

На правах рукописи

СМИРНОВ Константин Дмитриевич

**СВЧ-плазмотрон атмосферного давления
малой мощности для прикладных исследований**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва
2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель кандидат технических наук,
доцент Прокопенко Александр Валерьевич

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Завьялов Михаил Александрович,
ведущий научный сотрудник,
ФГУП Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина

кандидат технических наук,
доцент Иванов Вячеслав Александрович,
доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Ведущая организация: Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится «25» апреля 2012 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д **212.130.01** в НИЯУ МИФИ по адресу: Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31.
Тел. (499) 324–84–98, (499) 323–95–26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе диссертационного совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан « » марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



И.С. Щедрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние десятилетия вопросам использования электромагнитной энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона для повышения энергосбережения в различных технологических процессах уделяется значительное внимание. СВЧ-энергия востребована не только в традиционных процессах сушки и спекания, но и для получения чистой плазмы. Особенности СВЧ-плазмы состоят в ее высокой чистоте, которую нельзя получить с помощью обычных плазмотронов, в более эффективном вводе энергии в СВЧ-плазму и в возможности получения плотной высокотемпературной плазмы в небольших объемах. Все это предопределяет перспективность исследования плазмы СВЧ-разряда и применения ее для решения новых прикладных задач. Плазма СВЧ-разряда может использоваться в следующих процессах: получение водорода; получение оксидов и нитридов высокочистых материалов; плазмохимическая переработка углей, включая их пиролиз и газификацию; энергоэффективный поджиг угольной пыли; осаждение алмазов и алмазоподобных пленок; осаждение покрытий на кремниевых подложках и травление поверхности; использование СВЧ-плазмы в космической энергетике, в частности для имитации вхождения спутников в атмосферу Земли; в источниках света на основе СВЧ-разряда; в спектроскопии.

С развитием СВЧ-техники и магнетронных генераторов появилось большое количество научных работ по созданию и применению СВЧ-плазмотронов, работающих на воздухе атмосферного давления с мощностью до 5 кВт на частоте 2450 МГц. Области использования таких плазмотронов: плазменные технологии газоочистки от ядовитых и инфекционных выбросов; сжигание твердых бытовых отходов;

модификация рабочих поверхностей деталей из сталей, сплавов и полупроводниковых материалов перед операциями азотирования, очистки или травления; получение синтез-газа (активация процессов горения и термохимической конверсии забалластированного газообразного и низкосортного твердого топлива); активация посадочного материала в сельском хозяйстве; получение наноксидов металлов в результате сжигания в плазменной струе; в медицине и пищевой промышленности. Следует отметить, что перечень проблем, которые можно решать с помощью СВЧ-плазмы, непрерывно расширяется.

Для исследования возможности использования СВЧ-плазмы в прикладных задачах большой интерес представляют СВЧ-плазмотроны на основе магнетронных генераторов непрерывного режима, которые используются в бытовых микроволновых печах с СВЧ-мощностью не более 1кВт. Такие плазмотроны главным образом разрабатываются на основе резонаторных рабочих камер, в которых можно при минимальной мощности питания обеспечить высокое значение напряженности электрического поля для эффективного поджига и горения разряда. СВЧ-плазмотроны малой мощности удобны для проведения поисковых исследований, т.к. имеют преимущество в простоте конструкции, стоимости разработки и эксплуатации.

Таким образом, успехи в создании СВЧ-плазмотронов и в изучении свойств СВЧ-плазмы могут привести к появлению большого числа новых энергосберегающих технологий, позволяющих решить широкий круг современных проблем.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка СВЧ-плазмотрона атмосферного давления с мощностью питания 600 Вт для

проведения прикладных исследований. В рамках решения этой задачи рассматриваются следующие вопросы:

- актуальность использования СВЧ-плазмотронов для решения прикладных задач;
- создание эффективной рабочей камеры для СВЧ-плазмотрона;
- расчет и оптимизация резонаторной рабочей камеры СВЧ-плазмотрона, работающего при СВЧ-мощности до 600 Вт;
- конструирование, настройка и экспериментальное исследование электродинамических характеристик рабочей камеры СВЧ-плазмотрона;
- экспериментальное исследование энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона;
- применение разработанного СВЧ-плазмотрона для асептических процессов в пищевой промышленности.

