

10 и 45 с после распыления в соответствии с приведенной выше моделью.

Массовое распределение постепенно «размазывается» за счет коагуляции, и его максимум смещается в сторону меньших размеров за счет испарения мелких капель.

Выводы

Представлены результаты теоретического исследования взрывного способа генерации водяного аэрозоля, который можно рассматривать как предельный случай гидравлического метода распыле-

ния: резкий скачок давления в системе происходит в результате действия взрыва. Показана роль кавитации в процессе формирования высокодисперсного аэрозоля. Предложена модель дальнейшей эволюции полученного аэрозоля с учетом процессов испарения и коагуляции; с помощью численных расчетов получено распределение частиц аэрозоля по размерам в зависимости от времени. Представленные результаты сравнения экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о физической адекватности предлагаемой математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Буренок В.М., Корчак В.Ю., Смирнов С.С. Оружие нелетального действия – составная часть системы вооружения будущего // Вестник Академии военных наук. – 2007. – № 4. – С. 117–127.
- 2 Стебновский С.В. Импульсное диспергирование как предельный режим разрушения жидкого объема // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – № 2. – С. 117–128.
- 3 Кедринский В.К. Газодинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 435 с.
- 4 Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 284 с.

Поступила 17.06.2010 г.

УДК 533.9.01

ОСОБЕННОСТИ ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА

В.А. Власов, Ю.Ю. Луценко, Н.В. Корепанова, Е.П. Зеленецкая

Томский политехнический университет
E-mail: luts@mail.ru

Приведены результаты измерений осевого распределения гармонических составляющих электрического поля емкостного разряда, горящего в среде аргона и воздуха, при изменении частоты основной гармоники. Установлен полирезонансный характер затухания гармоник в плазме разряда. Рассмотрено влияние температуры электронов, и соответственно концентрации электронов плазмы разряда на затухание частотных составляющих. Установлен аномальный рост третьей гармонической составляющей электрического поля при уменьшении электронной температуры плазмы разряда.

Ключевые слова:

Высокочастотный емкостной разряд, гармоники, электромагнитное поле, электронная температура, плазма, параметрический резонанс.

Key words:

High-frequency capacitive discharge, harmonic components, electromagnetic field, electron temperature, plasma, parametric resonance.

Введение

Высокочастотный разряд емкостного типа, горящий при атмосферном давлении, представляет собой тонкий плазменный шнур, окруженный слабо светящейся диффузионной оболочкой. Горение высокочастотных разрядов емкостного типа осуществляется за счёт [1, 2] диссипации поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся вдоль канала разряда. По условиям возбуждения поверхностной электромагнитной волны в плазме разряда данные разряды можно подразделить на высокочастотный факельный разряд и высокочастотный емкостной разряд. Высокочастотный факельный разряд зажигается с конца металлического электро-

да, обычно имеющего цилиндрическую форму. Возбуждение же емкостного разряда осуществляется электродом, охватывающим разрядную трубку. Поэтому высокочастотный емкостной разряд в отличие от высокочастотного факельного разряда является безэлектродным разрядом.

В работе [3] нами было установлено отсутствие затухания первых двух гармонических составляющих электромагнитного поля вдоль оси факельного разряда, горящего в воздухе. Для случая факельного разряда, горящего в среде аргона, было установлено отсутствие затухания первых трёх гармоник. В то же время с увеличением частоты электромагнитной волны её затухание должно возрастать. Для

объяснения полученных результатов было высказано предположение о параметрическом взаимодействии внешнего электромагнитного поля с собственными колебаниями плазмы факельного разряда. В работе [4] показано, что электромагнитное поле высокочастотного емкостного разряда идентично электромагнитному полю высокочастотного факельного разряда, за исключением зоны непосредственно примыкающей к высокочастотному электроду, где происходит формирование поверхностной электромагнитной волны. Поэтому представляет интерес рассмотреть поведение частотных составляющих электромагнитного поля емкостного разряда по аналогии с факельным разрядом.

