ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «МАГРАТЕП»»

ФЕДОТОВ

Василий Васильевич

На правах рукописи

УДК.621.385.6

СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ МАГНЕТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЩНОСТЬЮ 1-3 кВт И СВЧ КАМЕРЫ ДЛЯ КУХОННЫХ СВЧ ПЕЧЕЙ НА ЧАСТОТЕ 915 МГц.

Специальность 05.27.02 «Вакуумная и плазменная электроника»

Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук Научный руководитель: доктор технических наук Лопин Михаил Иванович.

г. Фрязино 2017г.

Оглавление

Оглавление
ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЕЁ АКТУАЛЬНОСТЬ
ВВЕДЕНИЕ7
Научная новизна12
Научные положения, выносимые на защиту 14
Практическая ценность работы15
Личный вклад автора16
Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,
сформулированных в диссертации17
Апробация результатов работы 18
Публикации19
ГЛАВА 1. УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНЕТРОНА 21
1.1. СОХРАННИЕ РАЗМЕРОВ МАГНЕТРОНА ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА
БОЛЕЕ НИЗКУЮ ЧАСТОТУ
ГЛАВА 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И КАТОДНО ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫЙ
УЗЕЛ МАГНЕТРОНА
2.1. Определение величины рабочей магнитной индукции
2.2. Оптимизация формы магнитного поля
2.2. Оптимизация катодно-подогревательного узла
2.3. Расчет контура вывода энергии
2.4. Согласование вывода энергии магнетрона и КВП с размерами
195*30 мм
2.5. Экспериментальные результаты проверки магнетрона
2.6. Сравнение с зарубежными аналогами 50

2.7. СМЕЩЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ 52
ГЛАВА З ФИЛЬТР ВНЕТРАКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ КАТОДНОЙ
НОЖКИ МАГНЕТРОНА55
3.1. Расчет фильтра 58
3.2. Измерения на малом уровне мощности (холодные измерения) 65
3.3. Проверка излучения в динамическом режиме
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕЗОНАТОРНОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ДЛЯ
ПРИМЕНЕНИЯ МАГНЕТРОНА НА ЧАСТОТЕ 915 МГц МОЩНОСТЬЮ 1-3 кВт
4.1. Определение объёма резонаторной рабочей камеры и выбор типов
колебаний
4.2. Исследование характеристик СВЧ печи с применением
разработанного магнетрона76
4.3. Выводы по согласованию магнетрона и СВЧ камеры на частоте
915 МГц
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 82

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЕЁ АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время широкое применение в различных областях промышленности получают установки, работающие на магнетронах непрерывного действия. Развитие этих устройств шло в основном по пути создания СВЧустройств нагрева, позволяющих сократить технологический цикл изготовления того или иного продукта[1-4, 29].

Эффект микроволнового нагрева основан на поглощение электромагнитной энергии в диэлектриках. Поля СВЧ проникают на значительную глубину, которая зависит от свойств материалов и частоты облучения. Взаимодействуя на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движения электронов что приводит к преобразованию СВЧ энергии в тепло.

Наиболее массовым СВЧ генератором является магнетрон на частоте 2450 МГц мощностью около 1 кВт, который выпускается фирмами LG, Samsung, Toshiba и др. и устанавливается в бытовые микроволновые печи. Благодаря дешевизне и доступности этот магнетрон используется также в научных исследованиях и в системах промышленного нагрева [63]. Однако его недостатками является малая глубина проникновения электромагнитной волны в материал на частоте 2450 МГц (малая глубина нагрева) и большой уровень внеполосных шумов. Поэтому для устранения отмеченных недостатков и расширения области применения микроволнового нагрева не прекращаются попытки создания магнетронов невысокой мощности (1-5 кВт) на частоте 915 МГц. На частоте 915 МГц имеются магнетроны с мощностью до 100 кВт и КПД до 90%, однако их применение на уровне 1÷5 кВт невыгодно из-за высокой цены самих магнетронов и их источников питания при больших габаритах и массе.

Задачей, на решение которой направлена разработка, является создание магнетрона на частоте 915 МГц мощностью не менее 1÷3 кВт в непрерывном режиме при минимальных габаритах, массе и напряжением анода 4±0,5 кВ.

За основу взят известный магнетрон на частоте 2450 МГц для бытовых печей, состоящий из трех основных узлов: анодного блока, содержащего резонаторную

систему и осевой коаксиальный вывод энергии, катодно-подогревательного узла, содержащего спиральный прямонакальный катод и держатель катода, и магнитной системы, содержащей полюсные наконечники, два кольцевых магнита и внешнюю стальную арматуру.

Для создания нового поколения кухонных бытовых СВЧ печей для пищевых продуктов потребовалось увеличение производительности этих печей. Необходимо было увеличивать объем обрабатываемых продуктов при сохранении малой массы и габаритов печей. Было принято решение создать бытовую СВЧ печь на частоте 915 МГц. Таких печей в настоящее время нет. Элементами, определяющие размеры и массу бытовых СВЧ печей, являются источник СВЧ энергии с рабочей камерой на определенную длину волны и источник питания магнетрона [5-8].

Применение печных магнетронов в существующих бытовых печах на частоте 2450 МГц, предназначенных для кафе, ресторанов, гостиниц, в настоящее время становится неэффективным при увеличенных объемах обрабатываемых продуктов из-за малой глубины проникновения СВЧ энергии на этой частоте приведенных в (таблице 1).

Продукты	433 МГц	915 МГц	2450 МГц
Метиловый спирт	33.0	7.8	1.4
Вода	70.5	23.4	3.5
Мясо	5.1-10.7	2.8-6.2	1.6-3.1
Овощи	8.1-9.1	5.0-6.3	2.6-3.0
Рыба	5.0-6.2	3.4-3.8	1.2-2.0

Таблица 1. Глубина проникновения СВЧ в продукты.

Применение в данной сфере магнетрона на частоту 433 МГц невозможно изза большой длины волны на этой частоте, что повлечет за собой увеличение размеров всей установки, начиная от магнетрона, заканчивая СВЧ резонансной камерой.

Целью настоящей работы является создание магнетрона на промышленную частоту 915 МГц, обладающего малой массой, соизмеримой с массой и питающими напряжениями магнетрона на частоте 2450 МГц, но с КПД не менее 80%, при КСВ нагрузки порядка 1,2.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

- 1. Уменьшить массу и габаритные размеры магнетрона на частоту 915 МГц, сравнимые с аналогичными параметрами магнетрона на частоте 2450 МГц.
- Создать магнетрон на частоте 915 МГц с величинами напряжений питания, равными аналогичным параметрам на частоте 2450МГц, но без уменьшения КПД и с увеличенной мощностью по сравнению с аналогом не менее чем в 2 раза.
- 3. Обеспечить электромагнитную совместимость магнетрона. Уменьшить выход паразитного СВЧ излучения из катодной ножки и его воздействие на обслуживающий персонал, источник питания и другие электронные приборы. Для решения этой проблемы разработать и установить на катодную ножку компактный дроссель, который обеспечит ослабление не менее 20 dB.
- 4. Разработать СВЧ камеру на частоту 915 МГц объемом не более 50 литров.
- Провести сопряжение магнетрона по параметрам питания и по электрическим параметрам в экспериментальном образце печи нового поколения.

Изложенное выше определило актуальность работы и её цель.

ВВЕДЕНИЕ

Можно выделить основные области применения СВЧ нагрева– пищевая, резинотехническая и текстильная отрасли промышленности. Здесь важную роль играют такие характеристики, как КПД процесса, возможность автоматизации и высокое качество продукта. Имеются перспективы внедрения СВЧ-нагрева и сушки в фармацевтическую промышленность, обработку древесины и сельское хозяйство. Расширяется применение технологии быстрого нагрева в столовых, больницах, школах и т.п., массовое использование микроволновых печей в быту уже хорошо известно.

Эффект микроволнового нагрева основан на поглощении электромагнитной энергии в диэлектриках. Поля СВЧ проникают на значительную глубину, которая зависит от свойств материалов. Взаимодействуя с веществом на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движение электронов, что приводит к преобразованию СВЧ-энергии в тепло.

СВЧ-энергия – очень удобный источник тепла, обладающий в ряде применений несомненными преимуществами перед другими источниками. Он не вносит загрязнений при нагреве, при его использовании отсутствуют какие-либо продукты сгорания. Кроме того, легкость, с которой СВЧ-энергия преобразуется в тепло, позволяет получить очень высокие скорости нагрева, при этом в материале не возникает разрушающих термомеханических напряжений[1]. Генераторное оборудование полностью электронное и работает практически безынерционно, благодаря чему уровень мощности СВЧ и момент ее подачи можно мгновенно изменять. Сочетание СВЧ-нагрева с другими методами нагрева (паром, горячим воздухом, ИК-излучением и др.) дает возможность конструировать оборудование для выполнения различных функций, т.е. СВЧ-нагрев – позволяет создавать новые технологические процессы, увеличивать их производительность и повышать качество продукции.

Для правильной оценки применимости СВЧ-энергии в специальных процессах требуется детальное знание свойств материала на различных частотах и

на всех стадиях процесса. Поглощенная мощность и глубина, на которую эта мощность проникает в материал, определяется тремя факторами: диэлектрической проницаемостью материала, частотой генерации и геометрией СВЧ-системы [1-8].

В настоящие время возникла необходимость создания нового поколения профессиональных кухонных СВЧ печей с большей производительностью, чем это присуще бытовым кухонным печам на частоте 2450 МГц. Существующие в данный момент на этой частоте СВЧ печи ограничены по своим возможностям малым размером обрабатываемого продукта и малой глубиной проникновения СВЧ энергии. Такие печи пригодные в основном для одновременного разогрева и приготовления пищи одной, двух порций.

Для оперативной работы кафе, ресторанов, гостиниц и других пунктов общественного питания требуются СВЧ печи небольших размеров, с малым потреблением электрической энергии, но достаточно эффективные для пищевой обработки продуктов при вместимости 5-8 кг в объеме 40-50 литров.

В «ЗАО «НПП «МАГРАТЕП» было принято решение создать бытовую кухонную СВЧ печь на частоте 915 МГц. Таких кухонных бытовых печей в настоящее время нет.

На частоте 915 МГц глубина проникновения СВЧ энергии возрастает, но приборы имеют большие размеры и работают в большинстве случаев в магнитной системе катушечного типа, что увеличивает без того большие размеры и массу СВЧ генератора. В основном востребована мощность на этой частоте от 25 до 300 кВт для мощных промышленных СВЧ печей [5], представленных на Рисунках 1, 2, 3.



Рисунок 1 Двухкамерная промышленная печь QMP2103 – система непрерывного нагрева. Мощность 225 - 300 кВт на частоте 915 МГц. Используется для сушки бекона и других продуктов. (права фирмы Amana Appliances)

На Рисунке 2 представлена СВЧ установка периодического действия, мощностью 50 кВт для сушки древесины.



Рисунок 2 СВЧ установка для сушки древесины.

Для разморозки мясных блоков применяются установки как периодического действия мощностью от 5 до 50 кВт Рисунок 3, так и непрерывного мощностью 50 – 200 кВт.



Рисунок 3 СВЧ дефростер фирмы «Амтек».

Существующие в настоящее время на частоте 2450 МГц СВЧ печи ограничены по своим возможностям малым размером СВЧ камер (~20-30л) и малой глубиной проникновения СВЧ энергии в приготовляемый продукт. Такие печи пригодны в основном для обеспечения потребностей одной семьи [29, 32, 63].

Для печей, предназначенных для работы в небольших кафе, школах, больницах и т.п. требуются СВЧ печи, небольших размеров, но с малым потреблением электрической энергии и достаточно эффективные для пищевой обработки продуктов при вместимости порядка 40-100 л.

