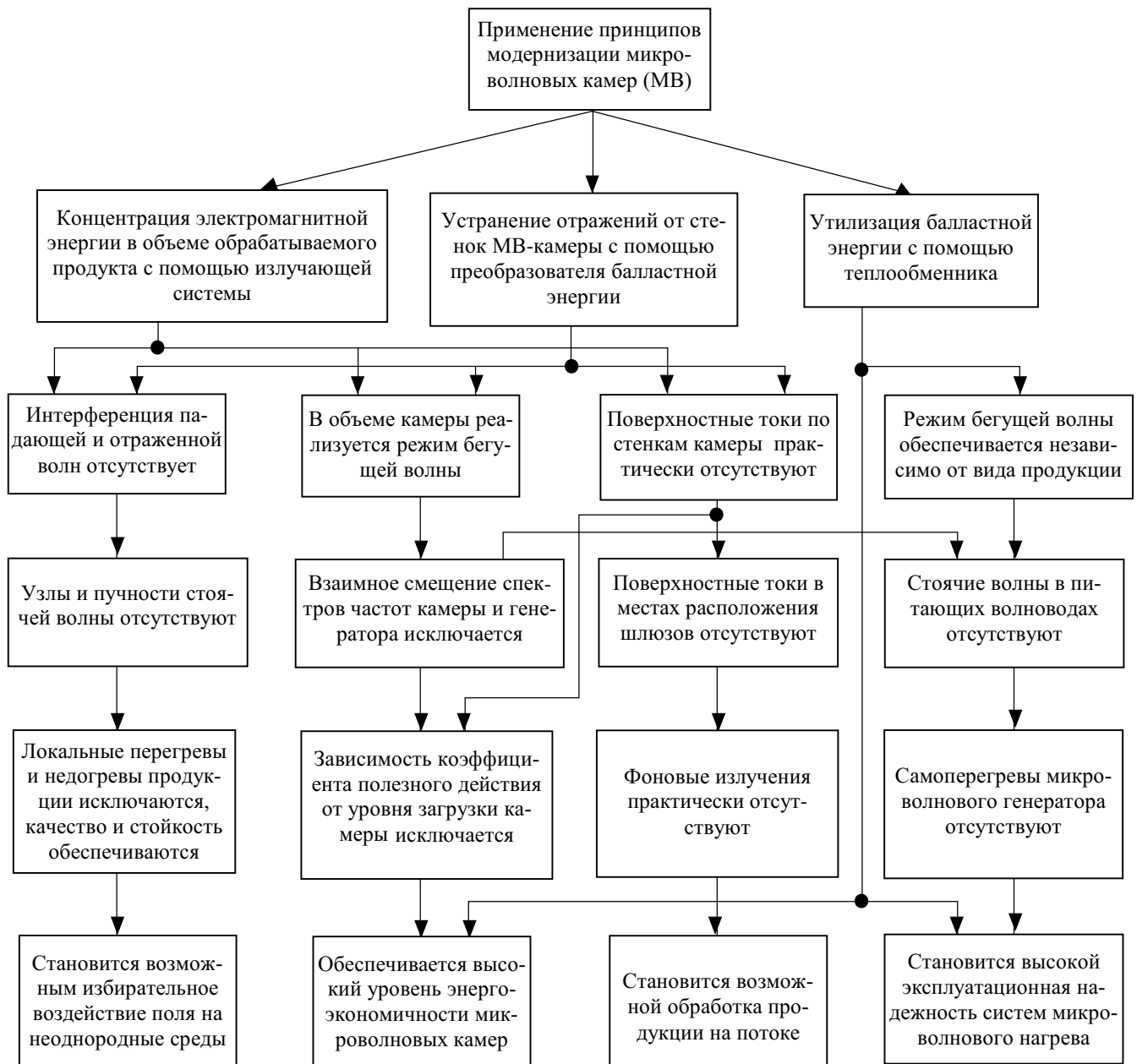


Рис. 1. Декомпозиция физико-технических путей решения проблемы улучшения качества микроволновых нагревателей

— согласование продольного размера обрабатываемых образцов материалов с ожидаемой глубиной проникновения электромагнитного поля в эти диэлектрические материалы;

— удаление раскрыва излучателя камеры от поверхности обрабатываемых образцов на расстояние, не меньшее, чем расстояние до ближней границы дальней зоны распространения электромагнитных колебаний.

