

ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СВЧ-ЭНЕРГЕТИКИ

Радиосвязь, телевидение, радиолокация, радионавигация, телеизмерения, телеуправление в условиях Земли и в космическом пространстве — это далеко не полный перечень областей радиоэлектроники, которые получили развитие в связи с использованием электромагнитного излучения диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) *. А для радиоастрономии и радиоспектроскопии СВЧ-техника вообще явилась основой их возникновения.

Не приводя других примеров, можно считать обоснованным мнение о весьма важной роли СВЧ-диапазона для технического прогресса в настоящем и будущем. Такое утверждение отнюдь не противоречит общей концепции развития науки и техники в эпоху информатики. Более того, названные выше области радиоэлектроники, решающие задачи получения, передачи и преобразования информации для ее конкретного использования, можно с полным правом рассматривать не только как начальный этап эпохи информатики, но в некотором смысле и как ее фундамент. Многие основные положения информатики были сформулированы и развиты в связи с решением теоретических и технических проблем радиолокации. Это же касается и важнейших вопросов передачи и преобразования информации, возникших и решавшихся в связи с задачами радионавигации, телевидения, телеуправления и т. д. Таким образом, вклад теории и техники сверхвысоких частот в информатику неоспорим.

Наряду с этим следует отдать должное и энергетическим применениям электромагнитного излучения, которые зачастую тесно связаны с информационными. Эта связь наблюдается на протяжении всей истории использования электричества.

Первым техническим устройством, работавшим на постоянном токе, был электрический телеграфный аппарат — устройство информационного назначения. Затем последовало использование энергии постоянного тока для

* Условимся считать этот термин синонимом международного термина "микроволны", не подразделяя диапазон $3 \cdot 10^8$ — $3 \cdot 10^{11}$ Гц на ультравысокие, сверхвысокие и крайне высокие частоты. Это можно мотивировать единством физических процессов, сходством конструкций технических средств, а также удобством и краткостью изложения.

нагрева (в осветительных и сварочных приборах), для производства механической работы (электродвигатели), осуществления химических реакций (электролиз) и т. д. Аналогично происходило и развитие применений переменного тока, вначале также использовавшегося в целях связи. Но по мере создания генераторов большой мощности главными применениями переменного тока стали энергетические.

Следующий виток спирали развития связан с токами высокой частоты. Здесь тоже решение задач энергетики (установки токов высокой частоты для нагрева и поверхностного упрочнения стальных деталей и инструмента, индукционной плавки металлов, нагрева и сушки диэлектрических материалов) стало возможным лишь после создания мощных генераторов.

В развитии радиотехники наблюдалась вполне четкая тенденция повышения рабочей частоты — перехода от длинных волн к более коротким, затем ультракоротким, наконец, к освоению диапазона СВЧ (дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны). Волны от длинных до коротких использовались и используются лишь для целей связи. Об энергетических применениях здесь речь не идет в силу ряда причин, которые будут отмечены в дальнейшем. Ультракороткие волны, наряду с применениями в области связи, радиовещания и телевидения, могут служить для нагрева вещества (при прессовании термопластов), а также для теплового воздействия на ткани человеческого организма в терапевтических целях.

Переходя к диапазону СВЧ, подчеркнем, прежде всего, то, что энергетические применения подразумевают наличие источника (генератора), линии передачи энергии от него к потребителю, а также объекта, воспринимающего энергию, где для практических целей производится преобразование энергии электромагнитного поля (ЭМП) в какой-либо другой вид энергии (механическую, тепловую, химическую). Из литературы, где освещаются эти вопросы, следует указать [1].

Создание генератора радиоизлучения высокой мощности в настоящее время не представляет особых трудностей. В связи с требованиями радиолокации и телеуправления на больших расстояниях, включая космические, были разработаны мощные и сверхмощные генераторы на электровакуумных приборах магнетронного типа. Необходимость в мощных приборах непрерывного генерирования возникла вначале при создании генераторов радиопомех. Дальнейшее решение задач СВЧ-энергетики стимулировало разработку приборов еще большего уровня мощности, и на сегодня многорезонаторные клистроны и приборы магнетронного типа не только обеспечивают требования, предъявляемые к уровню мощности, но и имеют значительные резервы. И это при КПД, достигающих у клистронов 75 %, а у приборов магнетронного типа еще более высоких. Основные трудности возникают в связи

с задачей теплоотвода, которая даже при столь значительных КПД достаточно сложна. Согласно мнению, высказанному П. Л. Капицей, ограничивающим фактором для сверхмощного генератора СВЧ является только необходимость обеспечения соответствующего источника электропитания прибора.