Настала необходимость создавать малые печи, достаточные для работы в малых предприятиях (кафе, школьных столовых и т.п.) – это означает продвижение таких печей в диапазон 915 МГц с уровнем выходной мощности порядка 1-3 кВт.

Для создания экономичной кухонной бытовой СВЧ печи на частоте 915 МГц мощностью 1-3 кВт требуется создание компактного эффективного источника СВЧ энергии. Наиболее распространенным источником СВЧ энергии в настоящее время

является магнетрон. Магнетрон привлекает своим высоким КПД, устойчивостью работы в условиях повышенных температур.

Создание магнетрона на частоте 915 МГц с выходной мощностью (1-3) кВт для бытовой кухонной СВЧ печи должно удовлетворять ряду специфических требований, усложняющих задачу по созданию такого магнетрона. В том числе

- габаритные размеры магнетрона на частоте 915 МГц не должны существенно отличаться от размеров магнетрона на частоте 2450 МГц;

- магнетрон должен работать на основе серийного источника питания для магнетрона на частоте 2450МГц;

- должен быть создан компактный фильтр для подавления обратного внетрактового излучения через катодную ножку магнетрона;

- выходная мощность магнетрона должны быть выше, чем у кухонных магнетронов на частоте 2450 МГц не менее, чем в 2 раза при КПД порядка 80-85%.

Таким образом, речь идет о создании компактного и экономичного источника СВЧ энергии для нового поколения бытовой кухонной СВЧ печи на частоте 915 МГц. Соискателю при этом необходимо провести комплексную работу, включающую в себя:

Создание малогабаритного магнетрона, сопряжённого с промышленным источником питания [63].

Разработать малогабаритную резонансную камеру для новой СВЧ печи.

Исследовать работу магнетрона в экспериментальной печи нового поколения.

Научная новизна

Даны основные рекомендации, подтвержденные практическими результатами, по изготовлению малогабаритного магнетрона длинноволнового диапазона (915 МГц) соизмеримого по габаритам с магнетроном коротковолнового диапазона (2450 МГц);

Для чего:

- Увеличивается индуктивность резонаторной системы при сохранении теплового режима работы посредством уменьшения размеров ламелей резонаторной системы.

- Применяется оригинальный малогабаритный фильтр для подавления внетрактового СВЧ излучений из магнетрона [13]

- Увеличивается емкость «Тяжелых связок» без искажения рабочего вида колебаний в магнетроне (П-вид), посредством симметричного контакта связок с ламелями анодного блока и соблюдения определенного допустимого расстояния между связками [12].

Даны рекомендации, подтвержденные практическим результатом, по увеличению КПД малогабаритного магнетрона на частоте 915 МГц с уровнем мощности 1-3 кВт по сравнению с КПД коротковолнового магнетрона на частоте 2450 МГц при сохранении стандартного источника питания.

Для чего:

- Применяются специальные магнитные полюса, уменьшающие неравномерность магнитного поля до величины[12]

$$\frac{\Delta B}{B} \le 2,5\%$$

что способствует выравниванию плотности тока с катода магнетрона, по всей его длине

- Уменьшается неравномерность электрического поля вдоль длины катода специальным распределением связок для данной резонаторной системы

$$\frac{\Delta E}{E} \le 2\%$$

- Применен оксидный катод с электрическими параметрами $U_{\pi} = 3$ B, $I_{\pi} = 8$ A, вместо обычного применяемого прямонакального торированного карбидированного катода с $U_{\pi} = 3,2$ B, $I_{\pi} = 12$ A, при сохранении долговечности работы магнетрона не менее 2500 часов, что позволило снизить мощность накала в 1,5 раза [63].

- Проведен расчет и изготовление компактной СВЧ камеры для малогабаритного магнетрона на частоте 915 МГц, подтвержденные экспериментальными данными.

Проведены испытания разработанного магнетрона в экспериментальной кухонной СВЧ печи нового поколения на частоте 915 МГц.

Итогом решения этих задач является получение новых научных результатов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Для создания магнетрона непрерывного действия средней мощности 1-3 кВт на частоте 915 МГц с габаритными размерами, соизмеримыми с магнетроном на частоте 2450 МГц с КПД не менее 80 %, сопряженного с промышленным источником питания необходимо: [12]:

а) Увеличить индуктивность резонаторного блока, уменьшив высоту ламелей на 30÷60% в области, примыкающей к цилиндру анодного блока с сохранением теплоотвода на корпус магнетрона.

б) Увеличить емкость колец связи сделав их высоту равной 15-20% от высоты ламелей без влияния их электрических полей в зоне взаимодействия посредством симметричного соединения к ламелям.

в) Изменения магнитного поля по высоте катода должно быть не более 2.5 %, что обеспечивает примерно одинаковую плотность тока с катода магнетрона.

2. Для сохранения минимальных размеров магнетрона при обеспечении ослабления обратного внетрактового излучения через катодную ножку не менее 20 дБ использовать фильтр в виде свернутой структуры на основе четвертьволновой линии. [13].

3. Для создания СВЧ камеры объемом 45 литров на частоте 915 МГц для бытовой кухонной СВЧ печи использовать волновод сечением 430х270х410 мм с рабочими видами колебаний H₂₀₂ и H₃₀₁.

Практическая ценность работы

В результате проведенной работы создан магнетрон на частоте 915 МГц с выходной СВЧ мощностью 1-3 кВт, но:

- с уменьшенной массой и габаритами, сравнимыми с аналогичными параметрами магнетрона на частоте 2450 МГц:

- с величинами напряжений питания, равными аналогичным параметрам для магнетрона на частоте 2450 МГц, но с увеличенным КПД и выходной мощностью по сравнению с аналогом;

- с компактным дросселем на катодную ножку, который обеспечивает ослабление внетрактового излучения из катодной ножки не менее 20 dB.

- проведено совмещение малогабаритного магнетрона и разработанной СВЧ камеры с источником питания в экспериментальном образце печи нового поколения.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации. Автором сделано следующее:

- 1. Разработка общей концепции диссертации и постановка задач исследований.
- Разработаны принципы создания малогабаритного магнетрона на частоте 915 МГц, соизмеримого по размерам и параметрам с бытовым магнетроном на частоте 2450 МГц, с КПД не менее 80 %, подтвержденные экспериментально [12].
- Проведено сопряжение созданного магнетрона с серийным промышленным источником питания, используемым для питания бытового магнетрона на частоте 2450 МГц. При этом КПД магнетрона не менее 80 % при КСВН 1,2.
- 4. Проведен расчет и изготовление СВЧ камеры для кухонной печи на частоте 915 МГц объемом не более 45 литров с тремя резонансными видами колебаний. Камера была полностью использована в СВЧ печи на частоте 915 МГц.
- Проведен расчет, изготовление и внедрение в разработанный магнетрон оригинального фильтра для подавления внетрактового излучения СВЧ энергии через катодную ножку магнетрона [13].
- Руководство работами и непосредственное участие во внедрение результатов диссертации в производстве первых СВЧ печей на частоте 915 МГц.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Положения и результаты, выносимые на защиту, достаточно обоснованы и базируются:

- на результатах расчетов с использованием известного математического аппарата, адекватно описывающего физические процессы в ЭВП и поведение электронов в скрещенных магнитных и электрических полях;

- на результатах испытаний ЭВП и его узлов с использованием аттестованных методик измерений;

- на практических результатах полученным автором во время проведения испытаний.

Апробация результатов работы

- Результаты работы опубликованы в материалах международной научнотехнической конференции: "Актуальные проблемы электронного приборостроения", «АПЭП-2014», Саратовский Государственный Технический Университет имени Гагарина Ю. А. 25-26 сентября 2014 г.
- 2. Четвертая научно- техническая конференция молодых ученых и специалистов ОАО «НПП «Исток» им. Шокина» 27-28 мая 2014 г. Фрязино.
- 3. Научно-техническая конференция молодых специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина» 2016г. Фрязино.
- 4. Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017 М.:НИЯУ МИФИ, 2017. С. 64

Публикации

По материалам диссертации автором опубликовано 8 печатных работ, из них 3 работы в журналах по перечню ВАК для защиты кандидатских диссертаций, получено 2 патента РФ.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

- Каргин А. Н., Морозов О. А., Савенко Г. П., Кулибаба Л. В., Федотов В. В. «Малогабаритный магнетрон на 915 МГц для микроволнового нагрева». Научно технической сборник Электронная техника. Серия 1, СВЧ техника 2013, В.2(517), с. 14- 21.
- Каргин А. Н., Морозов О. А., Воробьев И. Г., Савенко Г. П., Симоненко А. Н., Федотов В. В. «Современные мощные магнетроны дециметрового диапазона и устройства на их основе». Научно технической сборник Электронная техника. Серия 1, СВЧ техника 2013, В.2(518), с. 117-124.
- Каргин А. Н., Морозов О. А., Морозов А. О., Савенко Г. П., Симоненко А. Н., Федотов В. В. «Электронная оптика современных магнетронов».
 Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, 2015, ВЫП. 3(526)

Патенты и свидетельства.

- Патент №2588039. Магнетрон для микроволнового нагрева /Федотов В. В. Морозов О. А. Каргин А. Н. Савенко Г. П. Кистин Б. Я. Ратиловский П. П.
- Патент на полезную модель № 129294 РФ. Магнетрон для микроволнового нагрева / О. А. Морозов, А. Н. Каргин, Г. П. Савенко, В. В. Федотов, Л. В. Кулибаба. Приоритет 25.01.13.

Другие публикации по теме диссертации.

1. Федотов В. В. Каргин А. Н. Савенко Г. П. «Магнетрон мощностью 3 кВт на частоте 915 МГц для перспективных систем нагрева». «Актуальные проблемы электронного приборостроения", «АПЭП-2014», Саратовский

Государственный Технический Университет имени Гагарина Ю. А. 25-26 сентября 2014 г.

- Морозов А.О., Федотов В.В., Прокопенко А.В., Габдрашитова Д.В. СВЧустановка для обработки зерновых культур Сб. науч. тр. III Международная конференция. Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017 М.:НИЯУ МИФИ, 2017. С. 64
- А.Н. Каргин, А.О. Морозов, О.А. Морозов, Г.П. Савенко, А.Н. Симоненко,
 В.В. Федотов, «Современные мощные магнетроны дециметрового диапазона». ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ. № 4 (9) Декабрь 2015. С. 54

ГЛАВА 1. УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНЕТРОНА

1.1. СОХРАННИЕ РАЗМЕРОВ МАГНЕТРОНА ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА БОЛЕЕ НИЗКУЮ ЧАСТОТУ

При переходе от частоты 2450 МГц на более низкую частоту 915 МГц увеличивается диаметр резонаторной системы, потому что нужно увеличить емкость или индуктивность (по отдельности или одновременно) в соответствии с формулой резонансной частоты магнетрона [15]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{CB}+C_a)}} \tag{1}$$

где L - индуктивность ламелей,

Са - емкость на концах лопаток (емкость анодная),

С_{св} - емкость связок.

Для минимизации габаритов желательна конструкция с большой суммарной емкостью ($C_a + C_{c_B}$), что неизбежно снижает волновое сопротивление Z_0 и создает проблему срыва генерации.