Научная новизна.

1. Показана возможность создания СВЧ-плазмотронов атмосферного давления малой мощности питания с использованием штыревых структур.
2. Предложена методика комплексного расчета и разработки СВЧ-плазмотрона (резонаторной рабочей камеры и системы питания).
3. Предложен и обоснован метод экспериментального исследования энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона.
4. Предложено использовать СВЧ-плазму для асептической обработки в пищевой промышленности.

Практическая ценность.

1. Разработан и изготовлен СВЧ-плазмотрон атмосферного давления с мощностью СВЧ-питания порядка 600 Вт.

2. Совместно с ГНУ ВНИИКОП проводятся работы по исследованию возможности использования плазмы СВЧ-разряда при атмосферном давлении в процессах асептической обработки различной упаковочной тары.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Создание эффективного СВЧ-плазмотрона атмосферного давления при мощности СВЧ-питания порядка 600 Вт.

2. Методика комплексной разработки и расчета СВЧ-плазмотрона малой мощности.

3. Методика измерения и оценки энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона. Результаты экспериментального исследования энергетических характеристик плазмотрона.

4. Результаты исследования применения СВЧ-плазмы для процессов бактерицидной обработки в пищевой промышленности.

Достоверность научных результатов обоснована всесторонними исследованиями с использованием теоретических методов и численного моделирования, а также проведением экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации отражены в двух опубликованных печатных работах в следующих реферируемых журналах: «Прикладная физика» и «Хранение и переработка сельхозсырья», а также были представлены на российских и международных конференциях и семинарах, в частности:

– Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Российская Федерация, 2012);

- 21-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2011);
- VI Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии (Иваново, Российская Федерация, 2011);
- Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (Петрозаводск, Российская Федерация, 2011);
- Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, Российская Федерация, 2011);
- Ежегодных научных сессиях МИФИ (Москва, Российская Федерация, 2010, 2011, 2012);
- Конференции-конкурсе молодых физиков (Москва, Российская Федерация, 2011, 2012);
- Международной конференции для молодежи «Актуальные проблемы электромагнитной обработки материалов» (Москва, Российская Федерация, 2010).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 70 наименований. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, включая 53 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность темы работы и состояние исследуемой проблемы к настоящему времени, формулируются основные

цели и задачи диссертации. Излагается новизна результатов, практическая ценность работы и приводятся положения, выносимые на защиту.

Первый раздел содержит обзор современных работ по использованию СВЧ-плазмы, в котором показан широкий спектр ее технологических применений. Рассмотрены различные конструкции устройств, генерирующих СВЧ-плазму, и оценена их эффективность. Приведены основные параметры и характеристики СВЧ-плазмы. Описаны механизмы бактерицидного воздействия СВЧ-плазмы. Представлен обзор работ по современному состоянию разработок СВЧ-плазмотронов.

Выполненный обзор современного состояния разработок СВЧ-плазмотронов для решения прикладных задач показал нарастающий интерес к различным направлениям и способам использования плазмы СВЧ-разряда. Рассмотрены конструкции существующих устройств, генерирующих СВЧ-плазму. Оценена их эффективность. Показана тенденция в создании СВЧ-плазмотронов атмосферного давления для исследовательских целей, которая заключается в использовании доступных магнетронных генераторов мощностью меньше 1 кВт. Для создания СВЧ-плазмотронов малой мощности наиболее эффективными являются объемные резонаторные рабочие камеры, работающие на низших видах колебаний, в которых стабилизация плазменного факела осуществляется аксиальной либо вихревой струей газа.

Оценены характеристики плазмы СВЧ-разряда в воздухе при атмосферном давлении: температура электронов, степень ионизации, концентрация. Из рассмотренных работ следует, что СВЧ-разряд в воздухе при атмосферном давлении похож на дуговой разряд, только с более высокой температурой электронов.

Изучены механизмы воздействия воздушной плазмы СВЧ-разряда

атмосферного давления на микробиологические объекты с целью получения бактерицидного эффекта на обрабатываемой поверхности. Воздействие плазмы на поверхность имеет комплексный характер: тепловой, химический и УФ-излучение. Степень бактерицидного воздействия зависит от типа разряда, его энергетических характеристик, плазмообразующего газа, спектра излучения и времени экспозиции.