Теперь обратимся к вопросам, связанным с передачей СВЧ-энергии от генератора к потребителю. Специфика требований, предъявляемых к линии передачи, зависит от конкретного назначения всей системы. В технологических установках тракт, связывающий генератор (обычно оформленный в виде модуля, включающего источник электропитания) и нагрузку, имеет малую длину. Здесь используется обычный коаксиал или волновод.

Наличие мощных генераторов с высоким КПД обеспечивает эффективное преобразование энергии постоянного тока в сверхвысокочастотную. Поскольку обратное преобразование — детектирование (выпрямление) — позволяет получить постоянный электрический ток, открывается возможность замены линии электропередачи СВЧ-трактом. В [2] рассматривается такой тракт на волноводе круглого сечения с волной H_{01} , обеспечивающей минимальные потери. Но трудности возбуждения именно данного типа волны при отсутствии других (паразитных) типов волн, а также необходимость в преобразователях на входе и выходе тракта вызывают сомнения в перспективности этого варианта. Делается вывод о том, что он если и применим, то в случаях, когда требуется непосредственно использовать энергию СВЧ без преобразования в электрический ток. Однако здесь вряд ли потребуются длинные тракты.

Задача может решаться и с помощью прямоугольного волновода увеличенного сечения, где при условии существования волны только основного типа (H_{10}) можно снять ряд ограничений. Уменьшения затухания можно достичь изготовлением волновода с внутренней поверхностью из сверхпроводника (тем более высокотемпературного), что потребует применения криогенной системы. Существенные изменения внесло бы создание сверхпроводников, работающих при комнатных температурах, но тогда конкурентоспособными оказались бы проводные линии электропередачи.

Существуют проекты, где высокоскоростное транспортное средство должно перемещаться внутри трубы, являющейся направляющей и одновременно волноводом, обеспечивающим энергопитание двигателя. Принципиально такая идея осуществима, но из-за многочисленных технических трудностей будет реализовываться, вероятно, лишь в случае существенных экономических преимуществ по сравнению с другими вариантами.

Совершенно иная ситуация возникает, когда выполнение линии электропередачи в виде проводящей структуры затруднительно (переход через широкую водную преграду) или вообще невозможно. Здесь эффективным

может оказаться использование СВЧ-луча, связывающего, например, космические корабли между собой либо с Землей. Проблема была поставлена еще в 60-е гг. и разрабатывалась достаточно детально как теоретически, так и путем проведения модельных испытаний. По этому поводу опубликовано много оригинальных работ, а также обзоров (например [3]).

Особенно мощным стимулом для данных исследований явилась идея солнечных космических электростанций (СКЭС) [4], которую предполагалось осуществить уже в 90-х гг. Грандиозные проекты предусматривали создание геостационарных спутников с находящимися там солнечными батареями, а также питаемыми от них системами клистронных или амплитронных генераторов. Последние должны были располагаться на элементах фазированной антенной решетки, создающей направленный луч, передающий СВЧ-энергию. Соответственно на Земле должны быть приемные антенны с выпрямляющими устройствами (ректенны), осуществляющими преобразование СВЧ в постоянный ток. Экономические расчеты показывают, что СКЭС могли бы существенно дополнить скудеющие энергоресурсы Земли за счет использования даровой энергии солнечного излучения.

Экспериментально опробована передача энергии СВЧ-лучом от одной наземной антенны к другой, а также на парящую в воздухе модель вертолета с винтом, вращаемым электродвигателем. Высказан ряд интересных предложений по использованию такого вида энергоснабжения для поднятых над Землей телевизионных ретрансляторов и других объектов. Таким образом, возможность передачи энергии СВЧ-лучом доказана, а целесообразность ее реального использования, вероятно, подтвердится в недалеком будущем, хотя технические трудности огромны. Но в случае СКЭС они вряд ли уменьшатся и при альтернативном варианте — передаче энергии лазерным лучом [3].

Возвращаясь от проблем “большой” энергетики и космических масштабов к земным, перейдем к вопросам использования СВЧ-энергии, доставленной потребителю. Здесь, в “нагрузке”, полезный эффект обязательно связан с преобразованием в какой-либо другой вид энергии.