Как известно, существует электронный механизм ограничения выходной мощности магнетрона, обусловленный достижением критической бриллюэновской плотности заряда в спицах [14]. Физически этот эффект объясняется уменьшением скорости вращения электронных спиц при понижении рабочей частоты, соответственно увеличивается плотность пространственного заряда, что кладет предел росту анодного тока и мощности [14].

$$\frac{P_{max}}{NH_a} = \frac{Q_{\rm BH}}{\pi C_{11}} \left(\frac{2\eta_a \varepsilon_0 H_k}{\pi \alpha F_c H_a}\right) f_0 U_a^2,\tag{2}$$

где *N* - число резонаторов;

H_к, H_а - высота катода и анода соответственно;

П_а - анодный КПД;

Fc - критическая функция, принимающая значения от 3,7 до 7,2 в зависимости от коэффициента формы ячейки взаимодействия, а = 1,0... 1,3;

 f_0 - частота генерации;

 $U_{\rm a}$ - напряжение анода;

С₁₁ - погонная емкость на один резонатор, связанная с волновым сопротивлением формулой

$$C_{11} = \frac{C_a + C_{CB}}{NH_a} = \frac{1}{2\pi f_0 Z_0 NH_a}$$
(3)

Как видно из формулы (2), максимальная мощность пропорциональна $f_0 U_a^2$, таким образом, с понижением рабочей частоты получить большую мощность труднее [8-29, 37-61].

Согласно этой модели, выбираются резонаторная система и величина магнитного поля. Чтобы избежать срыва генерации необходимо повысить амплитуду СВЧ-напряжения на ламелях за счет увеличения добротности Q_{вн}. Как показывают проведенные расчеты, для генерации мощности до 3-4 кВт величина полного сопротивления резонаторной системы Q_{вн}Z₀ должна быть не менее 850 Ом.

Для обеспечения минимальных габаритов предлагается выбрать конструкцию с «тяжелыми» связками и большой общей емкостью резонаторной системы, показанной на Рисунке 4.



Рисунок 4 Модель резонаторной системы магнетрона.

Однако при уменьшении Z_0 приходится увеличивать Q_{BH} и снижать контурный и общий КПД магнетрона, что нежелательно [12-22]. Была выбрана оптимальная 10-резонаторная система, которую следует нагружать до величины $Q_{BH} \cong 140$, показанная на рисунке 5. Слева для сравнения показана 16-резонаторная система аналогичного американского магнетрона LCW высотой 25 мм [10], а справа – 10-резаторная система печного магнетрона фирмы LG 2M246 на частоте 2450 МГц.



б

в

Рисунок 5 Резонаторные системы магнетронов а) LCW 915 МГц 3 кВт, б) созданный магнетрон на 915 МГц 3 кВт, в) LG 2M246 на 2450 МГц 1 кВт.

а

Электронный механизм ограничения выходной мощности магнетрона объясняется уменьшением скорости вращения электронных спиц при понижении рабочей частоты. Соответственно увеличивается плотность пространственного заряда в спице, что кладет предел росту анодного тока. Согласно рассчитанной модели в CST Studio[45, 46] и была выбрана резонаторная система [12].

Уменьшение габаритов магнетрона обусловлено выбором простой резонаторной системы основанной в соответствии с расчетом на компромиссном выборе величин индуктивности и емкости, с десятью ламелями и так называемыми «тяжелыми» связками большой емкости, обеспечив одновременное увеличение емкости связок и индуктивности резонаторной системы.

Для увеличения индуктивности резонаторной системы, высота ламели h была уменьшена на 50% в области, примыкающей к цилиндру анодного блока, как показано на рисунке 4. Дальнейшее уменьшение высоты лопаток ограничивается необходимостью отвода тепла, выделяющегося на концах лопаток при работе магнетрона.

На рисунке 6 показан график, где дано уменьшение частоты резонаторного блока с уменьшением высоты ламели.



Рисунок 6 Уменьшение частоты при увеличении проточки ламели.

Где, Н – высота ламелей;

h – проточка ламели со стороны цилиндра анодного блока в данном магнетроне;

критическая зона – переход в которую может привести к расплавлению ламелей при максимальной мощности магнетрона.

Дальнейшее увеличение проточки может привести к расплавлению ламелей из-за критического уменьшение теплоотвода на корпус магнетрона.

Расчет температуры ламели проводился по формулам из [49]

$$T_a = T_1 + \frac{P_{\text{\tiny HCT}}l}{NS_{\pi}\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} (\eta + \eta_e) \right]$$
(4)

Где $\Pi = \Pi_c \cdot \Pi_e$ – полный КПД магнетрона;

T₁ – температура на внешнем конце ламели, примыкающем к корпусу анодного блока;

Рист – мощность источника;

1 - длина ламели;

П_с − КПД резонаторной системы;

N – количество ламелей;

S_л-площадь поперечного сечения ламели, см²;

λ – коэффициент теплопроводности материала ламели, Вт/см°С.

Мы имеем Р_{ист}=3700 Вт; Π_e =0,88; Π_c =0,94; S_л=0,8 см²; 1=2,2 см²; N=10; λ =3,84 вт/см°С.

Из этого следует;

$$T_a = T_1 + \frac{3700 \cdot 2, 2 \cdot 0, 82}{10 \cdot 0, 8 \cdot 3, 84} = T_1 + 220^{\circ} \text{C}$$
(5)

Если $T_1 = 40^{\circ}$ С, то $T_a = 260^{\circ}$ С.

При увеличении проточки ламели со стороны цилиндра анодного блока в данном магнетроне больше чем h+30% (рисунок 6), температура ламели увеличится более 500°C, что приведет к большому уходу частоты из-за теплового расширения и выделения газа из медной ламели [62, 68].

Для увеличения отвода тепла от ламелей, можно в них проделать каналы для охлаждающей жидкости, но эта операция неприемлема для серийного производства из-за сложности в изготовлении.

Увеличение емкости связок достигается за счет увеличения высоты колец связи и уменьшения зазора между ними. Расчеты проводились в пакете прикладных программ CST STUDIO [45].

Однако при увеличении емкости связок обнаружилась проблема, описанная в [17-19] электрическое СВЧ поле колец связи нарастает и проникает в рабочее пространство анод-катод. Кроме того, появляется поле между связками, расположенными на разных сторонах анодной системы. Эти обнаруженные эффекты искажают поле основного π -вида, что приводит к снижению предельной мощности магнетрона и его КПД. Для уменьшения искажений, вносимых «тяжелыми» связками, контакты связок с ламелями, в отличие от всех известных конструкций, выполнены симметрично [12], как показано на Рисунке 7.



Рисунок 7 Резонаторная система магнетрона в программе CST STUDIO

Это выполнено впервые, что подтверждено полученным патентом на полезную модель [12].

На Рисунке 8 показано распределение электрического СВЧ-поля вдоль оси резонаторной системы магнетрона z. Несмотря на «тяжелые» связки, сохраняется хорошая однородность СВЧ-поля.

Е/Е_{тах} отн. ед.



Рисунок 8 Распределение электрического СВЧ-поля вдоль оси магнетрона

Ближайший паразитный вид (N/2 - 1) имеет частоту 2730 МГц, то есть разделение частот резонаторной системы составляет 198 %.

В итоге уменьшение массогабаритных показателей обеспечиваются тем, что магнетрон содержит анодный блок, состоящий из цилиндра, десяти лопаток, примыкающих одними концами к внутренней поверхности цилиндра и расположенных радиально к оси цилиндра с образованием другими их концами, соосного с цилиндром анодного отверстия, и двух пар концентричных кольцевых связок, соединенных с соответствующими торцами лопаток через одну с образованием пяти мест соединения на каждую связку, катодно-подогревательный узел, два расположенных соосно с цилиндром анодного блока полюсных наконечника со сквозными центральными отверстиями, два кольцевых магнита, установленные на полюсные наконечники, и коаксиальный вывод энергии, при этом лопатки в области присоединения к внутренней поверхности цилиндра выполнены высотой на 50% меньше высотой 20% от высоты лопаток со стороны анодного отверстия, кольцевые связки выполнены высотой 20% от высоты лопаток со стороны анодного отверстия, а радиальное расстояние между концентричными кольцевыми связками составляет 15% от их высоты[12].

Расположение мест соединения кольцевых связок с торцами лопаток симметрично относительно плоскости, проходящей перпендикулярно оси цилиндра анодного блока через середину высоты лопаток, позволяет повысить предельную мощность данного магнетрона и его КПД.

ГЛАВА 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И КАТОДНО ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ МАГНЕТРОНА.

2.1. Определение величины рабочей магнитной индукции.

Если эта величина не оговорена техническим заданием, то весьма приближенно она может быть выбрана по аналогии с известным прототипом проектируемого магнетрона и посчитана [17-19].

За исключением магнетронов, работающих в режимах низких полей, для большинства случаев с приемлемой точностью рабочую магнитную индукцию можно рассчитать по формуле (5), приведенной в [19]

$$B = K_1 \frac{13,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{U_a}}{d_a (1 - \sigma^2)},$$
(5)

где Ua – анодное напряжение, выражается в вольтах;

В - рабочая магнитная индукция

К – коэффициент увеличения критического магнитного поля

σ – отношение диаметра катода к аноду

d_a – диаметр анода.

Для предварительного выбора величины B можно коэффициент увеличения критического магнитного поля принять равным K = 1,3—1,7 и для магнетронов миллиметрового диапазона K=1,1—1,5.

Анодное напряжение, фигурирующее в этой формуле, является всегда заданным, в нашем случае оно равно 4 кВ для сопряжения магнетрона с источником питания, применяемым в бытовой СВЧ печи [63].

Рассчитанное таким путем значение В полезно сравнить с данными, имеющимися в приложениях на основе анализа параметров некоторых типов промышленных магнетронов, рекомендуемых каталогами зарубежных фирм.

Полученную величину В следует затем скорректировать таким образом, чтобы расчетное значение анодного напряжения оказалось бы близким к

заданному. При корректировке *В* следует иметь в виду, что значительное уменьшение рабочей магнитной индукции может привести к возрастанию электронного смещения частоты (ЭСЧ) в области рабочих значений анодного тока и к снижению электронного КПД, чрезмерное же увеличение *B*—к увеличению электронного смещения частоты в области малых токов и к сужению диапазона анодных токов, в котором ЭСЧ минимально [19, 20].

Таким образом, корректировка B должна быть проведена с одновременной корректировкой d_a и d_κ с тем, чтобы не слишком значительно уклоняться от ранее рассчитанной величины. Расчет и дальнейшая корректировка после экспериментов дает B=0,165 Тл.

2.2. Оптимизация формы магнитного поля.

Для повышения КПД прибора необходимо однородное магнитное поле [9-26, 45-56]. Это обусловлено характером электронных процессов в магнетроне. Критерий качества магнитной системы вытекает из требования равномерного распределение тока по высоте катода. Если рассмотреть магнетрон как отдельные сегменты по высоте с различным осевым магнитном полем и одинаковым анодным напряжением, то ток анода на каждом сегменте будет отличаться, и зависеть только от магнитного поля [14, 15, 59, 69-71].

Необходимо рассчитать максимально допустимое смещение магнитного поля вдоль оси магнетрона.

Допустимая неоднородность магнитного поля рассчитывается по следующей формуле (6) из [15].

$$\frac{\Delta B}{B} \le p \frac{R_{\beta}}{R_a} \tag{6}$$

Где, R_Д – дифференциальное сопротивление;

Р – изменение плотности тока на краях анодного блока;

R_a - статическое сопротивление магнетрона.

Определяем дифференциальное сопротивление по формуле (7).

$$R_{\mathcal{A}} = \frac{U_a - U_x}{I_a} \tag{7}$$

Где U_x – напряжение Хартри.

Как правило, рабочее напряжение реального магнетрона превышает напряжение Хартри не более чем на 15...20 %. Из этого R_д=0,56 Ом.