Применение информационно-синергетического подхода к задаче определения необходимой и достаточной совокупности новых узлов системы микроволнового нагрева, обеспечивающей достижение целей модернизации, подтвердило однозначный вывод о том, что требуемое качество новой системы нагрева может быть достигнуто при условии введения в состав традиционной системы одновременно трех ее новых узлов: узла согласованной концентрации электромагнитного поля, узла преобразования балластной электромагнитной энергии в тепловую, узла теплообмена и утилизации тепловой энергии.

При соблюдении указанных принципов модернизации типовых микроволновых камер, например, камер бытового назначения известных зарубежных фирм, имеют место положительные эффекты, установленные нами экспериментально:

а) относительная величина “ухода” КПД камеры (из-за ее недогрузки) от его среднего значения уменьшается на 70% (с 49% до 15%), а относительное увеличение среднего (по нескольким уровням загрузки камеры) значения КПД составляет 28%;

б) показатель локальной равномерности нагрева продукции (за счет отсутствия “стоячих” волн в камере) увеличивается более чем на 80%;

в) плотность потока мощности фоновых излучений камеры, модернизированной в полном объеме, уменьшается более чем в 10 раз.

Нерезонансные камеры производственного назначения, предложенные автором в 1994—2002 гг., позволяют обеспечить интегрально- и локально-равномерное поле нагрева продукции, СВЧ-безопасность, экономичность процесса, режим “бегущей волны”, а следовательно, и надежность блока СВЧ-генератора. Энергия концентрируется, в основном, в объеме нагреваемого продукта, не поглощенное продуктом электромагнитное поле диссипируется балластным преобразователем — покрытием для камеры и, с помощью блока утилизации балластной электромагнитной энергии, способствует постоянному за время экспозиции интегрально-равномерному нагреву в нерезонансной рабочей камере. При этом отсутствует принципиальная необходимость следить за точным соблюдением номинального уровня загрузки камеры. СВЧ-генератор, всегда работающий на нерезонансную нагрузку в режиме “бегущей волны”, не перегревается.

Рассмотрим особенности и свойства новой камеры, которая отличается от традиционных резонансных камер высоким уровнем интегральной и локальной равномерности поля, малым уровнем фоновых излучений через технологические шлюзы, а также энергоэкономичностью за счет отсутствия взаимных уходных частот камеры и генератора, за счет кон-

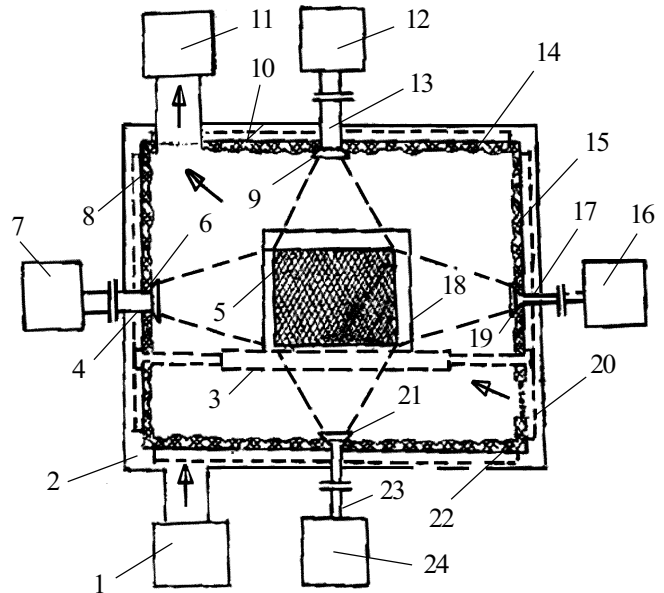


Рис. 2. Нерезонансная камера с согласованной концентрацией поля и конвективной утилизацией балластной энергии:

