**Государственный Комитет Российской Федерации**

**По Высшему Образованию**

**Государственная Академия Управления имени Серго Орджоникидзе**

**Курсовая работа**

по курсу

**Естественно-научные основы современных технологий**

**Кафедра техники и технологии в машиностроении**

на тему

***Энергетика СВЧ в народном хозяйстве:***

***Применение СВЧ - нагрева в пищевой промышленности.***

Выполнил(а):

студент(ка) курса группы

факультета ИМ МАШ

.

Проверил: .

Москва, 1995 год.

**Задание**

на курсовой проект по дисциплине

**«Естественно-научные основы современных технологий»**

1. Студенту курса группы .

.

2. Тема проекта .

.

3. В проекте привести .

.

.

.

4. В проекте дать расчет .

.

.

.

5. Плакатный материал два листа формата **A1** ***(594x841 мм)*** .

.

6. Срок сдачи студентом законченного проекта .

.

Руководитель курсового проекта .

.

**Введение**

Предлагаемая курсовая работа ставит задачу дать физические представления о работе электронных приборов СВЧ и их применении в различных отраслях народного хозяйства, в частности, в пищевой промышленности, а также дать расчетные данные по волновым приборам, нагреву и сушки материалов с помощью СВЧ энергии.

Если в ***40-х — 50-х*** годах электроника СВЧ в основном служила потребностям радиолокации и связи, то в последние годы она все шире применяется во многих отраслях хозяйства, ускоряя научно-технический прогресс, повышая эффективность и качество производства.

Появлению новых областей применения мощной СВЧ электроники способствует ряд специфических свойств электромагнитных колебаний этого диапазона частот, которые позволяют создать неосуществимые ранее технологические процессы или значительно их улучшить. К ним относятся, например: создание сверхчистой плазмы с широким интервалом температур; возможность серийного изготовления простых по конструкции и удобных в эксплуатации мощных генераторов СВЧ энергии, с помощью которых могут осуществляться полимеризация и упрочнение различных изделий и материалов, в частности шин и лакокрасочных покрытий, упрочнение металлов, стабилизация параметров полупроводников и т.д.; все более широкое применение получают нагрев и сушка с помощью СВЧ различных материалов, в частности приготовление пищи, пастеризация молока и т.п.

Познакомить с возможностями СВЧ электроники в области народного хозяйства — одна из главных задач этой работы. При работе были использованы материалы книги **Ю. Н. Пчельникова** и **В. Т. Свиридова** *Электроника сверхвысоких частот,* научно-технических статей, опубликованных в журналах **«Электронная техника», «Радио»** и др.

**Промышленные диапазоны электромагнитных колебаний**

Для радиоэлектронных устройств, предназначенных для использования в промышленности и сельском хозяйстве (т.е. народном хозяйстве), выделены диапазоны частот, приведенные в **таблице 1**.

Таблица 1.

**Промышленные диапазоны электромагнитных колебаний**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***f, МГц*** | Страны | Основные применения | Диапазоны частот |
| ***0,06 - 0,08*** | Россия | Индукционный нагрев | НЧ |
| ***13,56±0,00678*** | Все страны |  | ВЧ |
| ***27,16±0,16*** | Все страны |  | ВЧ |
| ***40,68±0,02*** | Все страны |  | ОВЧ |
| ***433,92±0,87*** | Австрия, ФРГ, Португалия |  | УВЧ |
| ***866*** | Англия |  | УВЧ |
| ***915±25*** | Все страны, кроме Англии, Испании |  | УВЧ |
| ***2375±50*** | Все социалистические страны | СВЧ нагрев | УВЧ |
| ***2450±50*** | Все страны, кроме социалистических стан |  | УВЧ |
| ***5800±75*** | Все страны |  | СВЧ |
| ***22125±125*** | Все страны |  | СВЧ |

**Особенности нагрева диэлектриков в диапазонах УВЧ и СВЧ**

В подавляющем большинстве случаев нагрев каких — либо физических тел производится путем передачи тепла снаружи во внутрь за счет теплопроводности.

На СВЧ при рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ энергии в тепловую, можно получить относительно равномерное выделение тепла по объему тела. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорционально частоте колебаний и квадрату напряженности электрического поля. При этом следует отметить простоту подачи СВЧ энергии практически к любому участку нагреваемого тела.

Важное преимущество СВЧ нагрева — тепловая безынерционность, т.е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. Отсюда высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость.

Достоинством СВЧ нагрева является также принципиально высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел. Теоретическое значение этого КПД близко к ***100%***. Тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными, что создает комфортные условия для обслуживающего персонала.

Важным преимуществом СВЧ нагрева является возможность осуществления и практического применения новых необычных видов нагрева, например избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося.

*Избирательный нагрев* основан на зависимости потерь в диэлектрике от длины волны, т.е. зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ****** как функции длины волны ****** . При этом в многокомпонентной смеси диэлектриков будут нагреваться только те части, где высокий ***tg ***.

*Равномерный нагрев*. Обычно передача тепла осуществляется за счет конвекции, теплопроводности и излучения. Отсюда неизбежен температурный градиент (перепад) от поверхности в глубину материала, причем тем больший, чем меньше теплопроводность. Уменьшить или почти устранить большой градиент температур можно за счет увеличения времени обработки. Во многих случаях только за счет медленного нагрева удается избежать перегрева поверхностных слоев обрабатываемого материала. Примерами таких процессов является обжиг керамики, получение полимерных соединений и т.п. С помощью СВЧ энергии можно не только равномерно нагревать диэлектрик по его объему, но и получать по желанию любое заданное распределение температур. Поэтому при СВЧ нагреве открываются возможности многократного ускорения ряда технологических процессов.

*Сверхчистый нагрев*. Если при нагреве газовым пламенем, а также с помощью дуговых горелок происходит загрязнение материалов, то СВЧ энергию можно подводить к обрабатываемому материалу через защитные оболочки их твердых диэлектриков с малыми потерями. В результате загрязнения практически полностью устраняются. Кроме того, помещая нагреваемый материал в откачанный объем или инертный газ, можно устранить окисление его поверхности. Загрязнения от диэлектрика, через который подводится СВЧ энергия, весьма малы, т.к. в случае малых потерь даже при пропускании большой СВЧ мощности этот диэлектрик остается практически холодным.

*Саморегулирующийся нагрев*. При нагреве для целей сушки качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как, например, дерево, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери СВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность.

**Получение СВЧ энергии большой мощности**

Чтобы применение СВЧ энергии было экономически оправдано, необходимо выбирать такие СВЧ приборы, которые имели бы в сочетании следующие характеристики: высокий КПД преобразования энергии промышленной частоты в СВЧ энергию (не менее ***50%***, а лучше ***70% — 90%***) ; высокий уровень выходной мощности в непрерывном режиме (около ***1 кВт*** и более); простые и дешевые источники питания (желательно питать СВЧ прибор, непосредственно подключая его к вторичной обмотке силового трансформатора промышленной электросети без выпрямителей и фильтров); простота конструкции, надежность, большой срок службы (не менее ***2 — 5*** тысяч часов); возможность эффективной работы при переменной нагрузке.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют магнетроны, пролетные многорезонаторные клистроны и амплитроны.

Наибольшее распространение в качестве источника СВЧ энергии получили магнетроны. Относительная простота конструкции малые размеры и высокий КПД делают их наиболее пригодными для использования во многих областях СВЧ энергетики. Опыт применения магнетронов и исследования их свойств привели к тому, что в настоящее время они почти исключительно применяются в промышленных СВЧ установках. Однако в перспективе им могут составить серьезную конкуренцию пролетные многорезонаторные клистроны. В начале семидесятых годов благодаря оптимизации параметров с помощью ЭВМ был получен КПД пролетных клистронов выше ***70%***. Такой высокий КПД в сочетании с электростатической фокусировкой и непосредственным питанием через повышающий трансформатор от сети промышленной частоты позволит заменить магнетроны в ряде применений.

Амплитроны имеют КПД ***60% — 70%***, а иногда и ***80%***. Однако принципиально амплитроны схожи с магнетронами и имеют в основном те же недостатки: катод находится в пространстве взаимодействия, отработанные электроны бомбардируют волноведущую систему и т.д.

Рассмотрим подробнее работу магнетрона непрерывного действия в качестве источника СВЧ энергии для промышленного применения.

**Применение последовательного электромагнита**. Создание магнитного поля магнетрона с помощью электромагнита, включенного последовательно в анодную цепь прибора, позволяет упростить схему питания, понизить стоимость установки, повысить устойчивость работы магнетрона при колебаниях напряжения в сети и изменениях параметров высокочастотной нагрузки (ее модуля и фазы). Кроме того, применение последовательного электромагнита открывает возможность простой регулировки выходной мощности в довольно широких пределах.

Упрощение схемы питания достигается рациональным выбором параметров электромагнита, в результате чего магнетрон может работать при непосредственном включении в последовательно соединенных анодной цепи магнетрона и обмотки электромагнита в цепь вторичной обмотки силового трансформатора по схеме двухполупериодного выпрямления. Если индуктивность электромагнита недостаточна, то для сглаживания пульсаций анодного тока дополнительно последовательно с электромагнитом может быть включен дроссель. Суммарная индуктивность должна составлять ***10 — 30 Гн***. Эта схема наиболее проста и удобна, когда в установке работают два магнетрона, а через обмотки электромагнита протекает слегка пульсирующий постоянный анодный ток поочередно генерирующих магнетронов (**рис. 1**). Переменная составляющая анодного тока может быть в достаточной степени уменьшена за счет увеличения индуктивности дросселя и электромагнитов.