Задав степень изменения плотности тока на краях анодного блока не более р (для практики приемлемо р ≤ 0,2), определим допустимую неоднородность поля:

$$\frac{\Delta B}{B} = 2,5 \%.$$

Повышение КПД и уменьшение смещения рабочей частоты обеспечивается тем, что каждый полюсный наконечник выполнен в виде обращенных к анодному блоку охватывающего кольца и примыкающей к нему конусной частью. При этом диаметр сквозного отверстия полюсного наконечника $d_{orb}=(1\div1.3)d_{k}$, наружный диаметр торца конической части полюсного наконечника, обращенного к анодному блоку $d_{koh}=(1\div1.2)d_{a}$, внутренний диаметр цилиндрической части полюсного наконечника $d_{цил}=(1\div1.2)h_{non}$, рисунок 9.



Рисунок 9 Форма полюсных наконечников.

 Γ де d_к - диаметр катода,

d_a - диаметр анодного отверстия,

h_{пол} - расстояние между полюсными наконечниками.

Для обеспечения анодного напряжения 4 кВ потребовалось увеличенное до 0,16-0,18 Тл магнитное поле. При меньшем поле пришлось бы увеличить диаметр анода и катода, но это практически невозможно при осевом выводе энергии, поскольку точка контакта петли связи уходит по радиусу далеко под полюсный наконечник.

Для получения необходимого магнитного поля 0,16-0,17 Тл пришлось использовать магниты неодим-железо-бор, Nd-Fe-B. Преимуществами их являются способность работать без потерь характеристик в большом температурном

диапазоне от – 60 до + 240 градусов Цельсия, но на практике выявились недостатки со стабилизацией магнитного поля с изменением температуры и пришлось перейти на более дорогие магниты SmCo. По магнитным свойствам остаточной индукции и коэрцитивной силы, по намагниченности магниты SmCo, имеют параметры ниже чем магниты Nd-Fe-B, но преимуществом магнитов SmCo по отношению к магнитам Nd-Fe-B является высокая коррозионная устойчивость и хорошая стабильность параметров при температурах до 350° C.

Расчеты проводились в пакете прикладных программ CST STUDIO. Модель и расчетные данные показаны на рисунках 10, 11 и 12.



Рисунок 10 Модель магнитной системы магнетрона в CST Studio.



Рисунок 11 Магнитные поля магнитной системы с полюсами магнетрона.



Рисунок 12 Распределение магнитного поля на оси магнетрона по длине катода.

Мы получили отношение

$$\frac{\Delta B}{B} = 2 \%,$$

данное распределение нас устраивает. При измерениях на макетном образце эта цифра подтвердилась, но датчик в измерители магнитного поля имеет большую площадь, и дает небольшую погрешность, которую необходимо учитывать.



Рисунок 13 Форма магнитного поля по длине поверхности катода.

Из рисунка 13 видно, что перепад магнитного поля на радиусе поверхности катода по его длине не превышает 2% и имеет форму «вогнутой бочки». Данная

форма поля поджимает электронный поток на торцах катода и не допускает паразитной утечки тока, приводящей к перегреву полюсных наконечников, потери КПД и появлению шумов [9-26].

2.2. Оптимизация катодно-подогревательного узла.

Для опытных образцов был выбран оксидный катод, способный обеспечить требуемую плотность тока J=0.23 A/см² при меньшей мощности накала (30 Вт против 46 Вт у магнетрона LG 2M246).

Однако в мощных магнетронах существует также предел СВЧ мощности изза перегрева катода. Мощность обратной бомбардировки не должна превышать мощности накала при рабочей температуре катода, тогда при выключении накала катод сохраняет рабочую температуру [9-12]. При дальнейшем увеличении тока анода катод перегревается, что проявляется в увеличении торцевого тока, снижении КПД [14, 15] и повышенном распылении оксидного покрытия [16]. Согласно проведенным теоретическим расчетам и практическим исследованиям, бомбардировки допустимая мощность для рассматриваемого магнетрона состовляет 30 Вт достигается при токе анода 0,9 А при этом температура катода не 800°C. превышает Измерения проводились с помощью современного оборудования с малой погрешностью.

Предельная мощность обеспечивается при условии равномерной нагрузки катода, другими словами - при одинаковой температуре его поверхности. На практике необходимо иметь допустимый перепад температуры не более 20-30° [16]. Для выполнения этого условия требуется никелевый керн катода с толщиной стенки не менее 1 мм, а также уменьшение отвода тепла по держателю, который следует изготовить из никелевой или нержавеющей трубки с толщиной стенки не более 0,3 мм [12]. Таким образом, катод должен охлаждаться в основном за счет естественного излучения с эмитирующей поверхности. На рисунке 14 показаны
графики эмиссионного тока в диодном режиме магнетрона, без магнитного поля при напряжении анода U_a= 500В при толщине стенки керна 0.5 мм и 1 мм.



Рисунок 14 Зависимость тока анода от тока накала катода с толщиной керна 1 мм и 0,5 мм в диодном режиме.

По графикам видно, что при толщине стенке керна в 1 мм, выход эмиссии на «полочку» происходит при токе накала 8 А, а при толщине 0.5 мм при 10 А. Эксперименты проводились многократно на разных образцах прибора.

Техническими результатами при разработке магнетрона являются уменьшение массогабаритных показателей, повышение предельной мощности магнетрона и КПД, уменьшение уровня паразитных шумов, уменьшение мощности накала вплоть до полного отключения его при токе анода более 0,7 А и возможность работы при анодном напряжении 4±0,5 кВ.

2.3. Расчет контура вывода энергии

Расчет вывода энергии магнетрона проводился с условием его работы на несогласованную нагрузку с возможностью кратковременно выдерживать

ухудшения КСВН до 3. Расчеты проводились с помощью пакета прикладных программ CST Studio 14. На рисунке 15 показана модель, построенная в программе CST Studio 14 после оптимизации на частоте 915 МГц .



Рисунок 15 Модель резонаторной системы с выводом энергии магнетрона на частоте 915 МГц.

Размеры штыря вывода энергии и внешнего проводника переходного коаксиала вывода энергии, подбирались с учетом увеличения тока и напряженности электрического поля при увеличении КСВН до 3.

Минимальное растояние между штырем вывода энергии и краями отверстия в полюсном наконечники состовляет 2 мм. Напряженность электрического поля в этом месте на частоте 915 МГц при максимальной расчетной мощности, не превышает пробивного в вакууме.

На рисунке 16 показана структура электрического поля на частоте 915 МГц, на *π*-виде колебаний.



Рисунок 16 Структура электрического поля вывода энергии магнетрона на частоте 915 МГц.

Коаксиальный осевой вывод энергии соединяется с торцом одной из ламелей анодного блока и обеспечивает внешнюю добротность $Q_{BH} = 150$ при собственной добротности $Q_0 = 1190$.

2.4. Согласование вывода энергии магнетрона и КВП с размерами 195*30 мм

Для применения магнетрона в пищевой промышленности на стандартных кухнях ресторанов и кафе необходимо согласовать его с камерой СВЧ минимально возможным по размерам переходом [26-29]. В большинстве случаев для маломощных магнетронов на частоте 915 МГц выбирается коаксиальный волновод, что ограничивает их применение из-за неудобного исполнения

конструкции [17-19]. На практике выявлялись проблемы с ухудшением внутренних и внешних контактов компонентов коаксиального тракта, что вызывало искрение и пробои с последующем выходом прибора из строя. Принято решение использовать стандартный волновод на частоту 915 МГц сечением 220*104 мм. В дальнейшем, в связи с малой мощностью применяемого магнетрона, удалось уменьшить высоту малой стенки волновода до 30 мм и согласовать с выводом энергии [38-44]. В итоге выбран волновод сечением 195*30 мм.

Расчеты по согласованию данного волновода и вывода энергии велись с помощью программы CST Studio 14 при условии ухудшения КСВН до 3.

На рисунке 17 показана модель коаксиально волноводного перехода, построенного в данной программе. Расстояние от вывода энергии до короткозамкнутой стенки получилось $1/3 \lambda$, а диаметр шайбы вывода энергии $1/15 \lambda$.



Рисунок 17 Модель КВП с выводом энергии магнетрона на частоту 915 МГц

На рисунке 18 показано распределение электрического поля на частоте 915 МГц.



Рисунок 18 Распределение электрического поля в КВП с выводом энергии магнетрона на частоту 915 МГц.

Путем оптимизации удалось добиться КСВ данной конструкции порядка 1.1 в полосе частот 915±10 МГц. На рисунке 19 показан график зависимости КСВ от частоты.



Рисунок 19 Зависимость КСВ от частоты, КВП с выводом энергии магнетрона на частоте 915 МГц.

На рисунке 20 показан разработанный КВП с магнетроном, применяемым в СВЧ печи на частоте 915 МГц.



Рисунок 20 КВП с магнетроном.

2.5. Экспериментальные результаты проверки магнетрона

Стандартный печной магнетрон на частоте 2450 МГц работает от источника питания собранному по схеме удвоения напряжения [29-63].

Блок питания печного магнетрона на частоте 2450 МГц должен обеспечивать подачу анодного напряжения Ua = 4,0 кВ и переменное напряжение накала 3 - 4 В. При этом величина анодного тока составляет примерно 350 мА, а тока накала 10 - 12 А. Указанные величины могут незначительно изменяться в ту или иную сторону в зависимости от типа магнетрона и требуемой мощности.

Конструктивно блок питания состоит из трансформатора, диода и конденсатора и собран по схеме удвоения напряжения показанной на рисунке 21 подробно описанный [63].



Рисунок 21 Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока питания СВЧ печи, работающей на частоте 2450 МГц.

Рассмотрим работу схемы более подробно. Один из выводов высоковольтной обмотки трансформатора соединен с его корпусом, который обычно заземляется. Будем считать, что потенциал на этом выводе постоянен и равен нулю. Тогда на втором выводе напряжение в течение периода будет изменяться от +U до -U. В

моменты времени, когда напряжение на выводе положительно, диод находится в открытом состоянии, напряжение на магнетроне равно нулю, а конденсатор будет заряжаться до амплитудного значения переменного напряжения около 2000 В [29, 63].

Когда напряжение поменяет свой знак, диод окажется в запертом состоянии, а на магнетрон попадет удвоенное напряжение, образованное суммой напряжений на трансформаторе и на зарядившемся конденсаторе. Поскольку в отрицательный полупериод напряжение на трансформаторе возрастает по синусоиде, от нуля до амплитудного значения, магнетрон начнет генерировать мощность не сразу, а спустя некоторое время, после того как суммарное напряжение конденсатора и трансформатора достигнет некоторого значения примерно 3.8 кВ.

В этот момент появиться анодный ток и начнется генерация СВЧ мощности, быстро нарастающей от нуля до максимума при 4,0 кВ. Работа магнетрона будет сопровождаться постепенным разрядом конденсатора. В какой-то момент суммарное напряжение начнет снижаться, выходная СВЧ мощность пойдет вниз, пока генерация полностью не прекратится[63].

В следующий полупериод опять начнется зарядка конденсатора и т.д. Графически этот процесс изображен на рисунке 22.



Рисунок 22 Форма токов и напряжений на основных элементах блока питания а) напряжение на трансформаторе, б) напряжение конденсатора, в) анодное напряжение, г) анодный ток.

Как наглядно видно из рисунка 22, магнетрон в микроволновой печи работает только в отрицательный полупериод. Фактически он работает меньше чем один полупериод, поскольку он включается только при достижении напряжением определенной величины и выключается раньше, чем напряжение станет равным нулю. Основным достоинством схемы удвоения является то, что напряжение на выходе трансформатора на превышает 2500 В. Накальная обмотка одним из концов соединена с высоковольтным выводом анодного напряжения трансформатора, поэтому на выводы магнетрона одновременно подается переменное напряжение накала 3-4 В и анодное напряжение 3,8-4,5 кВ.