Давление электромагнитных волн (пондеромоторный эффект) используется в измерителях проходящей мощности. Осуществлено также несколько вариантов электродвигателей, где СВЧ-энергия непосредственно (без выпрямления) преобразуется в механическую работу. Но с начала 60-х гг. до настоящего времени переход от весьма привлекательных идей и опытов на миниатюрных моделях к практически полезным и энергетически выгодным конструкциям не произошел.

К устройствам, преобразующим энергию ЭМП СВЧ в движение, относятся линейные и циклические (микротроны) ускорители заряженных частиц, используемые в ядерной физике, медицине и ряде других областей

применения. Однако связанные с этим проблемы весьма специфичны и достаточно обширны, поэтому в настоящей работе рассматриваться не будут.

Круг вопросов, касающихся преобразования СВЧ-энергии в тепловую и химическую, с достаточным основанием может быть отнесен к области технологии. Под термином “технология” (по предложению В. Ф. Дорфмана [5]) подразумевается “организация естественных процессов, направленная на создание искусственных объектов”. Такое определение представляется обобщающим: и “совокупность способов и приемов добычи, обработки сырья, материалов, искусства реализации промышленных процессов”, и “набор закономерностей, заимствованных из разных наук с целью оптимизации производства”, и дальнейшее развитие и распространение этих понятий на сферу информатики.

Технологические процессы, осуществляемые с помощью СВЧ-энергии, являются не “формообразующими”, а “материаловедческими”, изменяющими свойства материала — вещества, на которое воздействует электромагнитное поле. Теоретическое рассмотрение этого процесса методами электродинамики СВЧ возможно, но затруднения возникают в связи с недостаточной изученностью электрофизических свойств веществ и их изменений по разным причинам. Кроме того, необходимо учитывать неоднородность и анизотропию обрабатываемого материала по его объему, соотношение размеров объекта и длины волны, сложную структуру ЭМП (обычно образуемую суперпозицией полей многих типов волн или колебаний) и т. д. Поэтому теория в состоянии дать лишь самые общие, идеализированные выводы, далеко не всегда коррелирующие с практическими результатами.

Значительный интерес представляют тепловые эффекты при взаимодействии ЭМП СВЧ с неидеальными диэлектриками. Здесь нередко применяется обобщающий термин “СВЧ-нагрев” ([1, 7] со ссылками на многочисленные оригинальные работы), касающийся комплекса вопросов от диэлектрических свойств материи до использования тепловых эффектов в практических целях.

Анализ показывает, что переменное электрическое поле в связи с явлением упругой дипольной поляризации производит переориентацию молекул вещества, причем потери при этом процессе проявляются в виде нагрева вещества. Мощность, выделяемая в единицу времени,

$$P = 0,566 \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^3$$

Из этого выражения следует, что она зависит от электрофизических свойств вещества (характеризуемых диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь), от напряженности электрического поля и частоты его изменения. Приведенная формула показывает, что сильнее

будут нагреваться вещества с более высокими ε' и $\operatorname{tg} \delta$. С другой стороны, отсюда видны и условия обеспечения минимального нагрева. Выделяемая в обрабатываемом объекте энергия растет пропорционально квадрату напряженности электрического поля, пока не будет ограничена электрическим пробоем.

Обратим внимание на увеличение эффективности преобразования энергии ЭМП в тепловую с ростом частоты. Но на более высоких частотах должны уменьшаться геометрические размеры пространства, где осуществляется воздействие ЭМП на объект (реактора-волновода или объемного резонатора). Это неприемлемо для промышленных установок, в которых приходится использовать наиболее низкочастотный участок СВЧ-диапазона. Вообще же для технологических применений разрешается использование только пяти очень узких поддиапазонов СВЧ, остальные частоты отданы связи, телевидению, радиолокации. Такое распределение, ущемляющее интересы СВЧ-энергетики, было произведено в период, когда она еще не получила широкого распространения и должного признания.

Из технологических применений СВЧ-энергии наибольшее относится к обработке пищевых продуктов, производимой как в бытовых микроволновых печах, так и в крупных промышленных установках. Эти вопросы достаточно подробно освещены в [8, 9] и большом количестве других публикаций. Положительный эффект достигается благодаря значительной глубине проникновения СВЧ-поля в продукт, что обеспечивает быстроту и равномерность нагрева. Размораживание, разогрев готовых блюд, выпечка, жаренье и другие кулинарные операции осуществляются намного эффективнее, чем при традиционных способах, основанных не на генерации тепла внутри, а на подведении его к поверхности объекта.

