

УДК 621.37

Исследование энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона атмосферного давления малой мощности

А. В. Прокопенко, К. Д. Смирнов

Представлены результаты исследования энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона атмосферного давления мощностью 600 Вт: измеряется поле температур воздушно-плазменной струи, доля УФ-излучения от плазменной струи и тепловая мощность плазменного факела. Разработанные методы исследований могут использоваться для исследований энергетических характеристик плазмотронов большей мощности.

PACS: 52.50.Sw

Ключевые слова: СВЧ-плазмотрон, плазма, резонатор, температура, мощность, энергетические характеристики, эффективность.

Введение

В последнее десятилетие работы по созданию СВЧ-плазмотронов атмосферного давления с СВЧ-мощностью до 5 кВт активно проводятся в России [1–7]. В приведенных публикациях описываются полученные результаты по разработке СВЧ-плазмотронов атмосферного давления и указываются актуальность и области применения таких приборов. Для многих технологических процессов (сжигание, плазмохимическая переработка, получение наноматериалов, обеззараживание поверхности) значительный интерес представляет создание методики измерения энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона.

Исследование характеристик плазменной струи необходимо для оценки энергетической эффективности СВЧ-плазмотрона, т.е. какая часть СВЧ-энергии преобразовывается в энергию плазменного факела. Анализ публикаций, проведенный в [1], показал, что в работах по созданию СВЧ-плазмотронов атмосферного давления отсутствуют такие измерения.

Целью данной работы является создание методики измерений и исследование энергетических характеристик плазмотрона с СВЧ-мощностью 600 Вт. Подобные устройства применяются для бактерицидного воздействия СВЧ-плазмы на поверхность [8, 9]. В задачи исследования входит измерение поля температур воздушно-плазмен-

ной струи, доля УФ-излучения от плазменной струи и тепловая мощность плазменного факела. Можно надеяться, что разработанные методы могут в дальнейшем использоваться для исследований энергетических характеристик плазмотронов большей мощности.

СВЧ-плазмотрон с мощностью СВЧ-питания 600 Вт для исследований бактерицидной обработки поверхности

Ранее был разработан и создан СВЧ-плазмотрон атмосферного давления с СВЧ-мощностью 600 Вт на частоте 2450 МГц [2]. При разработке рабочей камеры предложена методика комплексного расчета СВЧ-плазмотрона малой мощности, состоящая из согласованного расчета электродинамических характеристик (ЭДХ) резонаторной рабочей камеры, устройства связи, системы СВЧ-питания и системы продувки плазмообразующего газа. Плазмотрон использовался для исследования бактерицидного воздействия воздушного СВЧ-разряда на поверхность. Схема резонатора плазмотрона приведена на рис. 1.

В результате расчета выбраны размеры цилиндрического резонатора ($R = 30$ мм и $L = 33,4$ мм) и штыревой вставки, в которой для системы продувки устанавливается кварцевая трубка с внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм, размещенная соосно резонатору. Параметр напряженности электрического поля на оси в области поджига разряда достигал значения $\xi_z = E_z / (P \cdot Q)^{0.5} = 9,4$ (Ом)^{0.5}/см, где E_z — напряженность электрического поля, P — СВЧ-мощность поступающая в резонатор, Q — собственная добротность резонатора. Ввод мощности в резонатор осуществлялся через боковую стенку индуктивным отверстием связи с прямоугольным волноводом сечением 72×34 мм.

Прокопенко Александр Валерьевич, доцент.
Смирнов Константин Дмитриевич, ст. преподаватель.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.
Тел.: +7 (495) 324–87–66.
E-mail: pav14@mail.ru; kostya_smirnov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2013 г.