Рассмотренная схема наиболее часто используется в микроволновых печах, несмотря на присущие ей некоторые недостатки. Главный из них состоит в том, что анодное напряжение подается на магнетрон одновременно с накалом. При работе на средних и малых уровнях мощности, когда магнетрон периодически выключается, катод подвергается многократному нагреву и охлаждению, что снижает его срок службы. Кроме того, в момент включения анодное напряжение подается на холодный катод, поскольку он не успевает разогреться, что также негативно влияет на магнетрон [63].

В нашем случае при использовании оксидного катода в связи с косвенным накалом необходим отдельный источник накала с регулировкой мощности в зависимости от режима работы магнетрона.

При включении нашего магнетрона на частоте 915 МГц, от печного стандартного источника питания сохраняются все параметры анодного тока и напряжения. Средний анодный ток $I_a=350$ мА, пиковый $I_n=900$ мА, напряжение анода $U_a=4$ кВ мощность средняя $P_{cp}=1200$ Вт ,а мощность пиковая $P_n=3200$ Вт.

Использование оксидного катода, способного обеспечить необходимую плотность тока, позволило получить мощность СВЧ свыше 3 кВт, использовав три стандартных источника питания от СВЧ печи на 2450 МГц, подсоединённых параллельно к магнетрону и питающихся от разных фаз с одним нулем. Схема такого источника показана на рисунке 23.



Рисунок 23 Схема источника питания магнетрона 915 МГц, 3 кВт.

Огибающая анодного тока при включении одного источника от фазы «А» представлены на рисунке 24.



Рисунок 24 Огибающие анодного тока при включении одного источника от фазы «А» магнетрона на частоту 915 МГц.

Напряжение анода U_a =4 кВ. Ток анода в пике достигает $I_{a \text{ пик.}} = 0,92$ А. Средний ток по показаниям осциллографа равен $I_{a \text{ ср.}} = 0,35$ А. Средняя мощность равна 1,2 кВт.

Огибающая анодного тока при включении двух источников от фазы «А» + «В» представлены на рисунке 25.



Рисунок 25 Огибающая анодного тока при включении двух источников от фазы «А» + «В» магнетрона на частоту 915 МГц.

Напряжение анода $U_a=4$ кВ. Ток анода в пике достигает $I_{a \text{ пик.}} = 0,98$ А. Средний ток равен $I_{a \text{ ср.}} = 0,68$ А. Средняя мощность равна 2,3 кВт.

Огибающая анодного тока при включении трех источников от фазы «А» + «В» + «С» представлены на рисунке 26.



Рисунок 26 Огибающая анодного тока при включении трех источников от фазы «А» + «В» + «С» магнетрона на частоту 915 МГц.

Напряжение анода U_a=4 кВ, и имеет постоянный уровень. Ток анода постоянный I_a = 0,9 A и имеет пульсации 20%. Средняя мощность равна 3,3 кВт.

Измерение мощности проводилось с помощью направленного ответвителя ослаблением 50 dB. Прибор включался на согласованную нагрузку с КСВН 1,2.

2.6. Сравнение с зарубежными аналогами

Проведены эксперименты нового магнетрона М - 176 на частоте 915 МГц и обычного печного магнетрона в динамическом режиме на согласованную нагрузку, от стандартного источника питания СВЧ печи и даны характеристики аналогов. Результаты проведены в таблице 2.

Магнетрон	Ia(MA)	Ua(B)	Р(кВт)	F(МГц)	КСВН	КПД(%)	MACCA
M-176	350	4200	1,2	915	1,2	81	3
(Магратеп)							
2M286	350	4400	1,150	2450	1,1	78	0,9
(LG)							
M-176	920	4200	3200	915	1,2	82	3
(Магратеп)							
(схема 3 кВт)							
2M290	840	5100	3000	2450	1,1	69	3
(LG)							
Хитачи	850	7500	5000	915	1,1	78	7
CK-147							

Таблица 2 Характеристики магнетронов.

Из (Таблицы 2) видно, что магнетрон М-176 на 915 МГц имеет КПД выше чем магнетроны на частоте 2450 МГц и составляет не менее 80%.

Также проведена проверка работоспособности магнетрона на ухудшение КСВН. Проверка проводилась на 1 кВт и в (Таблице 3) дана сравнительная характеристика.

КСВН	Магнетрон М-176 на	Магнетрон 2М286
	915 МГц	на 2450 МГц
	КПД	КПД
3	68	55

Таблица 3 Сравнительная характеристика магнетронов М-176 и 2М246.

Измерение мощности проводилось с помощью направленного ответвителя после рассогласователя.

Испытания проводились в течении 30 минут. Приборы по окончанию проверки были включены на полную мощность на согласованную нагрузку и показали рабочие характеристики.

2.7. СМЕЩЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

При соблюдении всех требований по изготовлению резонаторной системы, полюсных наконечников, обеспечивающих необходимое распределение магнитного поля вдоль оси катода и катодно- подогревательного узла [9-26, 37-60, 64-73], позволило получить смещение рабочей частоты 915 МГц не более ±2,5 МГц в отличие от печного магнетрона фирмы «LG» 2M286, на частоте 2450 МГц где спектр ± 25МГц и выше. Измерения проводились на приборах, работающих на согласованную нагрузку, при выходной мощность 1 кВт. Анализатор спектра подключался к направленному ответвителю CBЧ трактов.

Результаты эксперимента представлены на рисунках 27 и 28.



Рисунок 27 Смещение частоты магнетрона 2450 МГц «2М286».



Рисунок 28 Смещение частоты магнетрона 915 МГц «МАГРАТЕП» М-176.

Малое смещение рабочей частоты дает возможность применять наш магнетрон в научных исследовательских работах в разных сферах. Мощность СВЧ может использоваться как катализатор в химической промышленности [28, 34, 36].

ГЛАВА 3 ФИЛЬТР ВНЕТРАКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ КАТОДНОЙ НОЖКИ МАГНЕТРОНА

В непрерывного действия настоящее время магнетроны широко используются в бытовых и промышленных СВЧ-печах, предназначенных для нагрева посредством действия СВЧ-колебаний [2, 27-34, 105, 106]. При этом печные магнетроны работают в условиях переменной и несогласованной нагрузки, что создает значительные отражения СВЧ-энергии, а также приводит к возникновению паразитной генерации и излучению побочных колебаний, уровни которых превышают допустимые нормы. Bce ЭТИ факторы мощности обуславливают снижение надежности и долговечности магнетрона, источника питания, и аппаратуры в целом. Кроме того, превышение нормируемых уровней побочных колебаний является фактором, определяющим недопустимость устройства к эксплуатации.

Актуальной задачей при проектировании и создании магнетронов непрерывного действия, использующихся в бытовых и промышленных приборах, в частности в СВЧ-печах, является подавление внетрактового СВЧ-излучения на рабочей частоте магнетрона, которое возникает при его работе, и просачивается во внешнюю среду через катодную ножку магнетрона.

Известно, что для подавления нежелательных колебаний, возникающих при работе магнетрона, используются различные технические решения, как схемотехнические, рисунок 29, влияющие на цепи питания и управления магнетрона, так и конструктивные, реализуемые в конструкции элементов и узлов магнетрона, а также компонентов, непосредственно электромагнитно связанных с магнетроном [18].



Рисунок 29 Печной магнетрон с внешнем СВЧ фильтром.

Наиболее распространенным техническим решением, направленным на подавление внетрактового СВЧ-излучения с катодной ножки магнетрона, является установка внешнего высокочастотного фильтра показанного на рисунке №29, массово применяемым в печных магнетронах [36, 63].

Однако при использовании магнетронов с высокой мощностью (3-4 кВт и более), требуется значительное увеличение габаритов такого фильтра из-за необходимости элементов, рассчитанных работу использования на С повышенными мощностями. Это, в свою очередь, требует увеличения габаритных размеров аппаратуры, в которой используются магнетроны, что в большинстве случаев является проблематичным. Для подавления нежелательных СВЧколебаний интерес представляют технические решения, представляющие из себя различные дроссельные структуры [18] по причине простоты их реализации и надежности блокирования СВЧ. Однако использование подобных технических решений в малогабаритных СВЧ-приборах, работающих на колебаниях с достаточно большой длиной волны, представляется затруднительным, так как для

размещения четвертьволнового дросселя требуется увеличивать размеры прибора из-за большой длины дросселя. На магнетроне мощностью 75 кВт работающем на частоте 915 МГц высота катодной ножки равна 90 мм. На рисунке 30 представлена модель такого фильтра, воспроизведенная в пакете прикладных программ CST Studio 14.



Рисунок 30 Модель дроссельной структуры магнетрона на 915 МГц мощностью 75 кВт

Данная дроссельная структура имеет следующие характеристики по ослаблению СВЧ на частоте 915 МГц, указанные на рисунке 31. Расчет проводился в программе CST Studio 14.



Рисунок 31 Расчетная характеристика ослабления в дроссельной структуре 75-ти киловатного магнетрона.

Данная конструкция обеспечивает ослабление СВЧ излучения со стороны резонаторной системы по катодному держателю и полюсного наконечника через изолятор более 20 dB в диапазоне частот ± 5 МГц от рабочей частоты.

Нам необходимо для магнетрона работающему на частоте 915 МГц мощностью 3 кВт разработать дроссель в катодной ножке магнетрона, высотой не более 30 мм.

3.1. Расчет фильтра.

При выборе резонаторной структуры были просмотрены и пересчитаны дроссельные структуры магнетронов на частоту 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц, и принято решение свернуть четвертьволновый дроссель на частоте 915 МГц вдвое, как показано на рисунке 32.



Рисунок 32 Свернутый четвертьволновый дроссель на частоте 915 МГц

Результат достигается тем, что катодная ножка магнетрона, дополнительно содержит устройство для подавления паразитного СВЧ-излучения на рабочей частоте магнетрона, выполненное в виде свернутой четвертьволновой дроссельной структуры, включающей короткозамкнутый с одной стороны полый цилиндрический внешний проводник, закрепленный соосно на держателе катода таким образом, что его короткозамкнутая торцевая стенка направлена к внешнему концу катодной ножки, в полости которого расположен короткозамкнутый с одной стороны полый стороны полый внутренний проводник, закрепленный соосно на держателе катода концу катодной ножки, в полости которого расположен короткозамкнутый с одной стороны полый цилиндрический внутренний проводник, закрепленный соосно на

держателе катода таким образом, что его короткозамкнутая торцевая стенка направлена к катоду магнетрона.

Принцип действия свернутой четвертьволновой дроссельной структуры, аналогичен принципу действия коаксиального четвертьволнового резонатора. Входное сопротивление данной структуры стремится к бесконечности, поскольку суммарная длина проводников дроссельной структуры подбирается приблизительно равной четверти длины волны в свободном пространстве. На рисунке 33, 34 и 35 показаны электрические, магнитные поля и график ослабления сигнала, рассчитанные в CST Studio 14, для данной дроссельной структуры.



Рисунок 33 Электрическое поле свернутой дроссельной структуры.



Рисунок 34 Магнитное поле свернутой дроссельной структуры.



Рисунок 35 Ослабление сигнала свернутой дроссельной структуры.

Таким образом, плоскость дроссельной структуры, обращенная к источнику излучения, становится отражающей для него. Это позволяет надежно отсечь внетрактовое СВЧ-излучение с катодной ножки магнетрона на частоте 915±5 МГц. В то же время использование свернутой конструкции дроссельной структуры позволяет сохранить габаритные размеры магнетрона [13, 18].