**Рис. 1**. Схема безвыпрямительного питания магнетронов с последовательными электромагнитами от сети переменного тока промышленной частоты:

***1 — магнетрон; 2 — электромагнит; 3 — высоковольтный трансформатор***.

При работе двух магнетронов открываются новые возможности для улучшения использования СВЧ энергии. Так, например, если генерируемые частоты несколько отличны друг от друга, то можно получить более равномерное распределение плотности СВЧ энергии по объему, в котором происходит тот или иной технологический процесс.

Рассмотренная схема питания используется в СВЧ печах, разработанных отечественной промышленностью.

В качестве примера приведем характеристики магнетрона для промышленного применения типа ***M571***. Его основные параметры следующие: рабочая частота ***2375 ±50 МГц***; выходная мощность ***2,5 кВт*** в непрерывном режиме при ***Kстv < 1,1***; анодное напряжение ***3,6 кВт***; анодный ток ***1,1 A***; мощность накала ***300 Вт***; магнитная индукция ***0,135 T***; ***Kстv*** нагрузки, допустимой в любой фазе, при питании от стабилизированного выпрямителя до ***3,5***.

Рабочими характеристиками магнетронов называют зависимости анодного напряжения ***Uа*** и выходной мощности ***Pвых*** от анодного тока ***Iа***. Зависимость ***Uа=f(Iа)*** называют также вольт-амперной характеристикой.

Если сравнить рабочие характеристики магнетрона ***М571*** при работе с постоянным магнитом и с последовательным электромагнитом при питании его от выпрямителя со сглаживающим фильтром, то можно отметить следующее. Применение электромагнита позволяет более плавно регулировать выходную мощность, меняя ***Uа***, причем КПД ****** остается достаточно высоким (более ***46%***) при изменении ***Pвых*** от ***2,5*** (*** = 60%***) до ***0,5 кВт*** (*** = 46%***).

Нагрузочными характеристиками магнетрона называют зависимости ***Iа*** и ***Pвых*** от модуля и фазы комплексной нагрузки. Сравнение нагрузочных характеристик при тех же условиях, при которых рассматривались рабочие характеристики, показывает, что применение последовательного электромагнита позволило существенно уменьшить изменение анодного тока и выходной мощности при изменении фазы нагрузки. А это, в свою очередь, не только улучшает использование СВЧ энергии, но и положительно сказывается на долговечности магнетрона.

Рабочая и нагрузочная характеристики при безвыпрямительном питании магнетрона с применением дросселя и последовательного электромагнита по схеме, изображенной на **рис. 1**, практически не отличаются от характеристик магнетрона при строго постоянном анодном напряжении.

**Уменьшение пульсаций магнитного поля**. Современные магнетроны имеют металлокерамическую конструкцию, причем стенки корпуса анодного блока, выполненные из меди, достигают по толщине ***9 — 10 мм***. Эта особенность конструкции оказалась весьма полезной для уменьшения пульсаций магнитного поля в пространстве взаимодействия за счет поверхностного эффекта на частоте ***100 Гц***, т.е. на частоте пульсаций в однофазных двухпериодных схемах выпрямления. Толщина поверхностного слоя для меди на частоте ***100 Гц  = 6,7 мм***. При этом переменная составляющая магнитного поля в пространстве взаимодействия ***H2*** будет составлять всего лишь ***0,2*** переменной составляющей магнитного поля вне корпуса анодного блока ***H1(H2/H1=e 0,2)***.



Поэтому если амплитуда пульсаций анодного тока ***20%*** среднего значения, то амплитуда пульсаций напряженности магнитного поля в пространстве взаимодействия для магнетрона ***M571*** — всего ***2% — 3%***. Это, в свою очередь, позволяет считать магнитное поле в пространстве взаимодействия постоянным, и требования к стабилизации источников питания для создания постоянного магнитного поля могут быть существенно снижены.

**Сравнение электромагнитов и постоянных магнитов**. Современные конструкции электромагнитов по размеру и массе не превышают постоянных магнитов с теми же параметрами. Электромагнит для магнетрона ***M571*** является малогабаритным (***210x130x110 мм***), его масса - около ***4 кг***. Благодаря секционированию обмоток и наличию ребер электромагнит не требует принудительного охлаждения, так как тепловые потери обмоток невелики сами по себе. Расход энергии на питание электромагнита значительно перекрывается улучшением электронного КПД магнетрона и увеличением его СВЧ мощности. Кроме того, при использовании электромагнитов уменьшается стоимость эксплуатации установок. При замене магнетрона электромагнит остается, в то время как пакетированный магнетрон заменяется вместе с постоянным магнитом.

**Резонаторные камеры для установок СВЧ нагрева диэлектриков**

Конструкция резонаторных камер должна быть такой, чтобы внутри них нагрев был одинаков в любой части внутреннего объема, занятого обрабатываемым диэлектриком. С другой стороны, объем камер должен быть достаточно большим, чтобы в течение каждого цикла обрабатывать значительное количество материала и полностью использовать мощность СВЧ генератора. Как уже говорилось, для промышленного применения выделены небольшие участки спектра электромагнитных излучений, поэтому произвольно выбирать рабочую длину волны нельзя. Одним из наиболее удобных диапазонов для нагрева диэлектриков является диапазон волн вблизи ***12,6 см*** (***2375 ±50 МГц***).

Исходя из приведенных требований в устройствах СВЧ нагрева находят применение резонаторные камеры в виде прямоугольных объемных резонаторов, линейные размеры которых в ***5 — 6*** раз превышают длину волны генератора. В подобном резонаторе может существовать несколько различных видов колебаний (более десяти), у каждого из которых свое распределение электрического и магнитного полей внутри объема резонатора. Такие резонаторы называются многомодовыми, т.е. в них может быть одновременно возбуждено несколько видов колебаний.

Поля различных видов колебаний, если они возбуждены от одного генератора с фиксированной длиной волны, могут в различных точках внутреннего объема резонатора интерферировать, т.е. складываться и вычитаться. В результате в некоторых точках могут быть более сильные поля (от сложения полей нескольких видов колебаний), а в других - более слабые (вследствие вычитания). Поэтому суммарное поле может быть существенно неравномерным.

Размеры и параметры объемных резонаторов могут быть рассчитаны на ЭВМ и оптимизированы. Задача оптимизации состоит в том, чтобы выбрать такие размеры резонатора, при которых в нем можно было бы возбуждать только определенные виды колебаний, а интерференция между ними давала бы возможно более равномерное поле по объему. При этом возбуждающие колебания устройства должны устанавливать строго определенные соотношения между амплитудами тех видов колебаний, которые дают суммарное равномерное поле.

Несколько иной способ получения равномерности нагрева — это применение двух или более генераторов, работающих на разных, но обычно близких частотах, или введение изменения во времени генерируемой длины волны в некоторых возможных пределах ***±***.

Чем ближе по шкале длин волн расположены виды колебаний рассматриваемого многомодового резонатора, тем меньшее изменение длины волны генератора оказывается достаточным для улучшения равномерности нагрева и получения равномерного электромагнитного поля в нем даже при слабой загрузке резонатора обрабатываемым диэлектриком.

Для СВЧ нагрева наиболее пригодны такие многомодовые резонаторы, у которых резонансные длины волн различных видов колебаний расположены по шкале длин волн не сгустками, а возможно более равномерно. Это получается, когда размеры резонатора ***a***, ***b*** и ***lрез*** соизмеримы, но не равны, т.е. когда резонатор представляет собой параллелепипед, близкий к кубу, но не куб (**рис. 2**).



**Рис. 2**. Возбуждение рабочей камеры устройств нагрева диэлектриков:

***1 — рабочая камера; 2 и 3 — прямоугольные волноводы от СВЧ генераторов с рабочими длинами волн l1 и l2***.

Например, для рабочего диапазона длин волн ***12,6 ±0,252 см*** практически равномерный спектр резонансных длин волн или резонансных частот достигается при соотношениях ***axbxlрез=52x57x58*** или ***56x57x60 см***. Резко неравномерный спектр получается при ***axbxlрез=58x60x60*** или ***59x59x60 см*** и тем более в кубическом резонаторе ***59x59x59 см***. Интересно, что в первом случае в полосе длин волн ***12,6±0,252 см*** имеется ***62*** вида колебаний с различными резонансными частотами, во втором - ***56***, а соответственно в третьем, четвертом, пятом имеются только ***30***, ***33*** и ***15***.

Если резонансные частоты двух или нескольких видов колебаний равны между собой, то такие виды колебаний называются вырожденными. В кубическом резонаторе имеется шестикратное вырождение многих видов колебаний, а в третьем и в четвертом — двух- и иногда трехкратное вырождение. Вот почему в этих резонаторах меньше резонансных частот, чем в первом и во втором, при одной и той же рассматриваемой полосе рабочих длин волн.

