

УДК 621.37

СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности

А. В. Прокопенко, К. Д. Смирнов

Разработан СВЧ-плазмотрон атмосферного давления с мощностью питания 600 Вт для прикладных задач. Выполнен расчет, оптимизация, настройка и исследование резонаторной рабочей камеры плазмотрона штыревого типа. Проведено экспериментальное исследование работы СВЧ-плазмотрона.

PACS: 52.50.Sw

Ключевые слова: СВЧ-плазмотрон, плазма, газ, резонатор, частота, напряженность, добротность, поле, эксперимент.

Введение

К новым технологическим направлениям использования СВЧ-энергии относятся разработки систем, использующих плазму СВЧ-разряда. СВЧ-плазма высокого давления востребована в перспективных направлениях науки, таких как: водородная энергетика, плазмохимия, космическая техника, источники света на основе СВЧ-разряда, осаждение пленок и генерация наноматериалов [1—3]. Достоинства безэлектродной неравновесной СВЧ-плазмы состоят в отсутствии загрязнения плазмы материалами электродов, в высокой эффективности передачи энергии в плазму и в возможности получения плазмы в газах при повышенных давлениях. Сравнительно новыми областями применения плазмотронов являются пищевая промышленность и ядерная энергетика.

В связи с высокой актуальностью применения СВЧ-плазмы создание устройств для ее генерации является важной задачей. Традиционно СВЧ-плазмотроны, работающие при атмосферном давлении, выполненные на основе волноводной рабочей камеры, имеют СВЧ-мощность более 1 кВт [3]. Работы по созданию подобных СВЧ-плазмотронов проводятся в России: в ФИАН, ИТ СО РАН, ФГУП МРТИ, ИОФ РАН [4—6].

В последние годы появился ряд работ, посвященных созданию СВЧ-плазмотронов на основе магнетронных генераторов непрерывного режима, используемых в бытовых микроволновых печах с

СВЧ-мощностью менее 1кВт [4]. Такие плазмотроны 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. Высокие напряженности электрических полей достигаются в резонаторных рабочих камерах с волной E и ТЕМ типов или с применением штыревых структур.

В данной работе разработан СВЧ-плазмотрон атмосферного давления мощностью 600 Вт для использования с целью асептики в пищевой промышленности. Выполнены расчет, конструирование и экспериментальное исследование резонаторной рабочей камеры с оптимальными энергетическими характеристиками. В ряде случаев использование плазмы СВЧ-разряда позволяет отказаться от химических методов асептики поверхности и повысить энергоэффективность нагрева. Расширение ассортимента упаковочной тары требует перехода от химических методов к новым физическим методам обработки поверхности. Разработанный плазмотрон предполагается использовать для исследований асептической обработки поверхности полимерной и комбинированной упаковочной тары.

Выбор и разработка рабочей камеры СВЧ-плазмотрона

Разработка СВЧ-плазмотронов разных типов ведется с начала 60-х годов прошлого века [3] с использованием генераторов большой средней мощности на волноводных и резонаторных структурах. В работе [4] представлен СВЧ-плазмотрон на основе объемного цилиндрического резонатора с колебанием типа E_{011} и магнетроном мощностью 800 Вт на частоте 2450 МГц. Аналитический расчет электродинамических характеристик (ЭДХ)

Прокопенко Александр Валерьевич, доцент.
Смирнов Константин Дмитриевич, аспирант.
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.
Тел.: (495) 324-87-66. E-mail: pav14@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2011 г.

© Прокопенко А. В., Смирнов К. Д., 2011

такого резонатора показал, что параметр напряженности электрического поля в месте поджига разряда составит $\xi_3 = E/\sqrt{Q \cdot P} = 2,6 \text{ (Ом)}^{0,5}/\text{см}$, где E — напряженность электрического поля, Q — собственная добротность, P — мощность питания резонатора на резонансной частоте. Следовательно, в цилиндрическом резонаторе с колебаниями E_{011} при добротности ~ 2000 и СВЧ-мощности ~ 800 Вт самостоятельный поджиг разряда при атмосферном давлении невозможен, т. е. требуется введение инициаторов.

Таким образом, при создании резонаторных рабочих камер для самостоятельного поджига разряда желательно использовать резонаторы с большей напряженностью электрического поля и высокой добротностью. По нашим оценкам, наиболее оптимальным резонатором для плазмотронов является цилиндрический резонатор со штыревой системой. С использованием метода конечных элементов при решении трехмерных краевых задач в объемных резонаторах численно выполнен расчет ЭДХ резонатора со штырем, размещенным соосно резонатору (рис. 1). 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 с округленными краями.