Выполнен обзор работ по СВЧ-плазмотронам атмосферного давления, разработанным в России за последние годы для решения различных прикладных задач. Показана потребность создания энергетически эффективного СВЧ-плазмотрона атмосферного давления, работающего при малой мощности СВЧ-питания. Такой плазмотрон может использоваться в различных технологических процессах, в частности, для фундаментальных и прикладных исследований бактерицидного воздействия плазмы СВЧ-разряда применительно к пищевой промышленности и медицине с целью проведения поисковых исследований бактерицидного воздействия СВЧ-плазмы на биологические и микробиологические объекты.

Во втором разделе описана разработка рабочей камеры СВЧ-плазмотрона. Выполнено сравнение электродинамических характеристик (ЭДХ) цилиндрических резонаторных рабочих камер с колебаниями типа E_{011} и E_{010} . Предложена методика комплексного расчета СВЧ-плазмотрона. Рассчитана и оптимизирована рабочая камера СВЧ-плазмотрона, определена оптимальная форма штыревой вставки. Проведены оценки теплового режима кварцевой разрядной трубки и электромагнитной совместимости СВЧ-плазмотрона.

При создании резонаторных рабочих камер для самостоятельного поджига разряда желательно использовать резонаторы с большей напряженностью электрического поля и высокой добротностью. При

сравнении различных резонаторов видно, что наиболее предпочтительным вариантом является резонатор с типом колебаний E_{010} , в котором применение штыревых структур дает возможность повысить напряженность электрического поля. При этом размеры резонатора остаются минимальными при требуемой рабочей частоте 2450 МГц.

Предложена методика комплексного расчета СВЧ-плазмотрона малой мощности, состоящая из согласованного расчета ЭДХ резонаторной рабочей камеры, устройства связи, системы СВЧ-питания и системы продувки плазмообразующего газа.

Выполнены расчеты зависимости ЭДХ (резонансной частоты, параметров напряженности электрического поля и добротности резонаторов) от формы и геометрических размеров резонатора. Из проведенных расчетов следует, что наиболее оптимальным резонатором для плазмотронов является цилиндрический резонатор со штырем, размещенным на оси резонатора. Определена оптимальная форма штыря в резонаторе для снижения вероятности пробоя вне зоны поджига разряда. Для выравнивания значений напряженности электрического поля на оси резонатора и предотвращения пробоя вне оси рассматривались несколько форм штырей: конусообразная, цилиндрическая с прямым срезом угла, цилиндрическая со скругленными краями. Последний штырь дает лучшие результаты, так как поперечные и продольные значения напряженности электрического поля на оси и на краях штыря примерно одинаковы. В качестве основы для штыревого резонатора взят цилиндрический резонатор с размерами $R=30$ мм и $L=33,4$ мм. Параметр напряженности электрического поля на оси в области штыря достигал значения $\xi_0=9,4$ (Ом) 0,5 /см. С использованием современных численных методов расчета резонансных структур, основанных на использовании метода

конечных элементов при решении трехмерных краевых задач в объемных резонаторах, выполнен расчет ЭДХ резонатора со штырем и кварцевой трубки для системы продувки, размещенными соосно резонатору (рис. 1).

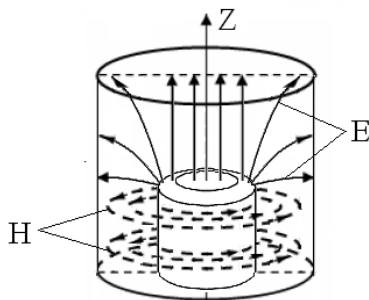


Рисунок 1 – Резонаторная рабочая камера
СВЧ-плазмотрона со штырем

Аналитический расчет ЭДХ такого резонатора показал, что при добротности цилиндрического резонатора со штырем, равной 3000, и СВЧ-мощности 600 Вт значение напряженности электрического поля в месте поджига разряда составит $E=12,63$ кВ/см. Для поджига разряда при атмосферном давлении требуется введение инициаторов.