Эти же особенности СВЧ-нагрева позволяют успешно применять его для сушки древесины, предварительного обжига фарфоро-фаянсовых изделий. И если при выпечке теста или приготовлении котлет отсутствие привычной корочки может рассматриваться как недостаток (устраняемый дополнительным инфракрасным нагревом), то здесь объемный нагрев уменьшает повреждение поверхностного слоя выходящими изнутри объекта парами воды. При помощи СВЧ удобно осуществлять также сушку окрашенных поверхностей, мест склеивания и т. п.

Во всех перечисленных выше случаях в той или иной мере используется зависимость степени нагрева от диэлектрических свойств вещества. Так, в кулинарии это позволяет экономить энергию, расходуя ее только на нагрев продукта, а не посуды, изготавливаемой из стекла, фарфора, бумаги — радиопрозрачных, а значит, и не нагревающихся в поле СВЧ материалов.

Аналогично нагревается и сушится краска или клей, а не материал, на который они нанесены.

В связи с указанными обстоятельствами необходимо знать электрофизические свойства обрабатываемых при помощи СВЧ материалов и их изменения в процессе обработки, чтобы избежать нежелательных эффектов и использовать полезные.

Приведем взятые из нашей практики некоторые примеры того, что происходит при СВЧ-обработке материалов, неоднородных по объему, и как эти явления могут быть нейтрализованы или использованы.

При размораживании (дефростации) наблюдается реструктуризация кристаллов льда (примерно при -40°C), что приводит к разрыву содержащих воду тканей. На этом эффекте основано изготовление рыбной муки, используемой как удобрение. В то же время при размораживании консервированной глубоким охлаждением крови повреждение эритроцитов значительно ухудшает ее свойства. Чтобы избежать этого, было предложено [10, 11] начинать процесс, подвергнув кювету с кровью высокому давлению (около 2200 атм). При этом кровь, охлажденная до температуры жидкого азота, переходит в жидкое состояние. Далее осуществляется СВЧ-нагрев с постепенным снятием давления, в результате чего опасной рекристаллизации льда удастся избежать, и свойства крови не нарушаются. Данный пример демонстрирует целесообразность комбинированного воздействия на объект с учетом его специфики.

СВЧ-нагревом можно во много раз сократить время изготовления бетонных изделий. Еще большее ускорение твердения бетонных смесей достигается введением в состав кристаллогидрата, например $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [12]. Выделяющаяся под действием СВЧ кристаллизационная вода не испаряется, а идет на гидратацию цемента, в связи с чем бетон делается из сухой смеси, и энергия на испарение воды не тратится. Выбор соответствующей солевой добавки позволяет повысить прочность и влагостойкость бетона; меняя скорость нагрева, можно изготовить пористый бетон.

Весьма эффективно обезвоживание (дегидратация) химических реактивов, например изоамилового спирта [13]. Процесс обезвоживания в сравнении с традиционными методами ускоряется в десятки раз. При этом характерно, что испаряется не спирт (обладающий меньшими диэлектрическими потерями), а вода. Подобные технологические процессы требуют глубокого изучения электрофизических свойств и их изменения в процессе СВЧ-обработки вещества.

Значительный интерес представляют термомеханические эффекты, проявляющиеся при воздействии СВЧ на неоднородные материалы. Локальный нагрев и тепловое расширение отдельных областей может привести к разрушению материала, раскалыванию камня, каменного угля, бетонных плит.

Этот же принцип используется для дробления зерна, семян подсолнечника, бобов какао и кофе. Некоторые другие аспекты термомеханического воздействия будут отмечены при рассмотрении медико-биологических и микробиологических применений СВЧ-энергии [14].

Исключительные возможности представляют технологические процессы, использующие химические преобразования в результате действия СВЧ. Так, достаточно хорошо исследована и применяется полимеризация при изготовлении изделий из пенополиуретана, стеклопластика на основе эпоксидных смол, при вулканизации резины и т. п. Применение СВЧ-облучения оказывает каталитическое действие или усиливает действие других катализаторов, ускоряя реакцию и улучшая качество продукта.