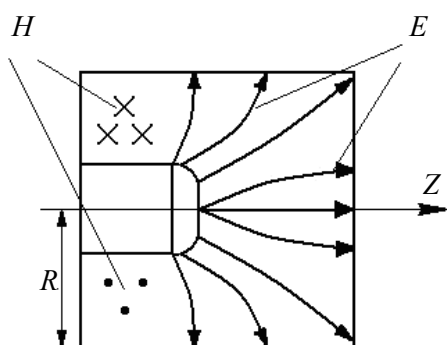


Рис. 1. Резонаторная рабочая камера плазмотрона

Последний штырь дает лучшие результаты, так как поперечные и продольные значения напряженности электрического поля на оси и на краях штыря отличаются не более чем на 10 %. Параметр напряженности электрического поля на оси в области штыря достигал значения $\xi_3 = 8,5 \text{ (Ом)}^{0,5}/\text{см}$. При таком значении параметра напряженности электрического поля эффективность поджига и горения разряда в резонаторе со штырем будет выше. Вид колебаний в резонаторе Е-типа имеет осевую симметрию (см. рис. 1). В центре штыревой вставки предусмотрено отверстие диаметром 10 мм для размещения кварцевой разрядной трубки. Выполнены расчеты и оптимизация размеров

штыревой вставки в резонатор на рабочей частоте 2450 МГц.

Методом резонатора-аналога с использованием численных данных проведен расчет коэффициента связи резонатора с прямоугольным волноводом сечением 72×20 мм на основной волне. Окно связи размещалось на цилиндрическом корпусе в районе штыря. Критическая связь обеспечивалась при ширине индуктивного окна связи 20 мм. Численное моделирование окна связи дает ширину критического окна связи 22 мм. Для обеспечения эффективной передачи СВЧ-энергии горящему разряду резонатор должен быть пересвязан с волноводом. Рассчитаны коэффициенты связи для ширины окна в диапазоне от 20 до 35 мм. Оптимальная ширина окна связи должна выбираться экспериментально при работе плазмотрона на высоком уровне мощности.

Разработана разъемная конструкция СВЧ-плазмотрона, состоящая из нескольких отдельных деталей: резонатора и волноводного перехода, соединяемых с помощью хомута-стяжки. Такая конструкция упрощает и ускоряет процесс сборки СВЧ-плазмотрона, а также в значительной степени делает удобным процесс настройки и экспериментального исследования устройства. Корпус цилиндрического резонатора выполнен из меди марки М1 (рис. 2, поз. 1). Штыревая вставка (не показана) и крышка радиусом 96 мм и толщиной 12 мм (рис. 2, поз. 2) делаются съемными и изготовлены из алюминия. Винтовое крепление штыря позволяет снимать его во время настройки резонатора на установленную частоту. В торцевых стенках резонатора и в штыре предусмотрены отверстия (рис 2, поз. 3) для установки кварцевой разрядной трубки (рис. 2, поз. 4), через которую продувается воздух, превращающийся в резонаторе в струю плазмы. Кварцевая разрядная трубка имеет внутренний диаметр 8,5 мм и внешний диаметр 10 мм.

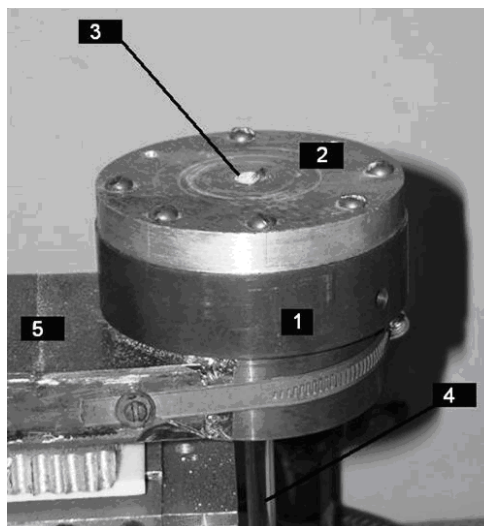


Рис. 2. Конструкция СВЧ-плазмотрона

Выполнена аналитическая оценка СВЧ-мощности, которая излучается из отверстия диаметром 10 мм в крышке плазмотрона. Теоретически показано, что даже при толщине крышки 4,0 мм плотность потока СВЧ-мощности не превысит установленной санитарной нормы безопасности в 10 мВт/см^2 . Расчет проводился без плазмы, когда напряженность электрического поля у отверстия будет максимальной.