**Уровень загрузки резонаторных камер**. Здесь необходимо различать два случая. Если резонатор полностью заполнен диэлектриком с высоким значением диэлектрической проницаемости ****** и большими потерями, то резко падает его нагруженная добротность и согласовать ввод энергии, обеспечивающий полную передачу СВЧ энергии от генератора в объем диэлектрика, относительно просто.

Сложнее обстоит дело, если резонатор загружен диэлектриком слабо или когда в резонаторе имеется значительный объем диэлектрика с малым ******(меньше ***2***) или малый объем диэлектрика с высоким значением ******. При этом собственные виды колебаний резонатора резко смещаются по частоте, а добротность резонатора для этих видов колебаний снижается незначительно. Поэтому такой резонатор в первом приближении можно рассчитывать без учета потерь.

**Возбуждение рабочих камер**. Так как в промышленных установках необходимо передавать в рабочую камеру СВЧ мощность высокого уровня, измеряемую киловаттами в непрерывном режиме, то из многих типов возбуждающих устройств оказываются пригодными только такие, которые имеют достаточную электрическую прочность. К подобным возбуждающим устройствам, например, относится открытый конец прямоугольного волновода, расположенный в соответствующем месте стенки рабочей камеры (см. **рис. 2**).

Открытый конец волновода помещается там, где у требуемых видов колебаний в резонаторе располагаются пучности магнитного поля, причем направление силовых линий магнитных полей должно быть параллельным как в возбуждающем волноводе с волной ***H10***, так и для рабочего вида колебаний в камере. Наоборот, для тех видов колебаний, возбуждение которых нежелательно, в этом месте должен быть узел магнитного поля или же силовые линии их магнитных полей должны быть перпендикулярны силовым линиям магнитного поля рабочих видов колебаний.

На **рис. 2** схематически показаны рабочая камера и два возбуждающих ее волновода. Применяя два ввода, можно увеличить число возбуждаемых в заданном диапазоне видов колебаний и увеличить таким образом равномерность нагрева диэлектрика.

Чтобы избежать передачи СВЧ энергии из одного ввода в другой, можно применять либо разную их поляризацию (вектор ***E*** в волноводе ***2*** перпендикулярен вектору ***E*** в волноводе ***3*** на **рис. 2**), либо поместить второй ввод в области узлов магнитного поля тех видов колебаний, которые возбуждаются первым вводом, либо применить оба этих способа.

**СВЧ нагрев движущихся диэлектрических лент и изделий круглого поперечного сечения**

Применение СВЧ нагрева движущихся лент позволяет существенно поднять производительность установок нагрева и во многих случаях значительно улучшить качество выпускаемой продукции. Так, полимеризация в СВЧ полях капроновых канатов увеличивает их прочность на разрыв в несколько раз. При СВЧ сушке стеклоленты удается понизить ее конечную влажность до ***1%*** и увеличить скорость процесса до ***4 — 5 м/мин***. Длина камеры, в которой происходит сушка, составляет ***1 м*** при СВЧ мощности на входе ***1,5 кВт***. Сушка СВЧ нагревом бумажной ленты на бумагоделательных комбинатах позволяет увеличить скорость протягивания ленты через сушильную камеру с ***8*** до ***100 м/мин***.

Первоначально в высокочастотных установках для фиксации и сушки крученых изделий из синтетических волокон обрабатываемые изделия протягивали между пластинами конденсаторов.

Главными недостатками этих установок являлись низкий КПД, сложность экранирующих конструкций и электрические пробои при влажном состоянии изделий. Эти недостатки можно устранить, применив в качестве основы камеры сушки и фиксации ЗС, по продольной оси которой протягивается крученое волокно, а на конце ЗС подключается согласованная нагрузка (**рис. 3**), которая служит для поддержания режима бегущей волны в ЗС.



**Рис. 3**. Схема установки для фиксации и сушки крученых изделий из синтетических волокон:

***1 — СВЧ генератор; 2 — камера для фиксации сушки в виде замедляющей системы; 3 — согласованная нагрузка; 4 — станция для натяжения и транспортирования синтетического изделия 5; 6 — груз***.

Это дополнительно уменьшает опасность пробоя по сравнению со случаем, когда в ЗС был бы режим стоячей волны. Таким образом, обрабатываемое изделие протягивается в области сильного высокочастотного электрического поля замедленной бегущей вдоль ЗС волны и занимает значительную часть поперечного сечения, в пределах которого расположено электромагнитное поле этой волны. Кроме того, благодаря замедлению волны длина камеры получается существенно меньше, чем в случае применения волноводов или коаксиальных линий. Отметим также, что направление движения изделия и бегущей электромагнитной волны могут совпадать (режим прямотока или прямоточная сушилка), а могут быть и противоположными (режим противотока). В режиме прямотока наибольшая подводимая к сушилке СВЧ мощность приходится на влажные части обрабатываемого диэлектрика, а в режиме противотока — на почти сухие. Важно еще отметить, что при проектировании подобных сушилок необходимо учитывать не только поглощение изделием СВЧ энергии, но и конвективный теплообмен с окружающим пространством**.**

**Обеспечение равномерности нагрева по толщине**. Для тонких лент (бумаги, стеклоткани и т.п.) проблемы неравномерности нагрева по толщине не возникает, поскольку толщина лент меньше (обычно в ***200 — 500 раз***) рабочей длины волны и нагревающее электрическое СВЧ поле практически не меняется по толщине материала. Иное дело для материала круглого поперечного сечения (капроновые канаты, сосисочный фарш и пр.), где диаметр поперечного сечения соизмерим с рабочей длиной волны (скажем, более ***0,1***), особенно если диэлектрическая проницаемость материала велика и равна нескольким десяткам. Тогда электрическое СВЧ поле, а следовательно, и нагрев по сечению могут быть крайне неравномерны. Ели не добиться равномерности выделения тепла по сечению, то выравнивание температуры будет происходить за счет теплопроводности и тогда, чтобы не перегреть области с сильным полем, придется снижать мощность СВЧ нагрева и удлинять время обработки. В результате преимущества СВЧ нагрева могут быть сведены к нулю.

Рассмотрим конкретный пример. В первых установках для нагрева стержней круглого поперечного сечения применялся круглый волновод с волнами типа ***E0i***, вдоль продольной оси которого по кварцевой трубке пропускалось нагреваемое вещество (**рис. 4**). При больших значениях ****** обрабатываемого диэлектрика, равных ***20 — 50*** и более, распределение тепла по радиусу получается очень неравномерным: вблизи оси - максимум нагрева, а затем с увеличением ***r*** все более быстрый спад почти до нуля, причем спад тем более быстрый, чем больше ******(**рис. 5**).



**Рис. 4**. СВЧ нагреватель для диэлектрического стержня в виде круглого волновода:

***1 — волновод; 2 — нагреваемый диэлектрик; 3 — кварцевая трубка***.

Обозначим через ***=*** радикальную постоянную для области, занимаемой диэлектриком. Здесь ***k=2*** — волновое число, а ***=2/в*** — постоянная распространения волны вдоль продольной оси в объеме обрабатываемого диэлектрика.



**Рис. 5**. Распределение мощности источников тепла ***P(r)/P(0)*** в зависимости от ***r/rд*** для различных значений ***e1*** в нагревателе, изображенном на **рис. 4** (***rд=1 см***; ***R=5 см***; ***=12,6 см***).

Теоретический анализ показывает, что мощность источников тепла ***P(r)*** в зависимости ***1r*** изменяется волнообразно, а перемещать максимумы и минимумы по направлению ***r*** можно изменяя ***1***. Поэтому для получения равномерного распределения источников по ***r*** необходимо подобрать соответствующие значения ***1***. Как видно из формулы для ***1***, при заданных значениях ***1*** и ***k=2/*** это равноценно подбору соответствующего значения ***=2/в=/vф***, т.е. фазовой скорости волны ***vф*** вдоль продольной оси волноведущей системы.

Нагрев по сечению будет равномерным, если первый от оси максимум функции ***P(r)=f(1r)*** располагается в пределах обрабатываемого диэлектрика при некотором значении ***0<r0<rд***, а минимум этой функции, в отличие от графиков, приведенных на **рис. 5**, будет расположен вне диэлектрика т.е. при ***r0>rд***. Соответствующие расчеты показывают, что наименьшее отклонение функции ***P(r)=f(1r)*** от равномерной имеет место при ***r0/rд=0,5*** и не превышает ***±7%*** своего значения на оси.

Для конкретного случая: ***rд=1 см***; ***1=35***; ***=12,6 см***; т.е. ***k=2/=0,5 1/см*** (***1=35*** соответствует диэлектрической постоянной обрабатываемого материала, который при термообработке на СВЧ требует равномерного распределения температуры по радиусу). Постоянная распространения волны ****** получается по расчету равной ***1,56*** ***1/см*** и ***в=2/=4 см,*** т.е. длина волны в волноводе получилась меньше длины волны в свободном пространстве ***=12,6 см***. Это значит, что для получения равномерного нагрева по радиусу следует применить замедляющую систему осесимметричного типа с замедлением, равным **2 — 3** . Это сравнительно небольшое замедление характерно для ЗС типа цепочки связанных резонаторов или диафрагмированного волновода. Именно такая ЗС и применяется в установке для термообработки, например сосисочного фарша, схематически показанной на **рис. 6**.