Соответствующим выбором частоты можно вызвать резонансные эффекты, связанные с возбуждением колебательных или колебательно-вращательных движений атомов, атомных групп в молекулах, молекул и молекулярных структур. Данное направление, открывающее возможности осуществления реакций получения химических продуктов с особыми свойствами, не идущих в других условиях, еще очень мало разработано.

Очень перспективно использование в химии плазменных реакций в условиях сверхвысокочастотного безэлектродного разряда. Регулируя состав и давление парообразных веществ в реакторе (объемном резонаторе, возбуждаемом мощным генератором), а также частоту и напряженность СВЧ-поля, можно обеспечить условия для взаимодействия присутствующих в разряде молекул, атомов, ионов, электронов, свободных радикалов. Таким образом удалось осуществить синтез на основе реакций атом-газ многих органических соединений, изготавливать необходимые в микроэлектронике пленки и покрытия из различных материалов, получать при взаимодействии газов с металлическими порошками карбиды, сульфиды, нитриды и другие соединения.

Чрезвычайно обнадуживает использование биологических, микробиологических и биохимических эффектов, обусловленных воздействием СВЧ-поля. В диатермии (нагревание тканей тела в лечебных целях) переход от высоких частот к сверхвысоким позволяет фокусировать излучение в определенных областях. При этом исключительно сложной является необходимость учета различного воздействия поля на неоднородные по свойствам ткани, чтобы не вызвать необратимых повреждений и других вредных последствий. Некоторые органы и ткани (глаза, почки, семенники и др.) из-за отсутствия или слабого кровообращения, а следовательно, и плохого теплоотвода особенно уязвимы. Но по этой же причине можно подавлять деятельность клеток злокачественных опухолей, нагреваемых сильнее, чем окружающие ткани.

Неоднородность диэлектрических свойств по объему органов и тканей, предназначенных для трансплантации, существенно затрудняет использование СВЧ-нагрева при размораживании этих объектов, консервированных для длительного хранения методом глубокого охлаждения. С целью уменьшения трудностей возможно использование более низких частот, устройств с бегущей волной, а также прерывистого (импульсного) облучений для выравнивания температуры отдельных участков объекта за счет теплопроводности.

СВЧ-поле воздействует на микрофлору, что используется при пастеризации соков, молочных продуктов, герметически упакованных хлебобулочных и кондитерских изделий. Стерилизация, то есть полное уничтожение микроорганизмов, достигаемая нагревом до более высоких температур, применяется и для пищевых продуктов, и для медицинского инструмента. Аналогичным образом может производиться дезинсекция — уничтожение насекомых, проникших в продукты растительного происхождения (зерно, крупу, муку, чай, табак). Успешно уничтожается домовая грибок в древесине и кирпичной кладке, насекомые, повреждающие мебель.

Описанные технологические процессы основаны на тепловых эффектах. Однако имеются сведения и о нетепловом (специфическом) действии СВЧ-облучения [15]. Например, тесто и клейстер из муки или крахмала, обработанные СВЧ, обладают повышенной вязкостью и значительно дольше пригодны к употреблению. Это объясняется биохимическими процессами — инактивацией фермента амилазы, денатурацией клейковины, модификацией белка, приводящей к большему поглощению и связыванию воды.

Имеются некоторые основания трактовать “специфическое” действие СВЧ как тепловое действие, проявляющееся в микроскопических “деталях” клеточной структуры. Но, пожалуй, более обоснованно объяснение этих эффектов селективным нетепловым действием излучения на биомембраны и примембранные слои и резонансными явлениями [16]. Последние имеют место на дискретных частотах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн и в зависимости от интенсивности и модуляционно-временных параметров могут оказывать как нормализующее, так и неблагоприятное действие на отдельные органы и организм в целом [17].

Итак, некоторые направления СВЧ-энергетики развиваются по линии крупномасштабных приложений, целесообразность и экономическая эффективность которых уже достаточно ясны, но реализация требует огромных средств и преодоления серьезных технических трудностей. Осуществляется промышленное внедрение известных и разработка новых технологических процессов, основанных на использовании СВЧ-энергии. Одновременно ведутся углубленные теоретические и экспериментальные исследования, требующие совместных усилий ученых различных специальностей, ранее не ощу-

щавших необходимости в кооперации. СВЧ-техника становится незаменимым инструментом для возникших относительно недавно и интенсивно развивающихся наук "межотраслевого" характера, таких, как биофизика, биохимия и т. п. Наконец, делаются успешные попытки выяснения причин и механизмов ряда чрезвычайно сложных, в том числе и новооткрытых явлений, вносящие важнейший вклад в решение общей проблемы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.