© Прокопенко А.В., Смирнов К.Д., 2013

Полученная струя чистой плазмы атмосферного давления, достигающая высоты до 35 мм, применяется для обработки поверхности, искусственно зараженной микроорганизмами. Проведены экспериментальные исследования по изучению влияния условий облучения на гибель высушенной суспензии спор и клеток бактерии *Clostridium sporogenes* в плазменном факеле плазмотрона [8, 9]. В экспериментах достигнуто практически полное уничтожение микроорганизмов. Бактерицидное воздействие на поверхность упаковки оказывает струя плазмы, а именно, температура ионизированного газа, УФ-излучение разряда и образующиеся химически активные вещества.

Исследование энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона позволит определить преобладающие факторы бактерицидного воздействия и оценить эффективность плазменного метода обработки.

Измерения энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона

В лаборатории «СВЧ-энергетика» НИЯУ МИФИ исследованы энергетические характеристики разработанного СВЧ-плазмотрона атмосферного давления при мощности СВЧ-питания 600 Вт с расходом воздуха от 1,0 л/с до 3,0 л/с.

Выполнены измерения поля температур воздушной плазменной струи СВЧ-плазмотрона при различных расходах воздуха. Измерялась температура, до которой воздушно-плазменная струя может нагреть малоинерционную хромель-алюмелевую термопару К-типа объемом менее 1 мм³, с предельной температурой измерения до 1300 °С и погрешностью до ±1%. 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. На рис. 2 представлены некоторые результаты выполненных измерений.

При минимальном расходе газа 1,3 л/с температура на оси у выхода плазменного факела составила порядка 1100 °С, а при увеличении расхода до 2,7 л/с, она падала до 200 °С. С увеличением расстояния от выхода плазмотрона температура воздушной плазменной струи нелинейно падала. Такая же зависимость наблюдается на расстоянии 3,5 мм от оси плазмотрона. В результате исследований установлено, что температурные характеристики плазменного факела уменьшаются при увеличении расхода плазмообразующего газа.

Проведены исследования излучательной способности факела СВЧ-плазмотрона в УФ-диапазоне. Оценочные измерения выполнены с помощью УФ-радиометра ТКА-ПКМ-12 на рас-

стоянии 20 см от отверстия выхода плазмообразующего газа. 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 непосредственно 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/м², что превышает установленную норму 1 мВт/м². При измерениях не наблюдалось существенной зависимости энергетической освещенности от расхода воздуха. Таким образом, высокие температуры и ульт-

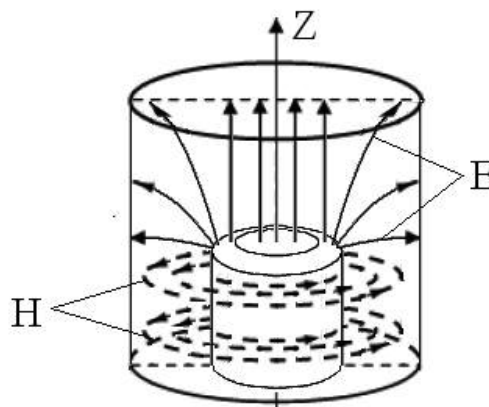


Рис. 1. Резонаторная рабочая камера СВЧ-плазмотрона

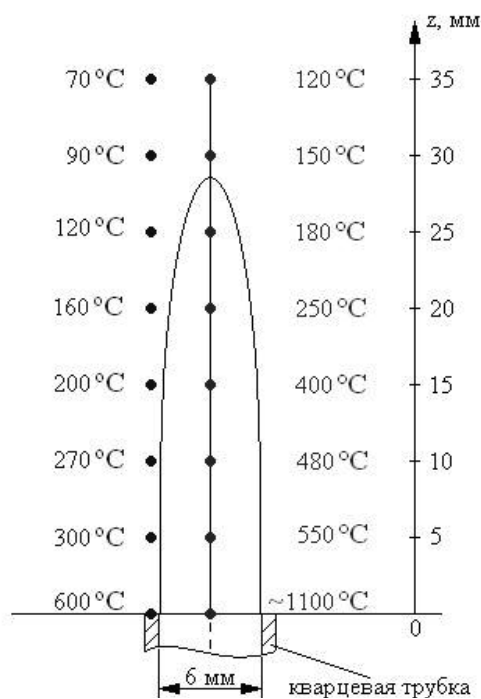


Рис. 2. Поле температур воздушной плазменной струи СВЧ-плазмотрона при расходе воздуха $V=1,3$ л/с

трафиолетовое излучение СВЧ-разряда являются действующими бактерицидными факторами.