**Рис. 6**. Схема СВЧ нагревателя для термообработки сосисочного фарша:

***1 — ЗС типа «диафрагмированный волновод»; 2 — кварцевая трубка, заполненная фаршем; 3 — коаксиально-волноводный переход; 4 — дрехдецибельный мост для деления мощности СВЧ генератора пополам; 5 — короткозамыкающие поршни в прямоугольном волноводе; 6 — согласующие секции диафрагмированного волновода***.

Теперь, когда известны диаметр диэлектрика ***2r0*** и его диэлектрическая проницаемость ******, рабочая длина волны ****** и замедление ***m***, при котором имеет место равномерное распределение тепловых источников по поперечному сечению, и тип ЗС, необходимо так подобрать ее геометрические размеры, чтобы, кроме требуемого значения ***m*** (т.е. ******), дисперсия вблизи рабочей длины волны была как можно меньше. Тогда легче добиться согласования ЗС с прямоугольным волноводом по которому подается СВЧ энергия. Увеличивается также полоса частот, в которой замедление постоянно и становятся в менее жесткими допуски на размеры конструктивных элементов ЗС.

Одно и тоже замедление, но при разной крутизне дисперсионной характеристики при рабочей длине волны, можно получить при разных сочетаниях размеров ***b*** и ***c*** (см. **рис. 6**). Наименьшая дисперсия получается при ***b=1,35 см*** и ***c=4,3 см***.

Отметим интересные конструктивные особенности установки, приведенной на **рис. 6**. Во-первых, СВЧ энергия от генератора разветвляется на две равные части в трехдецибельном волноводном мосте и подается с обоих концов ЗС типа цепочки связанных резонаторов (диафрагмированного волновода) навстречу друг другу через коаксиально-волноводные переходы. В этом случае получается более «мягкий» нагрев обрабатываемого материала, а генератор предохраняется от отражений в периоды отсутствия сырья. Длина рабочей части ЗС выбрана такой, чтобы встречные волны при заполнении центральной части ЗС фаршем, т.е. диэлектриком с большими потерями, затухали немного дальше середины волновода. Диаметр ***d*** выбирают таким, чтобы в пределах этого отрезка коаксиальной линии не было высших типов волн, а могла распространяться только волна типа ТЕМ. Согласование прямоугольного волновода с ЗС осуществляется экспериментально путем подбора положения короткозамыкающих поршней диаметра внешнего проводника первой секции ЗС и формы утолщения центрального проводника в коаксиально-волноводном переходе.

Сравнительные измерения показали, что при применении ЗС типа цепочки связанных резонаторов перепад температуры составляет ***6C*** (от

***64C*** на оси до ***70C*** при ***r=rд***), а в круглом волноводе ***37C*** (от ***68C*** на оси до ***31C*** у стенки кварцевой трубки).

**Плазменные СВЧ горелки (плазмотроны) и их применение**

**Свойства электронно-ионной плазмы**. Плазма — это состояние вещества, находящегося в газообразном состоянии, в котором большое количество атомов и молекул ионизированно; атомы стали ионами, т.е. электрически заряженными частицами, потеряв один или несколько электронов. Кроме ионов в плазме имеются и свободные электроны. Если их заряд приблизительно равен заряду ионов, то такая плазма называется квазинейтральной, т.е. в целом ее электрический заряд равен нулю.

Для понимания физики взаимодействия плазмы с СВЧ колебаниями необходимо отметить следующие обстоятельства.

Электрические и магнитные поля на СВЧ во времени меняются столь быстро, что за время нарастания амплитуды электрического поля до максимума (четверть периода СВЧ колебаний) электроны смещаются на очень небольшие расстояния ***x: x 2eE/(m)***, где ***e*** и ***m*** — соответственно заряд и масса электрона. Важно обратить внимание, что x пропорционально ***E*** и обратно пропорционально квадрату угловой частоты сигнала ******. При амплитуде ***E=Em=100 В/см*** и ***=10*** ***см*** ***(=2\*3\*10рад/с)*** ***x=0,01 мм***. При ***Em=10 кВ/см x=1 мм***.



Наименьшая масса иона у водорода, но и она в ***1840*** раз больше ***m***. В результате при тех же условиях смещение иона водорода будет равно всего лишь ***10*** или ***10 мм***. Отсюда важное следствие: на СВЧ можно пренебречь движением ионов под действием СВЧ сигнала и рассматривать только движение электронов.



Основные параметры плазмы: ***N*** — концентрация заряженных частиц в единице объема; ****** — относительная диэлектрическая проницаемость плазмы на СВЧ, которая определяется без учета соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами только значениями N и ****** по формуле

***= 1 - Ne / (m0) = 1 - п / ,***



где ***п =***  — плазменная круговая частота, а ***0 = 0,886\*10 A\*c/(В\*м)*** — диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Из формулы видно, что плазма является диэлектриком, у которого ***<1***, но могут быть и случаи, когда ****** становится отрицательной величиной или равняется нулю (при ***=п***) или, переходя к плазменной частоте ***fп*** в герцах и подставляя численные значения ******, ***m*** и ***0***, можно получить ***fп=п/2=8980*** ***Гц***, т.е. однозначно определяется концентрацией заряженных частиц в единице объема ***N***. Из этого выражения видно, что при концентрации заряженных частиц в единице объема от ***10*** до ***10*** ***1/см*** плазменные частоты будут соответствовать СВЧ диапазону.



Физически представить плазменную частоту можно следующим образом. Предположим, что в квазинейтральной плазме мы отклонили один из электронов от положения равновесия и отпустили. Кулоновские силы, притягивающие электроны к ионам, будут возвращать его к положению равновесия (ионы из-за большой массы неподвижны!). Набрав определенную скорость, электрон проскочит положение равновесия (конечно, с затуханием). Эта частота качаний электронов около положения равновесия и равна ***fп***.

Активную проводимость плазмы ******, а значит, и затухание СВЧ колебаний в ней определяет параметр ***v***, который частотой соударений — это количество соударений заряженных частиц с нейтральными в единицу времени. Максимальное значение ****** получается при ***=v***, а ***v*** тем больше, чем больше давление газа ***p***.

Важным для практического применения плазмы параметром является ее температура ***T***, которая характеризуется некоторой средней скоростью движения свободных электронов к ней. Температура плазмы при СВЧ разряде обычно ***6000 — 7000K***. С другой стороны, и электропроводимость плазмы ******, и ее диэлектрическая проницаемость ****** являются функциями температуры ***T***.

**Принцип устройства СВЧ плазмотронов** заключается в передаче СВЧ энергии веществу, находящемуся в газообразном состоянии, с целью перевода его в плазму. Обычно газ подается под определенным давлением (может быть выше, ниже или равным атмосферному) по диэлектрической, чаще всего кварцевой или керамической трубке, которая должна быть помещена в область максимальной напряженности электрического поля СВЧ колебаний. В стационарном состоянии выход тепла из плазмы полностью компенсируется поступлением в плазму СВЧ энергии, т.е. плазма является активной нагрузкой для генератора СВЧ.

При расчете плазмотронов основные параметры плазмы, такие, как ******, ******, ***T***, длина волны СВЧ сигнала ******, считаются постоянными, поэтому плазму рассматривают как диэлектрик с потерями и задача расчета заключается в оптимизации передачи СВЧ энергии в этот диэлектрик при одновременном снижении отраженной энергии.

Одним из наиболее простых по конструкции является плазмотрон волноводного типа, схематически изображенный на **рис. 7**. Разрядная диэлектрическая трубка пропущена через середины широких стенок прямоугольного волновода и перпендикулярно им. Вне волновода разрядная трубка окружена экранирующими металлическими трубками, являющимися запредельными волноводами для СВЧ сигнала, возбуждающего плазму.



**Рис. 7**. Схема устройства плазмотрона волноводного типа:

***1 — прямоугольный волновод (b — размер узкой стенки); 2 — экранирующие запредельные трубки; 3 — разрядная диэлектрическая трубка; 4 — плазменный шнур; 5 — согласованная нагрузка***.

Плазма имеет вид шнура или цилиндра с диаметром ***dпл***, на ***2 — 3*** см меньшим внутреннего диаметра разрядной трубки ***D***, и длиной, лишь немного превышающей размер узкой стенки прямоугольного волновода ***b***. Плазменный шнур ограничен по длине в тех точках запредельных экранных трубок, где СВЧ мощность уже недостаточна для поддержания разряда, т.е. горения плазмы.

Одним концом плазмотрон волноводного типа присоединен к СВЧ генератору, а другим — к согласованной нагрузке или к замкнутому на конце отрезку прямоугольного волновода (короткозамыкателю). Одна часть СВЧ энергии поглощается в плазме, а оставшаяся доля частично проходит за разряд и частично отражается от него.

Для компенсации отраженной волны между генератором и разрядной трубкой включают различные подстраивающие элементы, что эквивалентно подключению разрядной области через трансформатор связи. Плазмотроны с трансформаторами связи принято называть плазмотронами резонаторного типа.

Более однородные по радиусу характеристики плазмы имеют место в плазмотроне на основе радиальной линии, представляющей собой два параллельно расположенных диска, в центре которых перпендикулярно дискам проходит разрядная трубка. В такой радиальной линии должна быть возбуждена радиальная ТЕМ волна, сходящаяся равномерно со всех сторон к плазменному шнуру, находящемуся на оси системы.