1 — нагнетательный вентилятор; 2 — воздуховоды; 3 — диэлектрический транспортер; 4, 13, 17, 23 — волноводы; 5 — обрабатываемый образец; 6, 9, 19, 21 — излучатели; 7, 12, 16, 24 — СВЧ-генераторы; 8, 14, 15, 22 — балластные преобразователи; 10 — корпус камеры; 11 — вытяжной вентилятор; 18 — шлюзы загрузки и выгрузки; 20 — теплообменные пластины

центрации энергии в объеме нагреваемого продукта и утилизации энергии поля при ее избыточности.

Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов, предложенная в 1994 г. и усовершенствованная в 1999 г., схематически представлена на рис. 2 [7, 8]. Она предназначена для нагрева продукции на потоке либо в статическом режиме.

Камера представляет собой конструкцию проходного типа. Тип шлюзов и транспортера камеры зависит, естественно, от вида обрабатываемых материалов. Например, для формованных материалов транспортер является ленточным, а шлюзы имеют вид полого, закрытого с торцов цилиндра с перекидным клапаном в виде трехлопастного ротора. При обработке сыпучих материалов транспортер является, например, вибрационно-лотковым, а шлюзы имеют в своем составе заборный желоб, запредельный волновод и диэлектрический направляющий желоб.

Такая камера обеспечивает:

а) *равномерный нагрев* обрабатываемых диэлектрических материалов — даже в том случае, если они имеют высокую удельную электропроводность, низкую теплопроводность и обрабатываются в толстом слое. При этом исключаются и локальные перегревы в обрабатываемом объеме, и недогревы материалов, что позволяет, например, сохранять химический состав и гарантировать качество обрабатываемой продукции. Кроме того, при этом возможна реализация избирательного гарантированного воздействия электромагнитным полем на составляющие неоднородной среды, отличающиеся удельной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью (например, в виде сыпучей продукции и вкраплений с более высокой удельной электропроводностью и более

низкой диэлектрической проницаемостью), которые должны быть нагреты до более высокой температуры. Известно, что отношение значений удельной (объемной) плотности мощности P , диссипируемой в каждой из двух составляющих такой среды, имеющих соответствующие удельную электропроводность σ и диэлектрическую проницаемость ϵ , равняется

$$\frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{\sigma_2 \epsilon_1^2}{\sigma_1 \epsilon_2^2},$$

однако реализовать эту избирательность нагрева в каждой точке в объеме образца возможно лишь в предлагаемой камере, в объеме которой отсутствуют минимумы и максимумы электромагнитного поля;

б) *возможность обработки материалов на потоке* при безопасном уровне плотности потока мощности через шлюзы загрузки и выгрузки — как на холостом ходу, так и в установившемся рабочем режиме. При этом открываются возможности более широкого промышленного применения микроволновых нагревателей. В целом это способствует разрешению традиционной проблемы, порождаемой противоречием между необходимостью, с одной стороны, значительно увеличивать объемы обрабатываемой продукции (с целью повышения рентабельности применения микроволновых технологий) и опасностью, с другой стороны, наращивать мощности микроволновых систем поточной обработки из-за недопустимых (по санитарным нормам) фоновых излучений таких традиционных систем. Понятно, что отражения от потока продукции увеличивают фон, однако оказываются достаточными меры, подобные тем, что указывались ранее: ротор, заградительный волновод шлюза или радиозащитные уплотнения;