Для подачи плазмообразующего газа предусмотрена система продувки с использованием бытового безмасляного компрессора с резистивным объемом 24 л и максимальным давлением 8 атм. Данная система позволяет регулировать расход воздуха от 1,0 до 3,5 л/с. Для размещения индуктивного зонда при измерении ЭДХ резонатора и для наблюдения за характером движения плазмы предусмотрен ряд отверстий в боковой стенке резонатора.

В качестве питающего СВЧ-генератора использовался магнетронный генератор с частотой 2450 МГц и мощностью до 600 Вт. Высоковольтный источник питания магнетрона собран по двухполупериодичной схеме выпрямления напряжения с двумя выпрямительными мостами и питается от однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Контроль и регулировка мощности осуществляются по току на аноде магнетрона. Для передачи мощности от СВЧ-генератора в резонатор используется волноводный переход прямоугольного сечения от волновода 72×34 к 72×20 мм (рис. 2, поз. 5), выполненный из медного листа толщиной 2 мм методом пайки.

Экспериментальные исследования характеристик изготовленной рабочей камеры и ее настройки проводились на штатной измерительной установке по методу четырехполюсника с использованием перестраиваемого генератора Г4-79, электронно-счетного частотомера ЧЗ-66 и гетеродинного анализатора спектра Ч4-27.

Измерения и подстройка резонаторной рабочей камеры начиналась с пустого резонатора (без кварцевой трубки) с малым коэффициентом связи $K_{св}$ при начальной ширине окна связи $h = 7$ мм. В качестве дополнительных устройств связи для исследований использовались емкостной штыревой зонд и индуктивный петлевой зонд, которые водятся погружаемые в объем резонатора. Введение кварцевой трубки уменьшает резонансную частоту устройства на 52 МГц. Для увеличения резонансной частоты укорачивалась штыревая вставка. Получена резонансная частота $f_0 = 2447,152$ при длине вставки $l = 16,5$ мм. Методом четырехполюсника при минимальных коэффициентах связи линий передач с резонатором измерена собственная добротность резонатора,

которая составила ~ 4200 . Влияние кварцевой разрядной трубки на собственную добротность оказалось незначительным.

При помощи панорамного измерителя КСВН Р2-86 производилась измерение и настройка окна связи резонатора с волноводным трактом. Экспериментальная настройка осуществлялась изменением ширины окна связи и при $K_{св} = 3,52$ составила $h = 27$ мм для резонатора без трубки. При увеличении окна связи наблюдался сдвиг частоты, который ликвидировался уменьшением длины штыря. Настроенный резонатор имел следующие параметры: резонансная частота 2449,3 МГц и нагруженная добротность ~ 1200 .

Исследование работы СВЧ-плазмотрона

Выполнено экспериментальное исследование и наладка плазмотрона на высоком уровне мощности. Рабочая камера плазмотрона питалась энергией от магнетронного генератора М105-1 через фазовращатель и волноводный переход. Резонаторная камера плазмотрона является нагрузкой с изменяемым сопротивлением при поджиге разряда. Устойчивая работа плазмотрона достигалась введением системы стабилизации частоты питающего магнетрона самой резонаторной нагрузкой [1]. При соответствующем положении фазовращателя магнетрон запускался на частоте, близкой к резонансной частоте плазмотрона, и далее следил за ее изменением. Кварцевая разрядная трубка присоединялась к воздушному компрессору с регулируемым расходом. После включения генератора регулирующей ручкой источника питания магнетрона увеличивался ток на аноде магнетрона. СВЧ-разряд поджигался уже при значениях анодного тока порядка 220 мА и устойчиво горел при 340 мА.

Для принудительной инициации разряда в кварцевой трубке, по которой подавался воздух, используются металлические проволочки диаметром 0,1 мм и длиной 2—5 мм. Проволочки предварительно засыпались внутрь кварцевой трубки, и при подаче воздуха они выдувались из резонатора, возбуждая разряд внутри кварцевой трубки. Объем плазмообразующего газа регулировался при помощи редуктора компрессора. В результате образовывался плазменный факел, который визуально наблюдался над резонатором (рис. 3). Высота факела составила до 35 мм.