**Примеры плазмотронов волноводного типа**. Изображенный на **рис. 7** плазмотрон представляет собой волноводно-коаксиальный переход, причем внутренним проводником коаксиальной линии служит плазменный шнур, а внешним — экранирующие металлические трубки. В данном плазмотроне необходимо учитывать активные потери в плазменном шнуре.

При выбранных геометрических размерах плазмотрона и рабочей частоте СВЧ генератора главным расчетным параметром является температура плазмы. Однако для построения обобщенных характеристик плазмотронов, не зависящих от свойств и термодинамического состояния плазмообразующего газа, а также для удобства математических расчетов оказалось удобнее вместо температуры использовать в качестве основного расчетного параметра отношение радиуса плазменного шнура ***rпл*** к глубине поверхностного слоя на плазменном образовании ******. При расчете ****** учитываются свойства и термодинамическое состояние газа, в котором будет образована плазма.

На **рис. 8** приведены расчетные кривые ***Kстv*** в подводящем волноводе ***axb=72x34 мм*** с волной ***H10*** и коэффициента передачи СВЧ энергии в разряд ****** для плазмотрона с согласованной нагрузкой (пунктирные линии). Рабочая длина волны ***12,6 см***; внутренний диаметр экранирующих трубок ***2R=22 мм***; диаметр плазменного шнура ***2 rпл =7 мм***. Отношение ***rпл /R*** в расчетные формулы входит под знаком логарифма, поэтому оно мало влияет на характеристики плазмотрона. В качестве плазмообразующего газа использовался азот при атмосферном давлении.

На **рис. 8** приведены также кривые отношения мощности ***Pпад***, подводимой к плазмотрону, к удельной мощности ***Pпл***, поглощаемой в единице длины плазменного столба, находящегося в центре широкой стенки волновода. Эти кривые имеют минимум, в котором потребляемая от СВЧ генератора мощность минимальна. Правые ветви этих кривых соответствуют устойчивым режимам разряда.



**Рис. 8**. Расчетные зависимости коэффициента передачи ******, ***Kстv*** и ***Pпад/Pпл*** от отношения ***rпл/***для плазмотронов волноводного типа с согласованной нагрузкой и короткозамыкателем.

Действительно, и при постоянной мощности, подводимой к плазмотрону, в разряде устанавливается определенная температура. Если режим работы соответствует некоторой точке на правой ветви кривой, то случайные малые изменения температуры в разряде вызывают ряд процессов, возвращающих температуру к стационарному значению. Если температура случайно уменьшится, то длина разряда уменьшится, что приведет к увеличению удельной мощности ***Pпл*** и разогреву плазмы. Если температура случайно возрастает, то длина разряда возрастает и ***Pпл*** уменьшится, что приведет к остыванию плазмы. Этот механизм саморегулирования поддерживает в разряде постоянную температуру, соответствующую СВЧ мощности, подводимой к разряду.

Граница устойчивости разряда соответствует значениям ***rпл/0,30,6***. При этом, например, температура плазмы азота равна ***5500 — 5800K***. Удельная мощность ***Pпл***, требуемая для поддержания в плазме заданной температуры, может быть определена по кривой, приведенной на **рис. 9**. Далее по кривым ***Pпад/Pпл*** на **рис. 8** можно определить и значение ***Pпад***, при которой в плазме температура равна требуемому значению.

Если проанализировать приведенные на **рис. 8** и **9** данные, то можно сделать следующие важные для практики выводы.

В плазмотроне с короткозамыкателем осуществляется значительно более эффективное использование СВЧ энергии, чем в плазмотроне с согласованной нагрузкой: ***max*** соответственно равны ***0,97*** и ***0,5***; минимальные мощности СВЧ генератора, требуемые для поддержания устойчивости разряда, равны соответственно ***0,5*** и ***1,2 кВт***. Минимальная температура СВЧ разряда в азоте при атмосферном давлении равна ***5500K***.



**Рис. 9**. Зависимость и от температуры СВЧ разряда в азоте при атмосферном давлении.

При экспериментах с рассматриваемыми плазмотронами расход газа подбирался минимально возможным с тем, чтобы сохранить стабильность разряда. В этом случае теплоотвод от разряда определяется в основном теплопроводностью газа на стенки разрядной трубки. Длина плазменного столба в плазмотроне с согласованной нагрузкой равнялась ***4 см*** при поглощаемой в разряде мощности ***900 Вт***, что меньше расчетного значения на ***20% — 30%***. Объясняется это тем, что при расчете не учитывался спад температуры на концах плазменного шнура и вынос тепла из плазмы потоком газа при определении значения ***Pпл*** в соответствии с кривой, изображенной на **рис. 9**. Однако приведенные на **рис. 8** и **9** расчетные данные дают удовлетворительную точность и могут быть использованы для предварительных расчетов конструктивных параметров плазмотронов.

Рассмотрим пример практического применения плазмотронов.

**СВЧ плазменный источник возбуждения спектра**. Наиболее часто в качестве источника тепла для разогрева порошков веществ, исследуемых с помощью анализаторов спектра, использовались газовые горелки. Для них характерна достаточная стабильность горения, а главным недостатком является внесение в зону нагрева продуктов горения газа, которые во многих случаях могут загрязнять обрабатываемый или анализируемый материал. Кроме того, температура, даваемая газовыми горелками, для анализа многих элементов недостаточна. С помощью плазмотронов может быть получен в атмосфере защитных газов — азота, гелия или аргона — стабильный нагрев до ***8000K*** без каких-либо загрязнений. Для спектрального анализа применяют и электрические дуги постоянного и переменного токов. Они позволяют получить требуемую температуру, но не дают желаемой стабильности и вносят загрязнения продуктами разрушения электродов. Поэтому при их использовании воспроизводимость и точность анализа недостаточны.

Высокотемпературный стабильный плазменный источник возбуждения спектра представляет собой установку, состоящую из двух блоков — блока питания и СВЧ блока, в который входят магнетрон ***M571*** с регулируемой непрерывной мощностью от ***0*** до ***2,5 кВт*** на длине волны ***12,6 см*** и плазмотрон волноводного типа с согласованной нагрузкой.



**Рис. 10**. Схематическое изображение СВЧ блока плазменного источника возбуждения спектра типа ***ПВС-1***:

***1 — магнетрон; 2 — плазмотрон волноводного типа; 3 — согласованная нагрузка; 4 — кварцевая трубка для подачи плазмообразующих газов и образования плазменного столба; 5 — конденсор; 6 — щель анализатора спектра***.

Схема СВЧ блока применительно к спектральному анализу приведена на **рис. 10**. Газ для образования плазмы подается в трубку из кварцевого стекла через завихряющую форсунку, не показанную на схеме. Через ту же форсунку или вдоль оси кварцевой трубки по отдельной трубке подается анализируемое вещество, которое распыляется в виде аэрозоля. Излучение плазменного столба через конденсатор проектируется на щель анализатора спектра, с помощью которого производится анализ обычными спектральными методами. Расход газа может составлять ***8 — 10 л/мин*** при давлении, близком к атмосферному, плазменный столб длиной ***25 — 30 мм*** имеет диаметр — ***5 — 8 мм***. Коэффициент передачи СВЧ энергии в разряд ***0,55 — 0,6***.

Время анализа по сравнению с химическими методами сокращается в ***2 — 5 раз***. Вследствие высокой температуры, высокой чистоты в зоне нагрева и высокой стабильности плазменного источника появилась возможность анализировать как легко- и средневозбудимые, так и трудновозбудимые элементы, а также определять с высокой точностью средние и большие концентрации элементов. Кроме того, из-за отсутствия электродов открылась возможность анализа кислотных и щелочных растворов.

Практическое использование источника ***ПВС-1*** показало, что температура плазмы СВЧ разряда равна ***4000 — 8000K***, коэффициент вариации, характеризующий нестабильность самого источника, ***1,5% — 2%***, а при анализе коэффициент вариации ***2% — 3%***, чувствительность анализа ***10 — 10 мг/мл***.



**Излучатели СВЧ энергии**

Излучатели СВЧ энергии фактически представляют собой передающие антенны того или иного типа, направляющие СВЧ энергию на обрабатываемый участок материала; СВЧ излучатели необходимы там, где надо нагревать часть большого предмета.

Подобные излучающие устройства необходимы и при СВЧ сушке некоторых материалов, и при влагометрии, и при стерилизации ран на поверхности тела, и при воздействии на культуры микроорганизмов и т.д.



**Рис. 11**. СВЧ облучатель в виде открытого конца волновода прямоугольного поперечного сечения.

Простейшим СВЧ излучателем является открытый конец волновода (**рис. 11**). Для ограничения высокочастотных токов по фланцу, а следовательно, и СВЧ поля применяют специальные канавки ***1***, заполненные поглощающим материалом (***b*** — размер узкой стенки волновода).

Открытый конец стандартного прямоугольного волновода является весьма эффективной антенной. Даже без каких-либо подстроечных устройств ***Kстv*** в волноводе равен ***1,6***, т.е. от открытого конца волновода отражается менее ***5,5%*** передаваемой по волноводу мощности.

Меньшую площадь облучения дает излучатель в виде открытого конца ***H***-образного волновода (**рис. 12**). На этом рисунке пунктиром показана зона максимального нагрева.