Для определения энергетической эффективности плазмотрона выполнено измерение тепловой мощности воздушной плазменной струи. Для измерений разработана калориметрическая нагрузка (рис. 3), которая позволяет перевести большую часть тепла от горячей воздушно-плазменной струи в нагрев воды.

Нагрузка представляет собой медную трубку радиусом 6 мм и толщиной стенки 1 мм, свернутую в спираль, которая образует 14 колец. Спираль вставлена в медный цилиндр радиусом 18 мм с крышкой толщиной 1 мм и высотой 90 мм. Этот цилиндр обернут в термоизолирующий материал, представляющий собой лист пенополиэтилена, покрытый тонкой металлической пленкой. Вся конструкция вставлена во внешний цилиндр высотой 134 мм и радиусом 36 мм, также сделанный из листовой меди толщиной 1 мм и покрытый термоизолирующим материалом с тонкой металлической пленкой. В верхней части внешнего цилиндра проделаны 2 ряда отверстий диаметром 5 мм, из которых нагретый воздух, прошедший через теплообменник, выходит в атмосферу. Термопара монтировалась снаружи в верхнюю трубку теплообменника, откуда вытекает нагретая вода.

Конструкция нагрузки подразумевает эффективное взаимодействие нагретого воздуха с теплообменником благодаря многократной циркуляции воздуха, что способствует максимальной теплопередаче воде.

Однако при расходе воздуха более 1 л/с очень трудно создать термоизолированную нагрузку, в которой может поглотиться все тепло плазменного факела. Поэтому в данном случае для увеличения точности измерений использовался метод

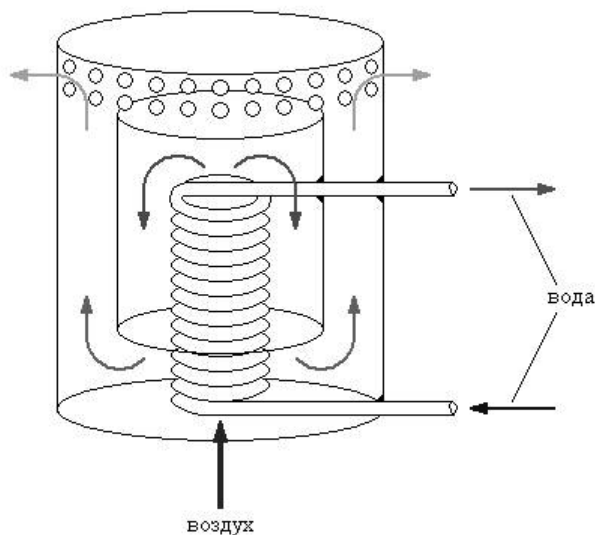


Рис. 3. Водяная нагрузка для измерения тепловой мощности плазменного факела

сравнения. В методе сравнения применяется электрический аналог плазменной струи в виде спирали накаливания с контролируемой мощностью от 100 Вт до 700 Вт, нагревающей воздух, который затем поступает в нагрузку (рис. 4). В качестве аналога для сравнения используется нагревательный элемент, энергия с которого в стационарном режиме снимается струей воздуха, аналогичной струе плазмотрона.

С использованием аналога для расхода воздуха от 1 л/с до 2,5 л/с выполнена градуировка калориметрической нагрузки в стационарном режиме при постоянном расходе воды 0,2 л/мин. При градуировке измерялась зависимость перепада температуры воды на входе и выходе теплообменника ΔT от тепловой мощности нагретого воздуха P . Градуировочный график представлен на рис. 5.