Для подачи плазмообразующего газа в резонатор используется трубка из кварцевого стекла длиной 75 мм, внешним диаметром 8 мм и внутренним диаметром 6 мм. Инженерными методами расчета выполнен расчет теплового режима кварцевой трубки, размещенной на оси резонатора, при работе СВЧ-плазмотрона от магнетронного генератора мощностью 1 кВт. При типичной передаче СВЧ-энергии разряду 0,8 кВт и при потерях на нагрев трубки СВЧ-разрядом не более 15 %, передача СВЧ-энергии разрядной трубке составит 0,12 кВт, что, согласно проведенным расчетам, можно снять путем продува воздуха по трубке с внутренним

диаметром 6 мм в турбулентном режиме течения газа при расходе от 1 л/с. Таким образом, проведенные оценки теплового режима кварцевой трубки показали, что в плазмотронах мощностью до 1 кВт возможно использование кварцевых трубок для подачи плазмообразующего газа.

Выполнены расчеты электромагнитной безопасности по СВЧ-излучению отверстия вывода плазменного факела диаметром 8 мм и толщиной 6 мм при мощности, поступающей в резонатор, 600 Вт. Полученные значения плотности потока мощности на расстоянии 50 см от резонатора полностью соответствуют предельно допустимым значениям безопасного уровня СВЧ-излучения, согласно принятым в России санитарным правилам и нормам.

В третьем разделе представлены результаты конструирования СВЧ-плазмотрона, произведен расчет устройства связи рабочей камеры с волноводом. Выполнены настройка и экспериментальное исследование ЭДХ рабочей камеры СВЧ-плазмотрона на малом уровне мощности. Определена система СВЧ-питания рабочей камеры СВЧ-плазмотрона, которая способна обеспечить эффективную работу при питании резонатора от магнетрона М105-1 на СВЧ-мощности порядка 600 Вт.

С учетом имеющейся производственной базы научно-исследовательской лаборатории «СВЧ-энергетика» кафедры «Электрофизические установки» НИЯУ МИФИ разработана конструкция резонаторной рабочей камеры СВЧ-плазмотрона и волноводного узла ввода СВЧ-мощности. Изготовлены элементы рабочей камеры СВЧ-плазмотрона (рис. 2). В качестве экспериментального образца резонатора для камеры СВЧ-плазмотрона взят цилиндрический резонатор (рис. 2, 1). Цилиндрическая штыревая вставка со скругленными краями (рис. 2, 2) и крышка (рис. 2, 3) делаются съемными.



Рисунок 2 – Изготовленная резонаторная
рабочая камера СВЧ-плазмотрона

Все детали выполнены из алюминия. Винтовое крепление штыря позволяет снимать его для подстройки на резонансную частоту путем стачивания его длины. Рассчитанный коэффициент коррекции частоты длиной штыря составит порядка 7 МГц на 0,1 мм. В торцевой стенке резонатора, крышке и штыревой вставке предусмотрены отверстия для установки кварцевой трубки (рис. 2, 4), через которую сквозь резонатор продувается плазмообразующий газ – воздух, превращающийся в струю плазмы. Такая конструкция упрощает и ускоряет процесс сборки СВЧ-плазмотрона, а также в значительной степени делает удобным настройку и экспериментальное исследование устройства. Для передачи мощности от СВЧ-генератора к резонатору разработан волноводный переход с прямоугольного волновода сечением 72×34 мм на 72×20 мм. Длина волноводного перехода составляет $4 \cdot (\lambda_v/2) \approx 245$ мм.

Ввод мощности в резонаторную рабочую камеру СВЧ-плазмотрона осуществляется с использованием магнитного элемента связи в виде индуктивного окна связи в прямоугольном волноводе на основной волне. Такое устройство связи обладает высокой электрической прочностью и

характеризуется простотой конструкции. Основная часть расчетов устройства связи состоит в определении ширины h индуктивного окна связи, обеспечивающего заданный коэффициент связи $K_{св}$ на резонансной частоте f_0 . С использованием метода резонатора аналога и моделирования в пакете прикладных программ проведены расчеты коэффициента связи. Определена ширина отверстия связи при критическом режиме связи, которая, согласно расчетам двумя методами, составит 23,5 мм и 24 мм, соответственно. При поджиге СВЧ-разряда электромагнитная энергия начинает теряться в разряде, следовательно, коэффициент связи уменьшается, поэтому в отсутствие СВЧ-разряда резонатор должен быть пересвязан с волноводом.

Оптимальный коэффициент связи подбирается в дальнейшем экспериментально для каждого типа резонатора при его оснащении штатными трубками с различными типоразмерами. При выборе максимального коэффициента связи следует учитывать, что при больших коэффициентах связи СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, может не хватить для поджига разряда.