**Рис. 12**. СВЧ облучатель в виде открытого конца ***H***-образного волновода.

Наилучшее согласование со свободным пространством имеет рупорная антенна с корректирующей диэлектрической линзой ***1*** в ее раскрыве (**рис. 13**). Она применяется либо для создания плоского фронта СВЧ волн (**рис. 13, *a***), либо фокусировки СВЧ излучения на небольшой площади подобно обычной двояковыпуклой линзы в оптическом диапазоне. Минимальный диаметр пятна в фокусе получаетя примерно равным рабочей длине волны ****** (**рис. 13, *b***).



**Рис. 13**. СВЧ облучатель в виде рупорно-линзовой антенны для создания плоского фронта волны ***(a)*** и для фокусировки излучения ***(b)***.

На **рис. 14** показан рупорно-параболический облучатель, применяемый для раскалывания бетонных плит. При ***=12,6 см*** и ***Pизл=2,5 кВт*** бетонная плита толщиной ***200 мм*** раскалывается через несколько секунд или минут после начала облучения.



**Рис. 14**. СВЧ облучатель в виде рупорно-параболической антенны.

При использовании электромагнитных волн коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов применение резонаторных камер, ЗС и волноводов, в которых производится воздействие СВЧ колебаний на вещество, становится нецелесообразным из-за их малых поперечных размеров. Более эффективно осуществить направленное излучение СВЧ энергии и при этом получить равномерное по интенсивности поле излучения на заданной площади и близкое к нулю поле вне этой площади.

Равномерное излучение на прямоугольном участке поля создает пирамидальный рупор, подключенный к прямоугольному волноводу с волной ***H10***. Однако постоянство плоскости поляризации напряженности электрического поля ***E*** в этом случае допустимо не для всех применений. Например, наиболее эффективно воздействуют миллиметровые волны на бактерии тогда, когда вектор ***E*** параллелен большему размеру бактерии. А так как бактерии ориентированы в облучаемом пространстве хаотически, то для повышения эффективности облучения желательно иметь равномерное по мощности распределение поля на площади, ограниченной кругом, и в пределе этой площади иметь круговую поляризацию вектора ***E***.

Подобного типа облучатель для рабочей длины волны ***7,1±0,2 мм*** изображен на **рис.15**. Он состоит из перехода со стандартного прямоугольного волновода сечением ***2,6x5,2 мм*** на круглый волновод диаметром ***6,2 мм***. В этом переходе волна ***H10***, распространяющаяся в прямоугольном волноводе, плавно и без отображений преобразуется в волну ***H11*** круглого волновода с сохранением плоскости поляризации вектора ***E***. Для получения круговой поляризации вектора напряженности электрического поля в круглом волноводе используется секция круглого волновода, в которую помещена четвертьволновая полистироловая пластина (***=2,56***) толщиной ***1,1 мм*** и длиной ***10 мм*** с плавным сужением на концах для предотвращения отражений, плоскость которой расположена под углом ***45°*** к направлению вектора ***E*** в прямоугольном волноводе. Далее круглый волновод диаметром ***6,2 мм*** переходит в излучающий рупор с углом раскрыва ***36°*** и диаметром раскрыва ***150 мм***. Применялись также рупоры с раскрывами ***50*** и ***300 мм***. Для формирования равномерного поля облучения в раскрыве рупора помещена диэлектрическая линза из фторопласта (***=2,08***), имеющая специально рассчитанный профиль по стороне, обращенной к волноводу, и плоскую поверхность на стороне объекта облучения.

Идеальную равномерность поля в пределах радиуса ***R*** получить невозможно. Равномерность считается достаточной, если перепады интенсивности поля в пределах круга радиуса ***R*** не превышают ***3 дБ***.

Наилучшая равномерность напряженности поля получилась при раскрыве рупора ***150 мм***. Размер равномерно облучаемой поверхности при этом можно регулировать изменением расстояния ***L***. При ***L400 мм*** равномерность поля по сечению луча уже практически не меняется. Таким образом, увеличивая ***L***, можно получить увеличение диаметра ***2R*** равномерно облученной поверхности.



**Рис. 15**. Облучатель с круговой поляризацией вектора напряженности электрического поля:

***1 — переход с прямоугольного волновода с сечением 2,6x5,2 мм на круглый волновод диаметром 6,2 мм; 2 — фазосдвигающая диэлектрическая пластина; 3 — рупор с раскрывом 150 мм; 4 — линза из фторопласта; 5 — прижимное кольцо***.

Применение рассмотренной квазиоптической системы формирования пучка электромагнитных волн позволило передавать на облучаемую поверхность ***80%*** энергии, излучаемой рупором при допустимом изменении интенсивности напряженности электрического поля на ***3 дБ*** от максимального значения. Без применения описанной системы формирования на равномерно облучаемую поверхность приходится только ***55%*** излученной рупором энергии поля волны ***H11***. Применение линзы эквивалентно увеличению площади облучаемой поверхности примерно в ***1,5*** раза.

Таким образом, рассмотренный тип облучателя позволяет получить равномерную с точностью до ***3 дБ*** облучаемую поверхность на длине волны ***7,1 мм*** диаметром от ***50*** до ***300 мм***. Диаметр облучаемой поверхности определяется расстоянием от рупорно-линзевой антенны до объекта облучения.

**Сублимационная сушка**

Одним из сравнительно новых способов консервации продуктов обеспечивающих максимальное сохранение вкусовых свойств и качеств свежих продуктов, является сублимационная сушка. При такой сушке хорошо сохраняются витамины, белки и ароматические вещества, продукты имеют малую массу и в герметичной упаковке, например из полиэтиленовой пленки, могут без ухудшения качества храниться многие годы.

В технологическом процессе сублимационной сушки продукты сначала быстро замораживают, потом помещают в вакуумную камеру, где производится откачка давления остаточных газов ***до 2,7 — 8 Па***. В вакууме происходит интенсивное испарение льда. Этот процесс идет с поглощением тепла. Чтобы в процессе испарения температура продукта не падала слишком сильно, необходимо подводить тепло извне. Это так называемая теплота возгонки.

Сублимационную сушку можно проводить путем теплоизлучения: например, получать тепло от специальных пластин, нагреваемых горячей жидкостью и помещаемых в вакуумной камере вблизи лотков с замороженными продуктами. Постепенно лед будет испаряться (практически полностью), а продукт приобретает вид губки значительно меньшей массы. Испаряемая влага не откачивается насосами, а конденсируется на специальных конденсационных пластинах, охлаждаемых до температуры ниже ***—55°C***. Эти пластины периодически очищают от наросшего льда.

После герметизации в полиэтиленовые пакеты сублимированные продукты можно перевозить и хранить без охлаждения.

Наиболее длительной и сложной технологической операцией при теплоизлучении является возгонка льда, которая в начале процесса сушки проходит при температуре поверхности продукта ***(— 40 —50)°C***. В процессе сушки граница между высушенной и замороженной частями продукта, т.е. поверхность возгонки, постепенно перемещается вглубь, так что снаружи образуется высушенный слой с малой теплопроводностью, который препятствует передаче тепла к внутренним замороженным частям продукта. В результате для сушки теплоизлучением требуется от ***8*** до ***24 ч***. Если попытаться сократить это время, то можно перегреть наружные высушенные слои.

Сверхвысокочастотный нагрев позволяет подводить тепло равномерно по всему объему. А это позволяет уменьшить время сушки в ***10*** раз и более, что обеспечивает в конечном счете не только уменьшение стоимости сушки в ***2 — 5*** раз, но и улучшает качество сушеной продукции. Кроме того, появляется возможность создания не камерных, а конвейерных установок для сублимационной сушки. Общие капиталовложения, необходимые для сооружения крупного цеха сублимационной сушки с СВЧ нагревом, примерно на ***30%*** меньше, чем при использовании нагрева за счет теплоизлучения.

Рассмотрим некоторые особенности сублимационной сушки с помощью СВЧ нагрева на примере сушки мяса.

При равномерном выделении тепла в объеме диэлектрика с потерями, каким в нашем случае является замороженное мясо, мощность потерь в единице объема (в ваттах на кубический см) определяется по формуле

***P = 0,287 E f e \* 10,***



где ***f*** — частота, ***МГц***; ***E*** — напряженность электрического поля, ***В/см***; ****** — коэффициент диэлектрических потерь в продукте.



**Рис. 16**. Зависимости коэффициента потерь ****** и диэлектрической постоянной ****** говядины от температуры:



***1 — для сырого мяса; 2 — для мяса, высушенного сублимационной сушкой (сплошная линия — на частоте 1000 МГц; пунктирная линия — на частоте 3000 МГц)***.

На **рис. 16** показаны зависимости ****** и ******от температуры сырого и высушенного мяса. По этим кривым видно, что ****** и ******существенно уменьшаются в процессе сушки. Поэтому в первой половине технологического процесса необходимо несколько увеличивать подводимую мощность, но не настолько, чтобы произошло размораживание продукта или возник электрический СВЧ дуговой разряд. При дуговом разряде бесполезно теряется СВЧ мощность и происходит подгорание продукта. Если при атмосферном давлении пробивная напряженность электрического поля ***30000 В/см***, то при давлении остаточных газов ***13,3 — 40 Па*** имеет место минимальная пробивная напряженность электрического поля, равная около ***100 В/см*** в импульсе. При рабочих же давлениях в сушильных камерах менее ***8 Па*** пробивная напряженность поля превышает ***170 В/см*** на частоте ***915 МГц*** и превышает ***400 В/см*** для частоты ***2450 МГц***.