С использованием полученных градуировочных графиков калориметрической нагрузки проведены измерения тепловой мощности плазменного факела при различных расходах воздуха. Нагрузка ставится плотно на крышку СВЧ-плазмотрона так, чтобы образовавшийся плазменный факел находился в центре спирали нагрузки (аналогично предыдущему измерению с нагретым воздухом). В ходе измерений установлено, что тепловая мощность плазменного факела составляет не менее 370 Вт при мощности СВЧ-питания 600 Вт. Максимальное полученное значение тепловой мощности плазменного факела 490 Вт. Погрешность измерения мощности при использовании метода сравнения, согласно расчетам, составила не более 7%. Таким образом, результаты измерения показывают, что коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую мощность плазменного факела составил не менее 0,6.

Для определения эффективности разработанной резонаторной рабочей камеры плазмотрона

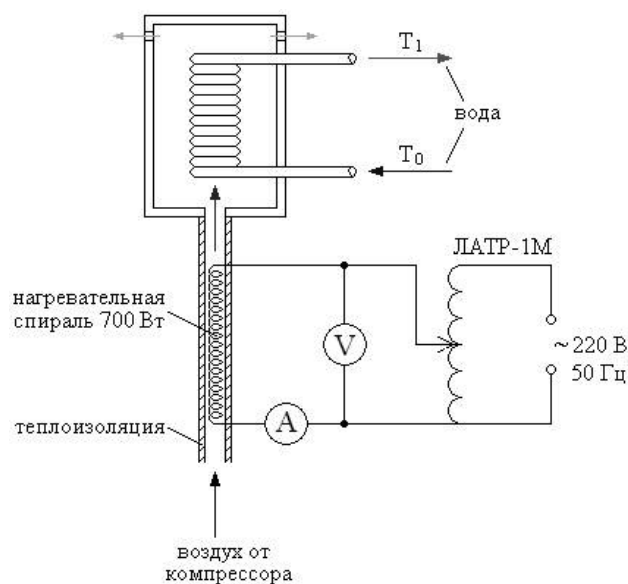


Рис. 4. Схема градуировки измерительной нагрузки

и системы СВЧ-питания выполнено исследование работы СВЧ-плазмотрона на высоком уровне мощности с использованием двух последовательно подключенных направленных волноводных ответвителей и ваттметра МЗ–95.

Для измерения проходящей мощности от магнетрона в резонатор используется направленный ответвитель НО1 с коэффициентом переходного ослабления 26,8 дБ и коэффициентом направленности 7,2 дБ. К входному плечу 1 НО1 подключается магнетрон через волноводный переход прямоугольного сечения от 72×34 мм на 90×45 мм. К вспомогательным плечам 2 и 4 НО1 подсоединяются коаксиально-волноводный переход и согласованная водоохлаждаемая нагрузка с непосредственным поглощением, выполненная на основе прямоугольного волновода размерами 90×45 мм с КСВН менее 1,1. К выходному плечу 3 НО1 подсоединяется плечом 3 направленный ответвитель НО2 с коэффициентом переходного ослабления 31,7 дБ и коэффициентом направленности 8,85 дБ. К вспомогательным плечам 2 и 4 НО2 подсоединяются коаксиально-волноводный переход и согласованная коаксиальная нагрузка с КСВН менее 1,1 на частоте $f < 3$ ГГц. К плечу 1 НО2 подключается резонатор через последовательно соединенные прямоугольные волноводные переходы сечением 90×45 мм на 72×34 мм и 72×34 мм на 72×20 мм. Для измерения мощности падающих и отраженных волн при горящем плазменном факеле применяется ваттметр МЗ–95, который через коаксиально-волноводный переход подключается попеременно к вспомогательному плечу 2 НО1 и к вспомогательному плечу 2 НО2.