Использование предлагаемого СВЧ фильтра позволяет получить магнетрон, обладающий высокой мощностью, и в то же время имеющий низкие уровни обратного СВЧ-излучения, что дает возможность устанавливать внешние высокочастотные фильтры, рассчитанные на значительно меньшую мощность по сравнению с прототипом. На рисунке 36 показан вариант выполнения фильтра и обозначены следующие позиции:

1 – анод с резонаторной системой;

- 2 катодная ножка;
- 3 цилиндрический держатель катода;
- 4 катод;
- 5 полюсный наконечник;
- 6 внешний цилиндрический короткозамкнутый проводник;
- 7 внутренний цилиндрический короткозамкнутый проводник;
- 8 вывод энергии магнетрона.



Рисунок 36 Магнетрон с фильтром в катодной ножке со свернутой структурой.

Показанное на рисунке 36 устройство[13], работает следующим образом. На цилиндрический держатель катода 4 в катодной ножке 2 соосно устанавливаются два цилиндрических короткозамкнутых проводника: внешний 6 и внутренний 7. При этом внешний проводник короткозамкнутой торцевой стенкой обращен к выводам катодной ножки 2, а находящийся в его полости внутренний проводник –

к катоду 4. Между вторым торцом внутреннего цилиндрического проводника и короткозамкнутой торцевой стенкой внешнего цилиндрического проводника устанавливается зазор, величина которого составляет 0.3-0.4% от длины волны рабочей частоты магнетрона. При работе магнетрона СВЧ-излучение на рабочей частоте просачивающееся со стороны катода 4 через зазор между полюсным наконечником 5 и цилиндрическим держателем 3 катода 4, встречает на своем пути дроссельную структуру, образованную внешним 6 и внутренним 7 проводниками, и отражается от нее. Таким образом удается добиться ослабления СВЧ-излучения катодной ножки магнетрона более 25 дБ.

3.2. Измерения на малом уровне мощности (холодные измерения).

Измерение дроссельной структуры проводилось на макетном образце магнетрона, работающего на частоте 915 МГц, изготовленным в соответствии с предлагаемым изобретением. Измерение осуществлялось с помощью анализатора цепей Rohde&Schwarz ZND рисунок 37. Подавался сигнал по коаксиальному кабелю со стороны анода и с помощью петли связи, расположенной около катодной ножки с внешней стороны, регистрировалось ослабление сигнала.



Рисунок 37 Измерение ослабления сигнала с помощью анализатора цепей.

Экспериментальная проверка подтвердила резонансные свойства предлагаемой дроссельной структуры, обеспечивающей ослабление более 25 дБ. На рисунке 38 показан график значений амплитудно-частотной характеристики сигнала на катодной ножке магнетрона на анализаторе цепей на стенде испытаний на малом уровне мощности «ХОЛОДНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ».



Рисунок 38 Показания ослабления сигнала на анализаторе цепей дроссельной структуры в катодной ножке магнетрона синей линией расчетная, красной показание на «панораме».

Расчетные показания отличаются от экспериментальных на 3 МГц. При дальнейшем изготовлении можно учитывать эту разницу, и длину внешнего цилиндра дросселя увеличить на 0.2 мм. Это уменьшит частоту дросселя на 3 МГц.

3.3. Проверка излучения в динамическом режиме

Испытания в динамическом режиме проводились с помощью измерителя плотности потока электромагнитного излучения ПЗ-33М.

Антенна измерителя помещались на расстоянии 30 см от катодной ножки работающего магнетрона.

Показания представлены в (Таблице 4).

Таблица 4 Измерение ППЭ с фильтром и без него.

Р	ППЭ без	ППЭ фильтра	F0фильтра	F маг(МГц)	Ослабление(dB)
(кВт)	фильтра	(мкВт/см ²)	(МГц)		
	(мкВт/см ²)				
1	800	5	915	920	22
2	1200	7	915	919,4	22,5
3	2000	3	915	918,2	26

Мы наблюдаем что, с увеличением тока анода и мощности увеличивается ослабление фильтра. Это связано со смещением частоты магнетрона на более высоком токе в сторону максимального ослабления фильтра, рисунок 38. В связи с этим, при сборке магнетрона необходимо учитывать смещение частоты в динамическом режиме и настраивать резонанс анодного блока под частоту фильтра или наоборот.

Таким образом, использование предлагаемого изобретения дает возможность получить простую конструкцию магнетрона, обеспечивающую значительное снижение паразитного СВЧ-излучения с катодной ножки вне зависимости от величины выходной мощности, и за счет этого снимающую необходимость применения крупногабаритных внешних фильтров, и тем самым достигнуть уменьшение массогабаритных характеристик прибора. На данную конструкцию получен патент №2588039.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕЗОНАТОРНОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНЕТРОНА НА ЧАСТОТЕ 915 МГц МОЩНОСТЬЮ 1-3 кВт

Для применения магнетрона мощностью 1-3 кВт на частоте 915 МГц рассчитана СВЧ резонансная камера. Параметры для расчета указаны в (Таблице 5).

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Рабочая частота, МГц	915±5
2	Мощность входная, Вт	600÷3000
3	Рабочий объем, л	не более 60

Таблица 5 Техническое задание на разработку СВЧ камеры.

Камеру необходимо адаптировать под современные стандарты, применяемые на кухнях в ресторанах, кафе и гостиницах.

4.1. Определение объёма резонаторной рабочей камеры и выбор типов колебаний

Среди объемных резонаторов в бытовых печах наибольшее распространение получил прямоугольный [2, 27-34,77-103].

Виды колебаний должны находиться вокруг центра резонансной частоты f=915,0 МГц (λ=327,64 мм);

Известна формула (8), описывающая длины волн резонансных колебаний

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}},\tag{8}$$

где m, n, p – целые числа (индексы видов колебаний)

a,b,c - линейные размеры резонатора.

Важным вопросом будет являться увеличения количества видов колебаний для равномерного нагрева продукта [27, 31, 34]. Наиболее предпочтительными для прямоугольного резонатора являются H_{m0p} -виды колебаний, когда нагреваемый продукт находится на поверхности резонатора. В этом случае количество возможных возбуждаемых видов колебаний в резонаторе зависит от соотношения размеров, объема и частоты.

Способы повышения равномерности нагрева:

1. Вращающийся поддон;

2. Увеличения возможных видов колебаний в установленном частотном диапазоне;

3. Использование нескольких вводов мощности в резонатор (сверху и сбоку);

4. Использование диссекторов в виде металлических пропеллеров, частично перекрывающих окно ввода мощности в резонатор;

5. Использование нескольких магнетронных генераторов, работающих на одну камеру.

Так, на частоте 2450 МГц достаточно иметь камеру объемом 20 л и для равномерности нагрева использовать вращающийся поддон. В таком резонаторе возбуждается не менее 5 видов колебаний.

Для решения задачи, то есть определения видов колебаний при выбранной геометрии резонатора, расчет проведен с использованием пакета прикладных программ CST Microwave studio 14.

Проведенный анализ возможности создания эффективной резонаторной рабочей камеры, работающей на частоте 915 МГц показал, что для создания резонаторной рабочей камеры, в которой в полосе частот ±15 МГц содержится хотя

бы 5 не вырожденных видов колебаний понадобится рабочая камера объемом не менее 170 л.

Задачей на работу было создание резонаторной рабочей камеры с минимальным объемом, в котором могут возбуждаться виды колебаний, способствующие равномерному нагреву.

При выборе размеров резонансной камеры можно воспользоваться достоинством частоты 915 МГц, таким как глубиной проникновения СВЧ энергии, усилив это преимущество увеличением выходной мощности [82, 83]. При этом можно сократить число видов колебаний до 3 и сократить объем рабочей камеры до 45 литров, сохранив качество приготавливаемых продуктов. Особенно такая рекомендация полезна для размораживания продуктов. Глубина проникновения СВЧ на частоте 915 МГц при объеме СВЧ камеры менее 60 литров позволяет равномерно проводить обработку по всему объему продукта.

Проведенный расчет показал, что таким резонатором является прямоугольный резонатор с размерами $435 \times 270 \times 410$. Объем такого резонатора составил 45 л. В таком резонаторе в полосе частот 915 ± 15 МГц возбуждается 3 вида колебаний H₂₀₂; H₀₁₂; H₃₀₁. Широкая стенка 435 мм позволяет устанавливать в печь стандартные пищевые лотки, применяемые в пищевой продукции, по 2 – 5 кг. Возбуждаемые частоты приведены в (Таблице 6).

	H ₂₀₂	H ₀₁₂	H ₃₀₁
	F(МГц)	F(МГц)	F(МГц)
Расчет по	914249671	911078762,1	914860196,7
формуле (8)			
Расчет по	913759000	910539000	914182000
программе CST			
MWS			

Таблица 6 Расчетные частоты видов колебаний.

Структура видов колебаний электрического и магнитного поля данной камеры на виде колебаний H₃₀₁ представлена на рисунках 39, 40.



Рисунок 39 Электрическое поле на виде колебаний Н_{301.}



Рисунок 40 Магнитное поле на виде колебаний Н₃₀₁.

Структура видов колебаний электрического и магнитного поля данной камеры на виде колебаний H₂₀₂ представлена на рисунках 41, 42.



Рисунок 41 Электрическое поле на виде колебаний Н202



Рисунок 42 Магнитное поле на виде колебаний Н202
Структура видов колебаний электрического и магнитного поля данной камеры на виде колебаний H₀₁₂ представлена на рисунках 43, 44.



Рисунок 43 Электрическое поле на виде колебаний Н012



Рисунок 44 Магнитное поле на виде колебаний Н₀₁₂.

Продукты, являющиеся диэлектриком с потерями, будут нагреваться, находясь под действием напряженности электрического поля. При одновременном действии электрического поля H_{301} и H_{202} видов колебаний можно обеспечить равномерный нагрев продуктов размещенных по центру (на нижней стенке) на площади не менее 300 см². Введение вращающегося поддона позволит увеличить площадь равномерного нагрева.

Таким образом, для равномерного нагрева можно использовать данный резонатор с двумя рабочими видами колебаний H₃₀₁ и H₂₀₂.

Для передачи СВЧ-мощности на частоте 915 МГц в резонатор через окно связи предварительно рассчитан и экспериментально согласован прямоугольный волновод, сечением 195мм×30мм с волной типа H₁₀.

Рассчитаем коэффициент связи с прямоугольным волноводом для оптимального возбуждения видов колебаний H_{301} и H_{202} при критическом коэффициенте связи 1. Расчет коэффициента связи основан на анализе резонатора аналога, приведенном в [104]. Основная часть расчетов и экспериментов устройства связи состоит в определении ширины h индуктивной диафрагмы, обеспечивающей заданный коэффициент связи K_{cB} на резонансной частоте f_0 . Окно связи расположено на верхней стенке камеры с размерами 195×100 мм. Уменьшенное сечение волновода дало возможность изготовить СВЧ печь соизмеримую по размерам с СВЧ печью на частоте 2450 МГц.

Также следует отметить, что в случае заполнения резонатора диэлектриком с потерями собственная добротность резонатора резко падает, что приводит к уменьшению коэффициента связи [83, 102, 104]. Выполнить аналитический расчет этого падения не представляется возможным из-за разнообразия объема продуктов, различных форм, различными диэлектрическими характеристиками и местами их расположения. Таким образом, резонатор без диэлектрического заполнения должен быть сильно пересвязан с волноводным трактом, чтобы при наличии диэлектрического заполнения с потерями коэффициент связи уменьшался до значений, близких к критической связи.