В ы в о д ы:

1. СВЧ-энергетика — область радиоэлектроники, тесно связанная с другими областями науки и техники, имеющая быстро расширяющийся круг практических применений и в связи с этим несомненные перспективы дальнейшего развития.

2. Современные генераторы обеспечивают получение на частотах СВЧ-диапазона любых, необходимых для практических целей, уровней мощности.

3. Разработаны и испытаны эффективные системы передачи СВЧ-энергии от генератора к потребителю как небольшой протяженности (волноводы), так и космических масштабов (направленным лучом). СВЧ-луч способен обеспечить высокую экономическую эффективность передачи энергии с солнечных космических электростанций на Землю и между космическими объектами. Однако при этом конкурентоспособным является и лазерный луч.

4. Наиболее разработанными и внедренными являются технологические процессы и устройства, использующие тепловые эффекты для обработки пищевых продуктов. Наряду с этим СВЧ-технологии могут успешно применяться в плазменной химии, горнодобывающей промышленности и ряде других областей техники.

5. Доказана целесообразность использования СВЧ для получения разнообразных биологических, микробиологических и биохимических эффектов и ряда медицинских применений. Эту сферу приложения СВЧ-энергетики следует рассматривать как исключительно перспективную, но требующую дальнейшего глубокого изучения особенностей действия СВЧ на биологические объекты.

6. В последнее время особое внимание привлекают нетепловые (специфические) эффекты в результате действия СВЧ-излучения малых мощностей, а также резонансные явления. Они представляют собой своеобразную "нижнюю границу" динамического диапазона, где СВЧ-энергетика смыкается с информатикой.

Л и т е р а т у р а: 1. СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса.— М., 1971.— Т. 1.— 464 с.; Т. 2.— 272 с.; Т. 3.— 248 с. 2. *Тиходеев Н. Н.* Передача электроэнергии сегодня и завтра.— Л., 1975.— 272 с. 3. *Нейлос Э. Дж.* Новые разработки в области направленной передачи электромагнитной энергии // ТИИЭИР.— 1978.— Т. 66.— № 3.— С. 5—22. 4. *Ванке В. А., Лопухин В. М., Саввин В. Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // УФН.— 1977.— Т. 123.— Вып. 4.— С. 633—655. 5. *Дорфман В. Ф.* Научные основы развития технологии // Вопр. философии.— 1985.— № 5.— С. 153—161. 6. *Терещенко А. И.* Воздействие СВЧ-энергии на вещество // Радиотехника.— 1978.— Т. 32.— № 1.— С. 4—15. 7. *Пюшнер Г.* Нагрев энергией сверхвысоких частот.— М., 1968.— 312 с. 8. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Физические методы обработки пищевых продуктов.— М., 1974.— 584 с. 9. *Рогов И. А., Некрутман С. В.* Сверхвысоко-частотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов.— М., 1976.— 212 с. 10. А. с. № 542500, СССР. М. Кл². А 23В 4/06. Способ размораживания биологических объектов / *А. И. Терещенко, Н. С. Пушкарь, В. Л. Мироненко, Ю. П. Тимошенко.*— Б. И.,— 1977.— № 2. 11. *Tereshchenko A. I.* Microwave field influence on some chemical and biological objects // Proc. of 8-th European Microwave Conference.— Paris.— 1978.— P. 243—250. 12. *Кононов А. Б., Контарь А. А., Терещенко А. И.* Некоторые возможности создания быстротвердеющих бетонных смесей с помощью СВЧ-энергии // ЭОМ.— 1977.— № 6.— С. 50—53. 14. *Терещенко А. И.* Работает СВЧ.— М., 1977.— 64 с. 15. *Пресман С. А.* Электромагнитные поля и живая природа.— М., 1968.— 288 с. 16. *Исмаилов Э. III.* Биофизическое действие СВЧ-излучений.— М., 1987.— 144 с. 17. *Искин В. Д.* Биологические эффекты миллиметровых волн и корреляционный метод их обнаружения.— Харьков, 1990.— 244 с.