В настоящей работе проведены измерения осевого распределения гармонических составляющих электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда при различных частотах его горения. Измерения проводились для случая высокочастотного емкостного разряда, горящего в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Также рассмотрен вопрос о влиянии на характер затухания частотных составляющих температуры электронов и соответственно, концентрации электронов плазмы разряда.

Схема экспериментальной установки и методика измерений

Высокочастотный емкостной разряд возбуждался в кварцевой трубке с внутренним диаметром 28 и длиной 500 мм. Для возбуждения разряда использовался один кольцевой электрод, диаметром 70 мм, на который подавался высокочастотный потенциал. Второй – заземлённый электрод не использовался. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. При горении разряда в среде аргона расход плазмообразующего газа составлял 0,4 м³/ч. При горении в воздухе – 0,5 м³/ч. Мощность разряда ориентировочно находилась в пределах от 0,5 до 1,0 кВт. Длина канала разряда при горении в воздухе составляла 20...25 см. При горении в аргоне – разряд заполнял всю кварцевую трубку.

Частота горения разряда варьировалась от 34,8 до 40,2 МГц; мощность разряда менялась не более чем на 10...15 %. Измерения радиальной компоненты электрического поля проводились посредством емкостного зонда, сигнал с которого по линии с двойной экранировкой подавался на вход спектроанализатора GSP-827. Емкостной зонд представлял собой медный штырь длиной 5 и диаметром 1 мм. Расстояние от оси разряда составляло 60 мм. Проводились измерения первых пяти гармоник электрического поля. Гармоники более высокого порядка не превышали 10 дБмВ, поэтому не учитывались.

При горении разряда в среде аргона проводилась также оценка электронной температуры плазмы разряда. Измерение электронной температуры проводилось двумя способами. Первый способ – по частотной зависимости интенсивности излучения континуума атомов аргона в диапазоне длин

волн от 3300 до 4000 Å. Измерения проводили в соответствии с методикой [5], согласно которой интенсивность излучения континуума ε_v атомов аргона в этом диапазоне длин волн может быть описана зависимостью:

$$\varepsilon_v = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right).$$

Здесь h – постоянная Планка; ν – частота; T_e – электронная температура.

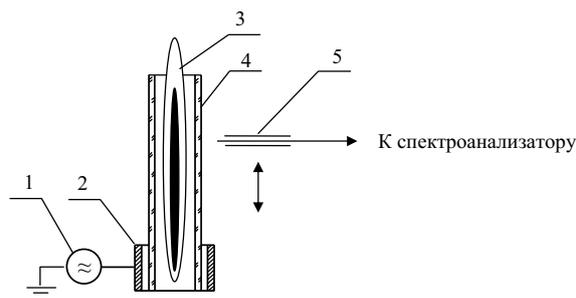


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1) высокочастотный генератор; 2) высоковольтный электрод; 3) разрядная плазма; 4) разрядная камера; 5) емкостной зонд

Однако, в отличие от [5] экспоненциальная зависимость интенсивности излучения континуума от частоты наблюдалась лишь в диапазоне длин волн от 3300 до 3600 Å. При больших длинах волн на континуум накладывался спектр молекулярной полосы CN. Поэтому данный способ был неточен и использовался для грубой оценки температуры. Второй способ – измерение электронной температуры по относительным интенсивностям линий меди. Для этого в нижнюю часть разрядной трубки вводились пары меди. Использовались линии: 5106, 5153 и 5218 Å. Энергии и относительные вероятности переходов, соответствующих данным линиям, взяты из работы [6].

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений осевого распределения первых пяти гармоник радиальной компоненты электрического поля E_r высокочастотного емкостного разряда, горящего в среде аргона, приведены на рис. 2, для разряда, горящего в воздухе – на рис. 3.