В процессе сушки поверхностные слои при СВЧ нагреве становятся практически сухими и обладают малой теплопроводностью, поэтому их температура становится положительной и может достигать нескольких десятков градусов. Максимальная температура высушенных частей не должна превышать определенных для каждого вида продуктов значений, чтобы не произошло ухудшение качества. Так, для говядины максимально допустимая температура ***+50°C***, а для свинины — ***+40°C***. Таким образом, чтобы не произошло перегрева наружных слоев, в конце процесса сушки надо уменьшить подводимую СВЧ мощность.

С другой стороны, как видно из **рис. 16**, при температурах ниже нуля потери (******) примерно на порядок меньше, чем при комнатной и более высоких температурах. Это говорит о том, что только на СВЧ, учитывая множитель ***f*** в формуле для ***P***, можно получить достаточную для сушки и равномерно распределенную по объему мощность путем выбора рабочей частоты в пределах ***800 — 2500 МГц***. В данном случае применимы рекомендации по конструированию камер для СВЧ нагрева, справедливые при малых потерях в диэлектрике.



Чтобы уменьшить опасность пробоя конструкция камер должна быть такова, чтобы электрическое поле в продукте было максимальным, а в окружающем вакууме не превышала допустимого значения. В простейшем случае этого можно достигнуть, помещая подвергающиеся сушке продукты между широкими стенками прямоугольного волновода с волной ***H10*** вблизи его продольной оси.

**Примеры применения СВЧ нагрева для приготовления пищи**

В настоящее время СВЧ печи могут найти применение не только в общественном питании (рестораны, столовые, вагоны-рестораны), но и в быту.

**Приготовление мяса**. Благодаря выделению тепла во всем объеме довести до готовности мясо с СВЧ печи можно всего лишь за ***1 — 5 мин*** (в сковородке на это требуется ***40 мин***). Равномерное выделение тепла по объему каждого куска обеспечивает в приготовленном мясе отсутствие непроваренных или непрожаренных мест. Кроме того, при столь быстром подогреве не происходит выпаривание соков, поэтому вкусовые качества получаются более высокими, чем при обычных способах готовки.

**Размораживание мяса, фруктов и овощей**. Замороженные продукты приобретают все большую популярность. Однако перед употреблением их необходимо разморозить, что требует длительного времени. После медленного размораживания их качество заметно ниже, чем у свежих продуктов. Чтобы представить выигрыш во времени при использовании СВЧ печей для размораживания, можно привести следующие данные по традиционным способам размораживания. Время оттаивания куска мяса массы ***1,3 кг*** в холодильнике (мясо переложено из морозильной камеры в пространство с плюсовой температурой, близкой к нулю) ***24 ч***; при комнатной температуре ***10 — 12 ч***; при использовании вентилятора ***— 5 — 6 ч***; в печи при ***72°C*** или в проточной воде в водонепроницаемой упаковке ***3 — 4 ч***.

С помощью СВЧ нагрева разморозить фрукты и овощи можно за ***1 — 3 мин***. Это дает не только экономию времени, но и настолько увеличивает качество размороженных овощей и фруктов, что они почти не отличаются от свежих.

Глубина проникания СВЧ поля в замороженное мясо увеличивается с ***2,85 см*** при ***—1,1°C*** до ***68,7 см*** при ***—51°C*** на частоте ***1000 МГц*** и с ***1,5 см*** при ***1,1°C*** до ***42,3 см*** при ***—51°C*** на частоте ***3000 МГц***. Хотя разница здесь не столь велика, все же считается, что более глубокий прогрев удается обеспечить на более низких частотах, т.е. при рабочей частоте вблизи ***1000 МГц***, особенно если размеры обрабатываемого продукта превышают ***5 см*** по толщине.

**Торговые автоматы**. Широкое распространение в торговле получили автоматы для продажи, например, газированной воды и газет, находят применение на почтах и в гостиницах автоматы по продаже конвертов и открыток и т.д.

Одной из главных целей применения автоматики в торговле является возможность покупки товаров в любое время суток. Для непортящихся товаров, таких, как газированная вода, сигареты, газеты и пр., эта задача технически решена. Иное дело — автоматы для продажи скоропортящихся продуктов и тем более таких, которые желательно принимать в пищу в горячем виде. С применением СВЧ появилась возможность для проектирования и изготовления подобных автоматов. Потребности в таких автоматах, безусловно, есть: например, на вокзале можно было бы в любое время через несколько минут получить стакан горячего молока, кусок горячей отварной или жареной курицы.

Принцип торгового автомата для продажи холодный и нескоропортящихся пищевых продуктов известен и применяется в закусочных-автоматах: после опускания жетона или монеты заранее приготовленная порция продукта подается потребителю. При использовании СВЧ техники для создания автоматов по продаже горячих продуктов эта обычная схема должна быть дополнена двумя устройствами: холодильником для хранения продуктов и СВЧ печью, куда после опускания монеты или жетона должны подаваться порции продуктов и где за ***1 — 3 мин*** производится не только их оттаивание, но и нагрев до необходимой температуры. Далее — обычная выдача порции потребителю. Холодильник и СВЧ печь — это уже хорошо отработанные элементы, так что теперь дело за конструкторами и технологами подобных автоматов.

Значительно более простыми могут быть торговые автоматы, которые выдают замороженные порции продуктов, а покупатель перед употреблением в пищу сам разогревает их в СВЧ печах, установленных в том же зале закусочной-автомата.

В описанных применениях СВЧ печей реализуются преимущества централизованного приготовления продуктов питания, при котором более эффективно используется квалифицированный персонал, широко применяются механизация и автоматизация трудоемких процессов.

**Питание в больницах**. Пищеблоки крупных больниц обычно расположены в отдельных помещениях, и пока оттуда питание доставляется к постели больного, пища становится если не холодной, то чуть теплой. СВЧ печи позволяют преодолеть этот недостаток. Быстрый разогрев блюд можно вести вблизи каждой палаты. Особенно это важно в инфекционных отделениях больниц, где каждую порцию можно разогревать на бумажных тарелочках однократного использования.

Весьма перспективной представляется организация питания, при которой в больницах пища не готовится, а поступает со специализированных предприятий на склад больницы в виде замороженных или охлажденных порций, откуда персонал, обслуживающий больных питанием, их получает и разогревает в СВЧ печах непосредственно перед подачей больному. Подсчитано, что при такой организации экономится ***18%*** средств на питание. А это означает, что на ***18%*** можно увеличить расходы на продукты при одних и тех же ассигнованиях на питание.

**СВЧ печи в быту**. В последнее время, особенно в новых жилых домах вместо газа для приготовления пищи используется электричество. При этом снижается загрязнение воздуха, полностью устраняется опасность взрывов, но электрические плиты сравнительно медленно разогреваются и довольно долго остывают после выключения.

Следующий шаг по применению электричества в быту — широкое внедрение СВЧ печей. В последние годы ведущие фирмы США и Японии наладили массовый (с ***1975 г.*** свыше ***1 млн. шт.*** в год) выпуск бытовых плит, предназначенных для квартир и коттеджей. Они представляют собой комбинацию обычной трех-четырехкомфорочной электроплиты с СВЧ печью. СВЧ печь может быть расположена как духовка под электроплитой или же над ней в виде шкафчика.

При широком использовании СВЧ печей в быту получает быстрое развитие и индустрия приготовления замороженных порционных блюд, специально предназначенных для быстрого оттаивания и разогрева в СВЧ печах. Так что в недалеком будущем хозяйки будут покупать порционные замороженные блюда, хранить их в морозильных камерах своих холодильниках и подавать к столу в размороженном и разогретом в СВЧ печах виде через считанные минуты после извлечения из холодильника.

**Рецепт: фаршированная лопатка ягненка**.

Из мяса лопатки ягненка, фаршированного ароматной начинкой из бекона и грибов, легко получается несколько порций.

***25 гр***. сливочного масла;

***1*** средняя луковица, очищенная и мелко нарезанная;

***100 гр***. бекона с прожилками, без шкурки и мелко порубленного;

***100 гр***. грибов, порезанных;

***100 гр***. свежих хлебных крошек;

***1*** яйцо, взбитое;

соль и перец;

лопатка ягненка (барашка) с удаленной костью;

желе из красной смородины;

***На 4 — 6 порций***.

**1**. Растопите масло, ***30 сек***., добавьте лук, бекон и грибы и готовьте до мягкости — около ***3 — 5 (7) мин***.

**2**. Высыпьте и размешайте хлебные крошки, приправы и яйцо.

**3**. Разложите (разверните) мясо лопатки и распределите по нему начинку.

**4**. Скатайте мясо в сверток округлой формы и перетяните бечевкой.

**5**. Взвесьте и рассчитайте время приготовления.

**6**. Уложите на решетку для жарения и накройте бумажным полотенцем или разорванным мешочком для жарения.

**7**. Готовьте в режиме ***HIGH*** (или на ***100% P***.) ***1 — 2 (3) мин***. на каждые ***450 гр***. веса.

**8**. Уменьшите мощность и готовьте в режиме ***MEDIUM/HIGH*** (или на ***70% P***.) половину оставшегося времени или установите заранее автоматический режим переключения мощности со ***100%*** на ***70%*** через заданное время.