74

Как отмечалось ранее наличие, диэлектрического заполнения приводит к уменьшению резонансной частоты. Кроме того, введение узла связи также будет уменьшать резонансную частоту. Практика показывает, что падение резонансной частоты из-за отверстия связи не превышает 10 МГц. Таким образом, размеры резонатора должны быть скорректированы на уменьшение длинны С на 5 мм. Таким образом, размеры резонатора будут 430×270×410 мм. Значения резонансных частот видов колебаний занесены в Таблицу 7.

	H ₂₀₂	H ₀₁₂	H ₃₀₁
	F(МГц)	F(МГц)	F (МГц)
Расчет по	921226413,9	918079601,9	916608199,1
формуле(8)			
Расчет по CST	920341000	917196000	915426000
MWS			

Таблица 7Резонансные частоты в СВЧ камере после рассчета.

Эти значения частоты также укладываются в заданный в ТЗ частотный диапазон.

От возможности возбуждения H_{012} - вида колебаний в резонаторе отказались из-за расположения окна связи на верхней стенке резонатора, иначе при боковом вводе энергии размер камеры с коаксиально волноводным переходом увеличивается в ширину, и становится неприемлем в использовании на стандартном рабочем месте.

В основу разработки конструкции положены следующие рассчитанные размеры:

Размеры рабочей камеры - 430×270×410 мм; Верхняя стенка с окном связи - 195×100 мм; Прямоугольный волновод сечением -195×30 мм; Длинна волновода - 238 мм. На рисунке 45 показана рассчитанная СВЧ камера с КВП и магнетроном на частоте 915 МГц.



Рисунок 45 СВЧ камера на частоте 915 МГц.

После изготовления рабочего макета проводилось измерение коэффициента неравномерности нагрева согласно [27].

4.2. Исследование характеристик СВЧ печи с применением разработанного магнетрона.

Экспериментальное исследование характеристик работы СВЧ-печи.

Равномерность нагрева определяют в соответствии с [27], для определения равномерности нагрева на дно камеры микроволновой печи устанавливают пять стаканов, содержащих по 100±3 мл водопроводной воды. Стаканы располагаются так, как показано на рисунке 46.



Рисунок 46. Расположение стаканов с водой в камере СВЧ на вращающемся поддоне.

Начальная температура воды \mathbf{t}_{ih} , которая не должна превышать +20°С, измеряется электронным термометром. После этого на 2 минуты производится включение СВЧ нагрева. Затем в течение не более 15 секунд вода в стаканах перемешивается и измеряется ее конечная температура $\mathbf{t}_{i\kappa}$. Исследование проводится с вращающимся столиком СВЧ - печи.

Коэффициент равномерности определяется по формулам (9, 10, 11) [20]:

$$K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |\Delta t_c - \Delta t_i|}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}$$
(9)

$$\Delta t_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \tag{10}$$

$$\Delta t_i = t_{in} - t_{ik} \tag{11}$$

где **t**_{ін} и **t**_{ік} — температура воды в і-м стакане после нагрева и до него.

Приведем расчет: начальная температура во всех стаканах имела 25°С. После нагрева температура в стаканах распределилась следующим образом, указанным в (Таблице 8).

Вычислим приращение температуры $\Delta \mathbf{t}_i$ для каждого стакана и найдем среднюю температуру $\Delta \mathbf{t}_c$:

стакан №	1	2	3	4	5
t _{ін} до нагрева	25	25	25	25	25
t _{ік} после нагрева	76	73	73	74	78
$\Delta \mathbf{t}_{\mathbf{i}}$ каждого стакана	51	48	48	49	53
$\Delta \mathbf{t}_{c}$ - всех стаканов			49,8		

Таблица 8 Приращение температуры и средняя температура.

Определим отклонение от средней температуры |∆t_c-∆t_i| (Таблица №9)

Таблица 9 Отклонение от средней температуры.

стакан №	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$\Delta \mathbf{t}_{c}$ - $\Delta \mathbf{t}_{i}$	1,20	1,80	1,80	0,80	3,20

В соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 0367-86 коэффициент равномерности должен быть не менее 0,7. Однако эта цифра не может считаться образцом, на который следует равняться при разработке. Хорошо спроектированные и изготовленные печи в настоящее время имеют коэффициент равномерности более 0,9.

Рассчитанная камера имеет коэффициент равномерности 0,96.

Вода в резонаторной камере считается самым большим возмутителем СВЧ поля, из-за того, что имеет большой коэффициент диэлектрических потерь, но продукты, которые подвергаются разморозке имеют меньшее влияние на распределение СВЧ поля в камере [77, 82].

4.3. Выводы по согласованию магнетрона и СВЧ камеры на частоте 915 МГц.

Во время испытания магнетрона с СВЧ камерой были экспериментально подобраны режимы работы магнетрона. Магнетрон работает стабильно на всех режимах при соответствующей загрузке СВЧ камеры. На основе данного магнетрона «М-176» и СВЧ камеры создана СВЧ печь, которая прошла испытания и получила признание на международной выставке в Сеуле (Южная Корея), и работает в сети ресторанов по приготовлению блюд из курицы в ЮАР. Появление кухонной СВЧ печи на частоте 915 МГц не отменяет необходимость кухонной СВЧ печи на частоте 915 МГц не отменяет необходимость кухонной СВЧ печи на частоте 2450 МГц. Печь на частоте 2450 МГц обеспечивает в большей степени потребность одной семьи [63, 85]. На частоте 915 МГц обеспечивается потребность скорее в пунктах общественного питания и пригодна для малого бизнеса. В основном печь на 915 МГц подходит для размораживания продуктов и подготовки их к дальнейшему приготовлению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы создан компактный источник СВЧ энергии на частоте 915 МГц с выходной мощностью 1000- 3000 Вт, предназначенный для работы в кухонных СВЧ печах. Источник состоит из компактного магнетрона на частоте 915 МГц [Патент на полезную модель №: 129294], сопряженного с серийным промышленным источником для питания магнетрона в кухонной печи на частоте 2450 МГц. Созданный магнетрон разработан так, что его изготовление осуществляется по промышленной технологии для магнетрона на частоту 2450 МГц,

Изготовление компактного магнетрона на частоте 915 МГц по промышленной технологии в сочетании с серийным ВИП позволило создать источник СВЧ энергии для кухонных СВЧ печей на частоте 915 МГц недорогим и экономичным.

Созданный магнетрон с источником питания был испытан в экспериментальной кухонной печи. Для этой цели был проведен расчет и изготовлен экспериментальный образец новой СВЧ камеры на частоте 915 МГц с двумя рабочими резонансными модами. Рабочий объем камеры составляет 45 литров, что примерно в 2 раза превышает типичный аналогичный объем камеры на частоте 2450 МГц.

Повышенный объем СВЧ камеры при увеличенной мощности источника энергии позволяет увеличить полезную загрузку печи на частоте 915 МГц и делает перспективным использование таких печей в малых кафе, школьных столовых и т.п. предприятий.

Обоснована и решена н/т задача, имеющая значение для дальнейшего развития отрасли народного хозяйства, по созданию компактного источника СВЧ энергии и СВЧ-камеры на частоте 915 МГц, т.е. созданы условия для продвижения кухонных СВЧ печей с большой производительностью в новый для них сегмент, и делает перспективным применение кухонной печи на частоте 915 МГц в малых кафе, школьных столовых, больницах и т.д.

Создание компактного, недорого и экономичного источника СВЧ энергии на частоте 915 МГц и СВЧ камеры для него позволяет создать на этой частоте бытовую кухонную СВЧ печь с мощностью 1000- 3000 Ватт. Необходимость появления такой печи с умеренной СВЧ мощностью и повышенным проникновением энергии СВЧ в обрабатываемые продукты обусловлена дальнейшим продвижением СВЧ в кухонные СВЧ печи в том числе в соответствии с требованиями развивающегося малого бизнеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Промышленное применение СВЧ-нагрева. О.Морозов, А.Каргин, к.т.н., Г.Савенко, В.Требух, И.Воробьев <u>magratep@mail.ru</u>. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 3/2010
- Применение СВЧ нагрева в общественном питании. Под редакцией А.Н. Вышелесского, Е.П. Кузьминой. — М.:Экономика, 1964 г.
- Пчельников Ю.Н., Елизаров А.А. Перспективы применения электромагнитного нагрева для обработки сельхоз сырья и пищевых продуктов // Электронная техника. 1993, вып. 5-6, с. 47.52.
- Применение СВЧ энергии в энергосберегающих процессах: Тезисы докладов У Научно-технической конференции, Саратов, 1986.
- John M. Osepchuk, Microwave Power Applications IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002, pp.975-985.
- 6. Глазырин Б.Н., Литков Б.К., Карпов А.В. Микроволновые установки в народном хозяйстве страны // Тез. докл. VI Всесоюзная научно-практическая конференция "Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях", Саратов, 1991, с. 11.
- 7. Клоков Ю.В., Остапенко А.М. О глубине проникновения ЭМП СВЧ в пищевые продукты. // Электронная обработка материалов. № 5, 1988, с. 65.68.
- 8. А.М. Остапенкова. М., 1983.97.0стапенков А.М. Электрофизические свойства пищевых продуктов. Деп. рук. ВИНИТИ № 426. Библ. указатель. 1981. № 12.
- 9. Каргин, А. Н. Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи // Радио-техника. 2000. № 2. С. 62-66.
- 10.Магнетроны см-диапазона / Пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского, Т.2. М.: Сов. радио, 1950.
- 11.Каргин, А. Н. Высокочастотная электронная бомбардировка катода в магнетроне // Радиотехника. -2010. № 3.

- 12.Патент на полезную модель 2013103379 РФ. Магнетрон для микроволнового нагрева / О. А. Морозов, А. Н. Каргин, Г. П. Савенко, В. В. Федотов, Л. В. Кулибаба. Приоритет 25.01.13.
- 13.Патент № 2 58 80 39. Магнетрон для микроволнового нагрева /Федотов В. В. Морозов О. А. Каргин А. Н. Савенко Г. П. Кистин Б. Я. Ратиловский П. П.
- 14.Электронная оптика современных магнетронов / А.Н. Каргин, О. А. Морозов,
 А. О. Морозов, Г. П. Савенко, А. Н. Симоненко, В. В. Федотов. СВЧ- техника,
 выпуск 3(526) 2015. С. 27 35.
- 15. Малогабаритный магнетрон на 915 МГц для микроволнового нагрева / А.Н. Каргин, О. А. Морозов, Г. П. Савенко, В. В. Федотов, Л. В. Кулибаба. СВЧтехника, выпуск 2(517) 2013. – С. 14 – 20.
- 16.Металлооксидные катоды электронных приборов / А. Б. Киселев. М. : Изд-во МФТИ, 2001. - 238, [1] с. : ил.; 21 см.; ISBN 5-89155-068-7
- 17.Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования магнетронных генераторов (резонаторные системы). /Д.Е. Самсонов/. М. Сов. радио. 1966. 224 с.
- 18.Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, т.1: 340с., т.2: 375 М.: Высшая школа, 1972.
- 19.Э.Д. Шлифер. Расчет многорезонаторных магнетронов -М. 1976 г., 12 с.
- 20.Шумахер. Электронное смещение частоты. Форма спектра // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. Т. 2. / Пер. с англ. под ред. М. М. Федорова. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1961.
- 21. Молоковский, С. И. Электронно-оптические системы приборов СВЧ / С. И. Молоковский, А. Д. Сушков. М.: Наука, 1965.
- 22. Арцимович, Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. М.: Изд-во наука, 1972.
- 23.Каргин, А. Н. Мощный импульсный магнетрон L-диапазона / А. Н. Каргин, М. Ф. Воскобойник, О. А. Морозов, Г. П. Савенко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2009. – Вып. 2.
- 24.Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы. М. Радио и связь. 1981. 232с.