в) *независимость коэффициента полезного использования СВЧ-энергии от степени загрузки камеры и вида загружаемой продукции*. Поддержание КПД микроволнового оборудования на установленном разработчиком высоком уровне независимо от ритмичности и уровня загрузки, а также от однородности загружаемой продукции, приводит, прежде всего, к возможности интенсификации процесса обработки, по сравнению с традиционным, именно в случаях, когда загрузка отличается от номинала, что всегда актуально и в быту, и в условиях производства. Кроме того, это способствует ослаблению требований к системе контроля и автоматизированного управления процессом обработки продукции при сохранении высокого качества обработки и, следовательно, требуемого качества выходного продукта за счет гарантированной предсказуемости микроволнового и, следовательно, теплового воздействия на продукт в соответствии с технологическим режимом, обрабатываемым, как правило, на этапе испытания системы и ввода ее в эксплуатацию;

г) *высокую эксплуатационную надежность* микроволновой нерезонансной системы за счет отсутствия “стоячих волн” в питающих волноводах и, следовательно, за счет исключения самоперегрева и выводов из строя микроволновых генераторов и наиболее сложных, наукоемких и дорогостоящих узлов, таких

как блоки высоковольтного питания и стабилизации питающих напряжений, подаваемых на катодный электрод микроволнового генератора. Это особенно важно и потому, что наиболее часто применяемые на практике магнетронные генераторы весьма критичны к уровню их нагрузки, к уровню коэффициента “стоячей волны” в питающем волноводе, причем чем выше этот уровень, тем ниже уровень выходной мощности и выше вероятность самоперегрева генератора, следовательно, выше эксплуатационные энергозатраты — не только на обработку продукции, но и на вынужденные, значительно более частые, замены самих генераторов и блоков их питания, составляющих основную долю высокой стоимости микроволновых систем нагрева. Заметим здесь, что стандартная цена блока генерации (т. е. с учетом выпрямителя и стабилизатора) мощностью 1,0 кВт примерно равняется 1000 евро;

д) *экономию электроэнергии* за счет ее концентрации в объеме продукта, согласованной с линейными размерами образца или потока обрабатываемой продукции. Этот показатель (назовем его энергоэкономичностью новой камеры), механизмы повышения энергоэкономичности камеры нуждаются в пояснении.

Таких механизмов несколько, и почти все они ранее затрагивались.

Во-первых, микроволновый генератор работает в номинальном для него режиме “бегущей волны” в питающем волноводе, поэтому вырабатывает электромагнитные колебания максимальной полезной мощности при типовом значении потребляемой мощности, кроме того, при этом режиме энергозатраты на его самоперегрев отсутствуют.

Во-вторых, поскольку камера не является резонансной, то, независимо от уровня ее загрузки и вида загружаемой в нее продукции, ее собственная частота остается неизменной (применив балластное покрытие, получаем неограниченную практически ширину рабочей полосы частот камеры), вся энергия генераторов попадает в камеру беспрепятственно.

В-третьих, при концентрации электромагнитной энергии в объеме продукта, например, в узком угловом секторе θ , прежде всего, увеличивается плотность ρ_s потока энергии, попадающей лишь на продукт с учетом площади его поперечного сечения; эта плотность, как известно, пропорциональна квадрату электрической напряженности E^2 электромагнитного поля, падающего на обрабатываемый продукт, последнее же (т. е. E^2) пропорционально удельной (объемной) плотности мощности P^+ , нагревающей продукт с более высокой скоростью изменения его температуры dT/dt , т. е. имеем в этом случае цепочку пропорциональных (\sim) зависимостей в виде

$$\Theta^{-1} \sim \rho_s \sim E^2 \sim P^+ \sim dT/dt,$$

благоприятствующую энергоэкономичности нового микроволнового нагревателя. Кроме того, концентрация поля практически исключает его прямое попадание на стенки и, следовательно, значительно ослабляет потери на протекание поверхностных токов по стенкам камеры, что, из-за многократных переотражений в обычной, резонансной, камере может иметь значи-

тельную величину (подчеркнем, что в данном конкретном месте речь идет о традиционной камере с чистыми металлическими стенками).