Экспериментальные исследования характеристик изготовленной рабочей камеры и ее настройка проводились на штатной измерительной установке по методу четырехполосника, с использованием генератора Г4-79, электронно-счетного частотомера ЧЗ-34А с переносчиком частоты ЯЗ4-51, анализатора спектра С4-27, а также с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-86. При критическом режиме связи ширина отверстия связи составила порядка 24,5 мм. По итогам настройки резонатора отверстие связи расточено до $h = 37$ мм, что соответствует коэффициенту связи порядка 5.

Для подачи плазмобразующего газа предусмотрена система

продувки, основанная на безмаслянном компрессоре с резистивным объемом 24 л и максимальным давлением на выходе 3,5 атм, которая обеспечивает непрерывную подачу воздуха с расходом 0,5-3,0 л/с. Компрессор соединен гибкой трубкой с кварцевой трубкой вставляемой в резонатор. Измерена зависимость расхода воздуха от давления на выходе из редуктора компрессора.

Питание СВЧ-плазмотрона осуществляется от генератора, выполненного на базе магнетрона М105-1. Для стабильной работы магнетрона на резонаторную рабочую камеру, являющуюся нагрузкой с переменным входным сопротивлением, предложено использовать систему стабилизации частоты магнетрона самой резонаторной нагрузкой. Приведены расчеты системы стабилизации.

В четвертом разделе приведены результаты наладки и экспериментальных исследований СВЧ-плазмотрона. Разработана методика измерений энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона. Исследовано бактерицидное воздействие СВЧ-плазмы для применения в процессах асептической обработки упаковочной тары в пищевой промышленности.

Наладка и экспериментальное исследование СВЧ-плазмотрона на высоком уровне мощности производились на установке, схема которой приведена на рис. 3. Мощность от питающего СВЧ-генератора (рис. 3, 1), выполненного на основе магнетрона от бытовой микроволновой печи мощностью $P = 600$ Вт, через переход (рис. 3, 2) подается в резонатор (рис. 3, 3). В резонаторе имеется кварцевая трубка (рис. 3, 4), по которой течет плазмообразующий газ. Кварцевая трубка посредством гибкой трубки соединяется с компрессором (рис. 3, 5).



Рисунок 3 – Схема установки для экспериментального исследования СВЧ-плазмотрона на высоком уровне мощности

Для принудительной инициации разряда в кварцевой трубке используются металлические проволоочки диаметром 0,1 мм и общим весом 0,4-0,45 грамм. Проволочки предварительно засыпались внутрь кварцевой трубки и при подаче воздуха они выдувались, возбуждая разряд внутри кварцевой трубки. Установлено, что для устойчивой работы СВЧ-плазмотрона расход воздуха должен составлять от 1 л/с до 2 л/с. Образовывавшаяся в трубке СВЧ-плазма выдувалась из резонатора, что видно по образуемому над резонатором факелу (рис. 4). Высота плазменного факела при работе прибора не превышала 35 мм. После длительной работы плазмотрона корпус резонатора нагревался до температуры 50-55 °С, которая измерялась контактной термопарой.



Рисунок 4 – Работа СВЧ-плазмотрона

Выполнено экспериментальное исследование электромагнитной совместимости плазмотрона с использованием измерителя плотности потока энергии ПЗ-19. Измерительная антенна прибора устанавливалась на расстоянии 50 см от центра рабочей камеры плазмотрона. Измерения проводились после поджига разряда при устойчиво горящем факеле плазмотрона. Измеренная плотность потока энергии при этом не превысила $8,2 \text{ мВт/см}^2$, что соответствует принятым нормам для микроволновых печей.

Предложена методика измерений энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона. Исследованы энергетические характеристики СВЧ-плазмотрона атмосферного давления при мощности СВЧ-питания 600 Вт. Выполнены измерения поля температуры воздушной плазменной струи СВЧ-плазмотрона при различных расходах воздуха. Измерялась температура, до которой воздушная плазменная среда может нагреть малоинерционную термопару К-типа. Измерения проводились на центральной оси и на периферии плазменного факела от уровня выхода плазмы из плазмотрона и до расстояния 35 мм при различном расходе воздуха. При минимальном расходе газа 1,3 л/с температура на оси у выхода плазменного факела составила порядка 1100°C , а при увеличении расхода до 2,7 л/с, она падала до 200°C . С увеличением расстояния от выхода плазмотрона температура воздушной плазменной струи нелинейно падала. Такая же зависимость наблюдается на расстоянии 3,5 мм от оси плазмотрона. Таким образом, установлено, что температурные характеристики плазменного факела сильно зависят от расхода плазмообразующего газа.