**9**. Переверните мясо, нанесите желе из красной смородины и продолжайте готовить ненакрытым.

**10**. Свободно оберните фольгой и дайте отстояться из расчета ***5 мин***. на каждые ***450 гр***. веса.

**11**. Используйте сок, который стек в противень под решеткой для негустой подливы.

При готовке соблюдайте технику безопасности. Приятного аппетита!

**Защита от СВЧ излучений**

Во всех предыдущих параграфах были даны описания мощных СВЧ устройств, в которых генераторы высокочастотных энергии имели мощность около единиц киловатт в непрерывном режиме. Даже если небольшая часть этой мощности просачивается в окружающее установку пространство, это может представлять опасность для окружающих: воздействие достаточно мощного СВЧ излучения на зрение, нервную систему и другие органы человека может вызвать серьезные болезненные явления. Поэтому при работе с мощными источниками СВЧ энергии необходимо неукоснительно соблюдать требования техники безопасности.

В нашей стране установлена безопасная норма СВЧ излучения, т.е. так называемая санитарная норма — ***10 мкВт/см***. Она означает, что в месте нахождения обслуживающего персонала мощность потока СВЧ энергии не должна превышать ***10 мкВт*** на каждый квадратный сантиметр поверхности. Эта норма взята с многократным запасом. Так, например, в США в ***60-е*** годы была норма в ***1000*** раз большая — ***10 мВт/см***.



Следует отметить, что по мере удаления от мест излучения СВЧ мощности — от резонаторных камер или волноведущих систем, где производится обработка с помощью СВЧ энергии, — поток излученной энергии быстро ослабевает (обратно пропорционально квадрату расстояния). Поэтому можно установить безопасную границу, где уровень излучения ниже нормы, и выполнить ее в виде ограждения, за которое нельзя заходить во время выполнения технологического процесса. При этом защитные устройства получаются достаточно простыми и недорогими.

В бытовых СВЧ печах для предотвращения излучения через загрузочные люки, дверцы и крышки наиболее распространены контактные устройства в виде множества пружинок из листового материала, например бериллиевой бронзы ***БрБ2***. Такие пружинки создают контакт для СВЧ токов по всему периметру загрузочного люка. Подобная система была применена в отечественной СВЧ печи, в ряде японских печей.

В настоящее время существует несколько видов как твердых, тик и мягких (типа резины) поглощающих материалов, которые уже при толщине в несколько миллиметров обеспечивают практически полное поглощение просачивающейся СВЧ энергии.

Поглощающий материал закладывается в щели между теми металлическими деталями резонаторных камер или волноведущих структур, которые не могут быть соединены сваркой или пайкой.

Предотвращение излучения через отверстие для наблюдения или подачи воздуха осуществляется применением металлических трубок достаточно малого внутреннего диаметра и необходимой длины. Такие трубки являются запредельными волноводами и практически не пропускают СВЧ энергию. Необходимо, чтобы внутренний радиус ***R*** был в ***10 — 15*** раз меньше рабочей длины волны. В этом случае погонное затухание (в децибелах на сантиметр) на низшем типе волны ***H11*** может быть приблизительно определено по формуле ***L=16/R***, а общее затухание при длине трубки ***l*** становится равным ***16l/R дБ***.

Рассмотрим численный пример. Пусть рабочая длина волны ***=12,6 см***. Возьмем трубку с внутренним радиусом ***R=9 мм***. Пользуясь формулой для ***L***, определим, что на каждом сантиметре длины трубки погонное затухание ***L=16/0,9=17,8 дБ/см***. Если мощность СВЧ колебаний резонатора составляет ***1 кВт***, а вне трубки будем считать допустимой мощность ***1 мкВт***, то на длине трубки ***l*** должно быть ослабление ***1кВт/1мкВт=1/10=10*** раз, или ***60 дБ***. Длина трубки будет ***l=60/L=60/17,8=3,37 см***.



Окончательно длину трубки с внутренним диаметром ***18 мм*** можно принять равной ***4 см***. Как видим, безопасный уровень излучения может быть получен при не очень длинных трубках и при достаточно больших диаметрах.

Для промышленных установок СВЧ нагрева характерна необходимость многоразового открывания и закрывания люков загрузки, и т.д. От этих операций защитные устройства, в особенности контактные, постепенно изнашиваются. Кроме того, с течением времени контактные поверхности окисляются. В результате излучение может возрасти в несколько раз и даже на один-два порядка. Поэтому необходимы систематическое наблюдение за состоянием защитных устройств, проведение периодических замеров уровня излучения. Отсюда и жесткие требования к надежности защитных устройств. Чтобы в эксплуатации нормы облучения не были превышены, заводские сдаточные нормы на излучение делают более жесткими. Так, в Японии допускается увеличение излучения от заводских норм до эксплуатационных при количестве открываний более ***100 тыс***. раз. Собственно, при таких условиях и проводятся периодические заводские испытания защитных устройств.

**Заключение**

Приведенные в этой работе описания электронных приборов СВЧ и их применений, конечно, далеко не исчерпывает всего их многообразия. Ограниченная тематика работы позволила рассмотреть только наиболее распространенные и типичные явления в СВЧ электронике, в частности, в энергетике СВЧ в народном хозяйстве.

Что касается применений, то здесь опущены такие важные и интересные разделы как телевидение, радиолокация, радионавигация, радиорелейные линии, передача электрической энергии из космоса на Землю и многое другое, описанию которых посвящены другие работы, а также, впрочем, и обширная научная и научно-популярная литература.

Насколько в недалеком будущем расширится использование СВЧ электроники в народном хозяйстве, можно показать на таком примере. Общепринятым считается мнение, что в современной жизни отказаться от применения ядохимикатов в сельском хозяйстве нельзя. Однако необходимо принимать меры по сокращению их использования. Одним из эффективных способов в этом направлении является применение электроники СВЧ. Уже первые опыты показали, что на участке, обработанном СВЧ излучением, урожай на ***60%*** выше, чем при химической обработке. Кроме того, предварительная до сева обработка почвы СВЧ облучением задерживает появление сорняков, что тоже способствует повышению урожайности.

Другой пример применения СВЧ электроники в сельском хозяйстве относится уже к послеуборочным проблемам. Сушка хлопка-сырца СВЧ энергией перед его длительным хранением резко повышает качество и уменьшает отходы.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что с каждым годом области применения электроники сверхвысоких частот будут расширяться, обеспечивая и убыстряя развитие производительных сил и улучшая условия труда.

**Список литературы**

**И. В. Лебедев** *Техника и приборы СВЧ. Часть I.* — Москва: Высшая школа, 1970.

**И. В. Лебедев** *Техника и приборы СВЧ. Часть II*. — Москва: Высшая школа, 1972.

**Т. И. Изюмова**, **В. Т. Свиридов** *Волноводы, коаксиальные и полосковые линии*. — Москва: Энергия, 1975.

**Ю. Н. Пчельников**, **В. Т. Свиридов** *Электроника сверхвысоких частот*. — Москва: Радио и связь, 1981.

**Е. В. Задедюрин** *Сборник деликатесных рецептов для СВЧ печей*. — Минск: Мет, 1993.

**Содержание**

**Задание** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 2 *(Введение)*

**Введение** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 3 **Промышленные диапазоны электромагнитных колебаний** • • • • • 4

*(Аналитическая часть)*

**Особенности нагрева диэлектриков в диапазонах УВЧ и СВЧ** • • • • 4

**Получение СВЧ энергии большой мощности** • • • • • • • • • • • 5

Применение последовательного электромагнита• • • • • • • • • • 5

Уменьшение пульсаций магнитного поля• • • • • • • • • • • • 8

Сравнение электромагнитов и постоянных магнитов• • • • • • • • 8

**Резонаторные камеры для установок СВЧ нагрева диэлектриков** • • 9

Уровень загрузки резонаторных камер• • • • • • • • • • • • • 10

Возбуждение рабочих камер• • • • • • • • • • • • • • • • • 11

**СВЧ нагрев движущихся диэлектрических лент и изделий круглого поперечного сечения** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 11

*(Расчетная часть)*

Обеспечение равномерности нагрева по толщине• • • • • • • • • 13

**Плазменные СВЧ горелки (плазмотроны) и их применение** • • • • • 16

Свойства электронно-ионной плазмы• • • • • • • • • • • • • • 16

Принцип устройства СВЧ плазмотронов• • • • • • • • • • • • • 17

Примеры плазмотронов волноводного типа• • • • • • • • • • • 18

СВЧ плазменный источник возбуждения спектра• • • • • • • • • 21

**Излучатели СВЧ энергии** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 22

**Сублимационная сушка** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 26

*(Инновационная часть)*

**Примеры применения СВЧ нагрева для приготовления пищи** • • • • 28

Приготовление мяса• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 28

Размораживание мяса, фруктов и овощей• • • • • • • • • • • • 28

Торговые автоматы• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 29

Питание в больницах• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 30

СВЧ печи в быту• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 30

Рецепт: фаршированная лопатка ягненка • • • • • • • • • • • • 30

**Защита от СВЧ излучений** • • • • • • • • • • • • • • • • • • 31

*(Заключение)*

**Заключение** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 33

**Список литературы** • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • 34