- Сковрон. Усилители М-типа с распределенной эмиссии. В кн. Мощные электровакуумные приборы СВЧ. /Под. ред. Л. Клемпита/. М. Мир. 1974. С. 69-101.
- 26.Березин В.М. Электронные СВЧ приборы. /В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин/. М. Высшая школа. 1985. 296 с.
- 27.ОСТ 11 0367-86 Печи СВЧ бытовые. Общие технические условия.
- 28.Диденко А.Н., Зверев Б.В; СВЧ энергетика. М.: Наука, 2000. 264 с
- 29.Шлифер Э.Д., Пипко А.И., Пипко Ю.А. Состояние и тенденции развития бытовых СВЧ печей. // Электронная техника. Сер. СВЧ техника. Вып. 2(476). 2000.-С.18-23.
- Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Саратов: ИздвоСГУ, 1983.- 140 с.
- 31.Коломейцев В.А., и д.р. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Саратов: СГТУ, 1997. -158 с.
- 32. Печи СВЧ нагрева: технический обзор.// Пер. ст. Gerling, IEEE Microwave Power.-1987.-V22 №4
- 33. Бреховских Л.М: Волны в слоистых средах.- М.: Наука, 1973. 343с.
- 34. Пюшнер Г. Нагрев энергией СВЧ. М.: Энергия, 1968. 311с.
- 35.Зарганов Г.Ф. и др. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь, 1986.-124с.
- 36.ГОСТ Р МЭК 335-2-25-97 Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Дополнительные требования к микроволновым печам и методы испытаний.
- 37.Дулин В.Н. Электронные приборы. М.: «Энергия», 1977.
- 38.Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника СВЧ. М.: «Радио и связь», 1981.
- 39.3.Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш.школа, 1988.
- 40.Справочник по элементам радиоэлектронных устройств. /Под ред. к.т.н. В.Н. Дулина, М.С. Жука/.– М.: «Энергия», 1978.

- 41.Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. /Под ред. д.т.н. А.А. Куликовского/, 1977.
- 42. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высш.школа, 1990.
- 43.Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ. М.: Высш.школа, 1988.
- 44. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи. Изд-во «Высшая школа», 2002
- 45. [Электронный pecypc]. URL:http https://www.cst.com/. (Дата обращения: 18.06.2017).
- 46.[Электронный ресурс].
 URL:http://www.eurointech.ru/products/CST/CST_STUDIO_SUITE_2011_Rus.pdf
 (Дата обращения: 18.08.2017).
- 47.Шлифер Э.Д. Расчет и проектирование коаксиальных и обращенокоаксиальных магнетронов. – М.: МЭИ, 1991. – 168 с.
- 48.Гурко А.А. Пути и средства совершенствования параметров магнетронов миллиметрового диапазона, дисс. на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МИЭМ, 2004. – 247 с
- 49.Самсонов Д.Е. «Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов». М.: Советское Радио, 1966. 224 с.
- 50.Скрипкин Н.И. Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: Новые разработки компании «Плутон», «Электроника», №7. Фрязино, 2011. С. 86 87.
- 51.Шлифер Э. Д. «Расчёт многорезонаторных магнетронов» 2-ое издание, МЭИ, 1966г.
- 52. «Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями», под редакцией М. М. Федорова, том 2, издательство иностранной литературы, Москва 1961г.
- 53. Трутень И.Д. «Импульсные миллиметровые магнетроны». Сборник «Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн». Под общей редакцией Усикова А.Я. «Наукова думка». Киев. 1986г.
- 54. Панин И.С., Панченко Л.В. «Импульсные магнетроны», М.: издательство «Советское радио», 1966г.

- 55. Гурко А.А. «Повышение информативности контроля параметров колебательной системы магнетрона на низком уровне мощности»
- 56. Бычков С.И. «Магнетрон», М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1957г.
- 57.9. Хлопов Ю.Н. «Основы использования магнетронов», М.: издательство «Советское радио», 1976г.
- 58. Панин И.С., Панченко Л.В. «Элементы радиоэлектронной аппаратуры», М.: издательство «Советское радио», 1966г.
- 59. Стальмахов В.С. «Основы электроники СВЧ приборов со скрещенными полями», М.: издательство «Советское радио», 1963г.
- 60. Федоров М.М. «Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями», М.: «Издательство иностранной литературы», 1961г.
- 61.Капица П.Л. «Электроника больших мощностей», М.: «АН СССР», 1962г.
- 62. Михеев М.А. Михеева И.М. «Основы теплопередачи» издание второе. М.: «Энергия», 1977г.
- 63.Ремонт микроволновых печей. СОЛОН-Пресс, Сапунов Г.С. ISBN: 5-98003-122-7, 2003.
- 64. Коваленко В.Ф. «Введение в электронику сверхвысоких частот», М.: издательство «Советское радио», 1955г.
- 65. Гвоздовер С.Д. «Теория электронных приборов сверхвысоких частот», М.: «Государственное издание технико-технической литературы», 1954г.
- 66. Бычков С. И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Изд. «Советское радио», 1967, 216 с.
- 67. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн.Киев.: Наукова думка. 1986. 386 с.
- 68. В. Эспе «Технология электровакуумных материалов», т. 1 «Металлы и материалы с металлической проводимостью», под ред. Р. А. Нилендера и А. А. Котляра, М.: Государственное Энергетическое Издательство, 1962г.

- 69. В.Б.Байбурин, А.А.Терентьев, М.В.Гаврилов, А.Б.Поваров. Расчет полей пространственного заряда при трехмерном моделировании приборов М-типа // Радиотехника и электроника. 2000, т. 45, № 8, с. 993-998.
- 70. В.Б.Байбурин, А.А.Терентьев, М.В.Гаврилов, А.Б.Поваров. Трехмерные цилиндрические уравнения движения электронов в неоднородных скрещенных полях // Радиотехника и электроника. 2000, т. 45, № 4, с. 492-498.
- 71. А.А.Терентьев, А.Б.Поваров. Компьютерное моделирование запуска магнетрона с помощью электронной пушки // Прикладные исследования в радиофизике и электронике: Межвуз. сб. науч. статей. Саратов: "Исток-С", 2001. С. 18-20.
- Крымской микроволновой конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004). Севастополь, 2004, с. 227-229.
- 73. А.М.Алексеенко, М.Б.Голант, А.А.Негирев, В.Б.Хомич. Проблемы миниатюризации вакуумных генераторных СВЧ-приборов О-типа малой мощности. Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 1993, вып. 1, с. 28-33.
- 74. Н.Д.Девятков. Приоритетные вехи развития СВЧ-электроники в России.
 Радиотехника, 1999, № 4, с. 4-7.38. Сайт http://www.istok.com, ФГУП "НПП
 "Исток", Россия. 2003 г., июль.
- 75. Окресс Э. СВЧ энергетика. М.: Мир, 1971, т. 2.
- 76. Низкоинтенсивные СВЧ технологии (проблемы и реализация)/ Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. - М.: "Радиотехника", 2003. - 112 с.
- 77. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Издательство Саратовского университета, 1983 г.

- 78. Всесоюзная VI научно практическая конференция по применению СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях. Саратов. 1991 г.
- 79. Ю.Н. Пчельников, В.Т. Свиридов. "Электроника сверхвысоких частот", Москва, "Радио и связь", 1981 г.
- 80. Международная научно техническая конференция "Актуальные проблемы электронного машиностроения". Тезисы докладов. 4-7 октября 1994 г. Издательство Саратовского университета, 1994 г.
- 81. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1976 г.
- Ю.Захаров В.И., Некрутман С.В. Физические процессы при обработке пищевых продуктов в электрическом поле СВЧ. Научн. тр. МИНХ, 1967, вып. 50, с. 17.20.
- 83. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968 г.
- 84. Басс Ю.П. и др. Диэлектрический нагрев в резиновой промышленности. -М.: ЦНИИЭнефтехим, 1974 г.
- 85. С.В. Некрутман. "Тепловая обработка пищевых продуктов в электрическом поле сверхвысокой частоты". Москва, 1972 г.
- 86. Некрутман С.В. Аппараты СВЧ в общественном питании. М.: Экономика, 1973г.
- 87. Довженок А.А., Язиков В.Н. Установка для скоростной сушки асбестоводержащих материалов в полях СВЧ. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1976, № 10, с. 65.68.

- 88. Бенгтссон Н., Олссон Т. СВЧ нагрев в пищевой промышленности. ТИИ-ЭР, 1974, № 1,с. 52.56.17.3африн Э.Я. и др. О применении СВЧ энергоподвода при сублимации. -Изв. АН МСССР, 1969, № 3, с. 65.68.
- 89. Крепьючетс Р. Использование СВЧ нагрева в производственных процессах.Электроника, 1966, т. 39, № 5, с. 39.47.
- 90. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов.М.: Пищевая промышленность, 1974.
- 91. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 12 (1281). Н.К. Беляева, А.И. Маштакова, О.Ф. Кузнецова. СВЧ нагрев при обработке промышленных материалов. ЦНИИ "Электроника", Москва, 1987.
- 92. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 10 (960).
 В.Н. Удалов, А.И. Маштакова, Н.К. Беляева. Камерные СВЧ печи периодического действия. ЦНИИ "Электроника", Москва 1983.
- 93. Справочник по электротехническим материалам. Под редакцией Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева, т. 2, "Энергия", Москва, 1974.
- 94. Обзоры по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. Выпуск 22 (922). // Попов В.К., Кондрашо-ва А.Т. "СВЧ плазмохимическая обработка". Москва. ЦНИИ "Электроника", 1982.
- 95. Пчельников Ю.Н., Карпенко Ю.В., Нефедов В.Н., Елизаров А.А. Применение СВЧ энергии для интенсификации технологических процессов тепловой обработки бетона. Передовой опыт в строительстве Москвы. Реферативный сборник, № 2, 1992, с. 1.4.

- 96. Терещенко А.И., Мироненко В.Л. Цилиндрический открытый предельный резонатор с колебаниями основного типа. В кн.: Вопросы электронной техники.
 Саратов СПИ, 1974, с. 29.34.
- 97. Девяткин И.И. и др. СВЧ печь для сушки керамической шихты. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1971, № 8, с. 102. 104.
- 98. А.с. № 388328 СССР. Нагревательная камера. / В Л. Мироненко -Опубл. вБ.И. 1973, №28.
- 99. Бацев П.В. и др. Промышленная СВЧ печь для групповой обработки диэлектрических материалов. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1974, №9, с. 74.83.
- 100. А.с. № 647898 СССР. СВЧ устройство для термообработки протяженных диэлектрических материалов / Ю.С. Корьев и др. Опубл. в Б.И., 1976, №6.
- 101. А.с. № 598275 СССР. Камера для сверхвысокочастотного нагрева /
 В.В.Шмырев, М.Н. Молохов Опубл. в Б.И., 1978, № 10.
- 102. А.с. № 362580 СССР. Волноводная камера для термообработки диэлектриков / Ю.С. Архангельский и др. Опубл. в Б.И., 1973, № 37.
- 103. Мамонтов А.В. Разработка и исследование СВЧ устройств для термообработки диэлектрических материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2005.
- 104. Зверев Б. В., Собенин Н. П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.

- 105. Генераторы и усилители СВЧ / [М. В. Агапов и др.]; под ред. И. В. Лебедева. М. : Радиотехника, 2005. 351 с.
- 106. Сазонов В.П. Приоритеты России в вакуумной СВЧ электронике в XX
 столетии/ Сазонов В.П.; Королев А.Н. (ред.). М.: МЕДПРАКТИКА-М, 2012.
 355 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- СВЧ сверхвысокая частота
- КСВ коэффициент стоячей волны
- КПД коэффициент полезного действия
- ЭСЧ электронное смещение частоты