Проведены исследования излучательной способности факела СВЧ-плазмотрона в УФ-диапазоне. Оценочные измерения выполнены с

помощью УФ-радиометра ТКА-ПКМ-12. Результаты исследований показывают, что плазменный факел не является непосредственным источником УФ-излучения, так как УФ-излучение фиксируется только при измерении над отверстием вывода плазмы. Источником УФ-излучения является СВЧ-разряд в резонаторе. Измеренные значения УФ-излучения над плазменным факелом на расстоянии 20 см в области УФ-А (315-400 нм) и УФ-В (280-315 нм) не превысили верхнего уровня границы безопасности согласно санитарным нормам. В диапазоне УФ-С (200-280 нм) энергетическая освещенность составила 19 мВт/м^2 , что превышает установленную норму 1 мВт/м^2 . Таким образом, УФ-излучение в С-диапазоне из СВЧ-разряда может приводить к уничтожению клеток и микроорганизмов.

Выполнено измерение тепловой мощности воздушной плазменной струи СВЧ-плазмотрона. Для проведения измерений разработана калориметрическая нагрузка, которая позволяет перевести тепло от горячей воздушно-плазменной струи в нагрев воды. Однако при расходе воздуха более 1 л/с очень трудно создать нагрузку, в которой может поглотиться все тепло плазменного факела, поэтому для увеличения точности измерений используется метод сравнения. В методе сравнения используется электрический аналог плазменной струи в виде спирали накаливания, с известной мощностью нагревающей воздух, который затем поступает в нагрузку. С использованием аналога выполнена градуировка калориметрической нагрузки в стационарном режиме работы при постоянном расходе воды.

В ходе измерений установлено, что на плазменном факеле тепловая мощность струи составляет не менее 370 Вт при мощности СВЧ-питания 600 Вт. Таким образом, результаты измерения показывают, что

коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую мощность плазменного факела составил не менее 0,6.

Проведено исследование работы СВЧ-плазмотрона на высоком уровне мощности с использованием двух направленных ответвителей и ваттметра МЗ-95. Исследовался коэффициент стоячей волны в питающем плазмотрон волноводе при его работе на высоком уровне мощности. Результаты измерений позволяют говорить о том, что не менее 80% СВЧ-мощности, генерируемой магнетроном, поступает в резонаторную рабочую камеру и там рассеивается на образование СВЧ-плазмы и нагрев резонатора.

Созданный СВЧ-плазмотрон использовался для исследования возможности применения СВЧ-плазмы в пищевой промышленности. С целью определения факторов бактерицидного воздействия СВЧ-плазмы на микробиологически загрязненные поверхности проведены экспериментальные исследования по изучению влияния условий облучения на гибель высушенной суспензии спор и клеток *Clostridium sporogenes* в плазменном факеле СВЧ-плазмотрона.

Для поисковых исследований проводились сеансы облучения чашечки Петри с высушенной суспензией на разных расстояниях над выходом плазменного факела (22 и 33 мм). Эксперименты показали снижение на 2-4 порядка числа выживших клеток и спор за время 60 секунд. Контролировалась температура в месте пятна с микроорганизмами. Исследование показало, что при облучении СВЧ-плазмой на малых промежутках времени гибель микроорганизмов обуславливается не только термическим воздействием плазмы. Бактерицидное воздействие на зараженную поверхность оказывает струя плазмы, температура ионизированного газа, УФ-излучение разряда и образующийся химически активный озон. Результаты экспериментальных исследований

бактерицидного воздействия плазмы сверхвысокочастотного разряда не только сопоставимы, но и лучше применяемой термической обработки, что показывает перспективность проведения исследований по применению СВЧ-плазмы для процессов асептики упаковочной тары в пищевой промышленности.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сделан аналитический обзор работ отечественных авторов, показавший, что создание СВЧ-плазмотронов атмосферного давления малой мощности является перспективной наукоемкой задачей, имеющей важное прикладное значение.