Выполнена серия измерений мощности падающей P_1 и отраженной волн P_2 , ответвляемых во вспомогательные плечи направленных ответвителей НО1 и НО2 при различном расходе воздуха.

Исследовался коэффициент стоячей волны в волноводе сечением 90×45 мм при работе плаз-

мотрона 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. При измерениях не наблюдалась явная зависимость эффективности работы плазмотрона от расхода плазмообразующего газа. Результаты измерений показали высокую эффективность разработанной рабочей камеры СВЧ-плазмотрона и отсутствие явной зависимости эффективности передачи СВЧ-энергии в резонатор от расхода плазмообразующего газа.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона атмосферного давления малой мощности. Предложена методика измерения и оценки энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона, а именно, поля температур плазменного факела, тепловой мощности плазменного факела и УФ-излучения из СВЧ-разряда. Результаты исследований энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона показали его высокую эффективность.

Литература

1. Диденко А.Н., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. // Известия Российской Академии Наук, серия Энергетика. 2012. № 3. С. 144
2. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 64
3. Буров В.Ф., Стрижко Ю.В. // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 4. № 2. С. 103
4. Антонов А.В., Власов Д.В., Лукина Н.А., Сергеевичев К.Ф. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 121
5. Есаков И.И., Лавров П.Б., Раваев А.А., Ходатаев К.В. Вихревой СВЧ-плазмотрон атмосферного давления / Сб. докл. «XXXVII Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 8–12 февраля 2010. Секция Физические основы плазменных и лучевых технологий. Звенигород, 2010.
6. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 216 с.
7. Куркин Е.Н., Шульга Ю.М., Домашнев И.А. и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 8. С. 25
8. Левшенко М.Т., Филиппович В.П., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 10. С. 13
9. Левшенко М.Т., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д., Филиппович В.П. Исследование бактерицидного воздействия плазмы СВЧ-разряда на поверхность упаковочной тары / Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннотации докладов. Т. 2. Проблемы фундаментальной науки. Стратегические информационные технологии. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

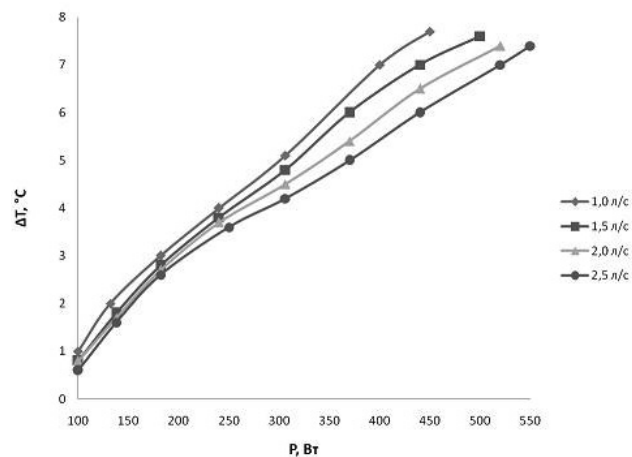


Рис. 5. Градуировочный график измерительной нагрузки

Investigation of the energy characteristics of the microwave plasma torch at atmospheric pressure with low power supply

A.V. Prokopenko and K.D. Smirnov

National Research Nuclear University «MEPhI»
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: pav14@mail.ru; kostya_smirnov@inbox.ru

The results of studies of the energy characteristics of the microwave plasma torch at atmospheric pressure with microwave power supply 600 watts: measured the temperature field of plasma air stream, the proportion of UV radiation from the plasma stream and thermal capacity of the plasma torch. The methods developed can be used for research studies the energy characteristics of plasma torches more power.

PACS: 52.50.Sw

Keywords: microwave plasma torch, plasma, cavity, temperature, power, energy characteristics, efficiency

Bibliography — 9 references

Received November 15, 2013