Наконец, в-четвертых, утилизация энергии электромагнитного поля ослабляет зависимость потерь электромагнитной энергии от отражающих и поглощающих характеристик обрабатываемой продукции, а также зависимость потерь от толщины слоя обрабатываемого потока и от уровня влагосодержания продукта, поскольку энергия электромагнитного поля, не диссипированная в обрабатываемом материале, преобразуется в балластном покрытии в тепловую, которая снова подается (с помощью системы теплообмена) в камеру для дополнительного, в данном случае конвективного, нагрева обрабатываемого продукта. Именно указанные факторы предопределяют основную долю показателя энергоэкономичности новой камеры, представленной на рис. 2.

Следует еще раз подчеркнуть необходимость и достаточность реализации в новой камере всей совокупности принципов ее построения для получения изложенных выше преимуществ, т. е. более совершенных характеристик новой камеры. Важно также отметить, что, если хотя бы один из принципов построения новой камеры не выполняется или почти не выполняется, то одна или несколько ее характеристик могут уступать характеристикам даже традиционной микроволновой камеры. В справедливости этого утверждения нетрудно убедиться с помощью логического анализа. Это же подтверждается расчетами и

экспериментально. Именно поэтому приходится рекомендовать вполне серьезно: «Модернизировать все или ничего — третьего не дано».

В заключение отметим возможности новых систем микроволнового нагрева в стимулировании освоения технологий, ранее не существовавших. Речь идет, например, о микроволновом вспенивании гранулированных полимерных материалов, о стерилизации продукции при более низкой температуре, о получении неравновесных плазменных образований в объеме камеры и др., являющихся предметом отдельного обсуждения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны.— М.: ИЛ, 1960.
2. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи.— М.: Сов. радио, 1955.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов.— Л.: Машиностроение, 1989.
4. Калинин Л. Г. Микроволновые технологии в агропромышленном комплексе, промышленности и медицине // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. (Киев—Одесса).— 2000.— Вып. 2—3.— С. 11—15.
5. Демьянчук Б. А., Оленев Н. В. Итоги и перспективы развития технологии микроволнового нагрева диэлектрических материалов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 57—60.
6. Кингстон Г. М., Джесси Л. Б. Пробоподготовка в микроволновых печах.— М.: Мир, 1991.
7. Пат. 2126606 России. Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов // Б. А. Демьянчук, В. Е. Полищук.— 1999.
8. Пат. 34520 Украины. Спосіб мікрохвильового нагріву / Б. О. Дем'яничук, Б. Л. Бахчеван.— 2001.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Петрухин Г. Н. (под ред.). ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОТЕХНИКИ.— М.: Радио и связь, 2003.— 520 с.

Описываются различные виды электронных приборов и устройства на их основе, дается их классификация, приводятся их основные характеристики. Излагаются основы теории электрических сигналов и радиотехнических операций (усиление, генерирование, модуляция, фильтрация и т. п.).

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Проектирование и технология РЭС», «Конструирование и технология ЭВС», «Средства связи с подвижными объектами», «Информационная безопасность телекоммутиационных систем», «Комплексное обеспечение безопасности автоматизированных систем».

Учебное пособие для вузов.

НОВЫЕ КНИГИ



Урлич Ю. М., Данилин Н. С. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ ОТКРЫТОЙ ЭКОНОМИКИ.— М.: "МАКС Пресс", 2003.— 204 с.

В монографии рассмотрен комплекс проблем управления качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях предстоящего вступления России во Всемирную торговую организацию — ВТО.

Представлено поэтапное сравнение методов обеспечения качества космического приборостроения, включая сертификационные испытания в Европейском Космическом Агентстве — ESA и в испытательных центрах Росавиакосмоса.

Приведены результаты гармонизации испытательных систем Росавиакосмоса и ESA для электронных компонентов новых российских космических телекоммутиаций.