2. В результате анализа энергетических характеристик рабочих камер различных СВЧ-плазмотронов предпочтение отдано резонаторным рабочим камерам. Рассмотрена обширная номенклатура резонаторных рабочих камер для СВЧ-плазмотронов, пригодных для практического использования. Предложено использовать резонаторные рабочие камеры со штыревыми структурами для создания СВЧ-плазмотронов малой мощности.

3. Выполнены тепловые расчеты, которые показали возможность применения кварцевых трубок с внутренним диаметром 6 и 8 мм для создания системы продувки СВЧ-плазмотронов атмосферного давления с СВЧ-мощностью менее 1 кВт и расходом воздуха от 1 л/с.

4. Создана методика комплексной разработки СВЧ-плазмотронов, состоящая из согласованных расчетов электродинамических характеристик резонаторной рабочей камеры, коэффициента ее связи с СВЧ-трактом и системы СВЧ-питания от магнетрона мощностью 600 Вт. Выполнена

оценка электромагнитной безопасности по СВЧ-излучению из отверстия вывода плазмы.

5. Исследована работа СВЧ-плазмотрона атмосферного давления при мощности питания 600 Вт. Показано, что для обеспечения устойчивой работы магнетрона на резонансную нагрузку с изменяющимся входным сопротивлением может быть использована система стабилизации частоты питающего магнетрона самой резонаторной нагрузкой. Экспериментально показано, что при работе СВЧ-плазмотрона не менее 80% мощности СВЧ-генератора поступает в резонаторную рабочую камеру.

6. Разработана методика измерения и оценки энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона: поля температур плазменного факела, тепловой мощности плазменного факела и УФ-излучения из СВЧ-разряда.

7. Исследована возможность применения СВЧ-плазмы для бактерицидной обработки поверхности в пищевой промышленности. Определены факторы бактерицидного воздействия воздушной плазмы СВЧ-разряда атмосферного давления. Показана перспективность использования СВЧ-плазмотронов в процессах асептической обработки упаковочной тары.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности // Прикладная физика. 2011, №5. – С. 64-68.
2. Левшенко М.Т., Филиппович В.П., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. Исследование воздействия плазмы СВЧ-разряда для асептики упаковочной тары // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011, №10. – С. 13-16.

3. Смирнов К.Д., Прокопенко А.В. СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности / Физическое образование в вузах (Приложение. Труды конференции-конкурса молодых физиков. Москва, 13 февраля 2012 г.) Т.18, №1. – М. 2012. – С. 59.
4. Карабчевская О.В., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. Исследование энергетических характеристик плазмотрона атмосферного давления с СВЧ-мощностью 600 Вт / Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 6-10 февраля 2012 г. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2012. – С. 216.
5. Прокопенко А. В., Смирнов К. Д. СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности / 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. — Севастополь: Вебер, 2011. – С. 963-964.
6. Левшенко М.Т., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д., Филиппович В.П. СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности / VI Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (3-9 сентября 2011 г., Иваново, Россия): сборник трудов. Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2011. – С. 348-351.
7. Левшенко М.Т., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д., Филиппович В.П. Разработка СВЧ-плазмотрона атмосферного давления для обеззараживания упаковочной тары / Физика низкотемпературной плазмы – 2011: материалы Всероссийской (с международным участием) конференции (21-27 июня 2011 г.): в 2 т. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 129-134.
8. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. Разработка СВЧ-плазмотрона атмосферного давления / Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI

Бенардосовские чтения): Сборник научных трудов конференции. 1-3 июня 2011 г. Т.1 «Электроэнергетика», Иваново, 2011. – С. 17-19.

9. Смирнов К.Д., Прокопенко А.В. СВЧ-плазмотрон для пищевой промышленности / Физическое образование в вузах (Приложение. Труды конференции-конкурса молодых физиков. Москва, 31 января 2011 г.) Т.17, №1. – М. 2011. – С. 50.

10. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. СВЧ-плазмотрон для пищевой промышленности / Международная конференция для молодежи «Актуальные проблемы электромагнитной обработки материалов»: Сборник докладов научной конференции. 21-22 октября 2010 г., Москва. Издательство «Лайт», 2010. – С. 101-105.