При работе плазмотрона отмечена зависимость стабильности и высоты факела от расхода плазмообразующего газа. Лист бумаги плотностью 80 г/м^2 , поднесенный к факелу плазмотрона, загорался в течение 1—2 с. При экспериментальном

исследовании плазматрона выполнялось увеличение ширины окна связи с целью эффективной передачи энергии магнетрона горящему разряду.

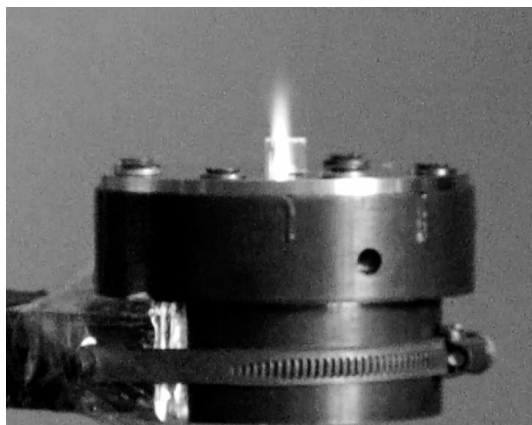


Рис. 3. Факел СВЧ-плазматрона

В дальнейшем предполагается исследование КСВН на высоком уровне мощности с применением измерительной линии, направленных ответвителей и ваттметра поглощаемой мощности МЗ—95.

Исследовалась электромагнитная совместимость плазматрона с использованием измерителя плотности потока энергии ПЗ-19. Измерительная антенна прибора устанавливалась с боку и сверху на расстоянии 50 см от центра рабочей камеры плазматрона. Измерения проводились после поджига разряда при устойчиво горящем факеле в течение двух минут. Высота плазменного факела при исследовании была не более 35 мм. Измеренная плотность потока энергии не превысила $8,2 \text{ мВт/см}^2$, что соответствует всем принятым санитарным нормам.

Совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом консервной и овощесушильной промышленности Российской академии сельскохозяйственных наук исследуется возможность применения разработанного плазматрона для обработки внутренней поверхности специальной упаковочной тары, которая искусственно заражается микроорганизмами. Бактерицидное действие на поверхность упаковки оказывает температура плазмы, УФ-излучение разряда и химически активный озон, образующийся от УФ-излу-

чения. Уже выполнены предварительные эксперименты, показавшие перспективность плазменного метода бактерицидной обработки упаковочной тары.

Заключение

Разработан плазматрон атмосферного давления с СВЧ-мощностью 600 Вт для проведения прикладных исследований. Предложено использовать резонаторы со штыревыми структурами для создания эффективных рабочих камер СВЧ-плазматронов. Выполнен расчет и оптимизация энергетических характеристик цилиндрического резонатора со штырем. Разработана конструкция плазматрона и проведены настройка и экспериментальные исследования его работы. Исследованы вопросы безопасной эксплуатации плазматрона по СВЧ-излучению. Показана перспективность применения СВЧ-плазмы атмосферного давления в задачах асептики в пищевой промышленности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-1437.2009.8.

Литература

1. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. — М.: Наука, 2003.
2. Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
3. Дресвин С. В. ВЧ- и СВЧ-плазматроны. — Новосибирск: Наука, 1992.
4. Буров В. Ф., Стрижко Ю. В. СВЧ-плазматрон со свободно парящим плазмодом // Сб. докл. VI Всерос. конф. "Горение твердого топлива", 8—10 ноября 2006. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2006. С. 36—42.
5. Есаков И. И., Лавров П. Б., Раваев А. А., Ходатаев К. В. Вихревой СВЧ-плазматрон атмосферного давления // Сб. докл. XXXVII Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 8—12 февраля 2010. — Звенигород, 2010. С. 47.
6. Антонов А. В., Власов Д. В., Лукина Н. А., Сергейчев К. Ф. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 121—125.

Microwave plasma torch at atmospheric pressure for the food industry

A. V. Prokopenko, K. D. Smirnov

National Research Nuclear University (MEPhI),
Moscow, 31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: pav14@mail.ru

Designed is a microwave plasma torch at atmospheric pressure with the 600-W power supply for application tasks. The calculation, optimization, tuning and investigation of a pin type cavity

of the working chamber plasma torch were made. Experimental investigation of microwave plasma torch has been performed.

PACS: 52.50.Sw

Keywords: microwave plasma torch, plasma, gas, cavity, frequency, intensity, quality factor, field, experiment.

Bibliography — 6 references.

Received February 28, 2011

* * *