По оси абсцисс отложено расстояние от верхней кромки высокочастотного электрода до точки измерения; по оси ординат – амплитуда сигнала I_{E_r} , пропорционального напряженности электрического поля. Вблизи электрода наибольший вклад в распределение электромагнитного поля [4] вносит электромагнитное поле электрода, а не поверхностной ТМ волны, распространяющейся вдоль канала разряда. Поэтому на рис. 2 и 3 осевые распределения гармоник приведены, начиная лишь с определённого расстояния от высокочастотного

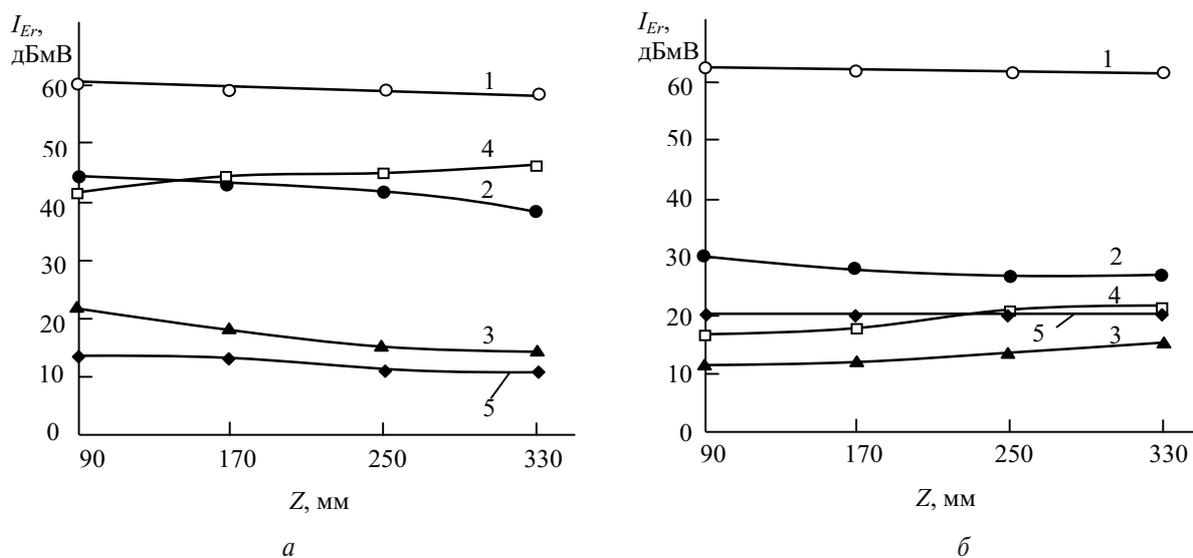


Рис. 2. Осевое распределение амплитуд гармоник электрического поля высокочастотного емкостного разряда, горящего в аргоне. 1-5 – номера гармоник при частоте разряда: а) 37,5; б) 39,8 МГц

электрода. Это расстояние определяется длиной зоны формирования поверхностной электромагнитной волны, которое в нашем случае составляет 60...80 мм.

Как видно из рис. 2 и 3, затухание гармоник вдоль оси высокочастотного емкостного разряда не обязательно увеличивается с увеличением порядкового номера гармоники. В то же время при распространении поперечно-магнитной волны вдоль проводящего цилиндра её затухание должно возрастать с увеличением частоты электромагнитных колебаний. Следовательно, для высокочастотного емкостного разряда, так же, как и для случая [3], высокочастотного факельного разряда, можно

предположить существование параметрического взаимодействия внешнего электромагнитного поля с собственными колебаниями плазмы разряда.

Величины осевого затухания гармоник электрического поля в зависимости от частоты основной гармоники представлены на рис. 4 для аргона и воздуха соответственно.

На рис. 4, а, по оси ординат отложена в логарифмическом масштабе величина затухания гармоник электрического поля между точками 90 и 330 мм. На рис. 4, б – величина затухания гармоник электрического поля между точками 90 и 250 мм. Расстояние 250 мм приблизительно соответствует окончанию канала разряда, горящего в воздухе.

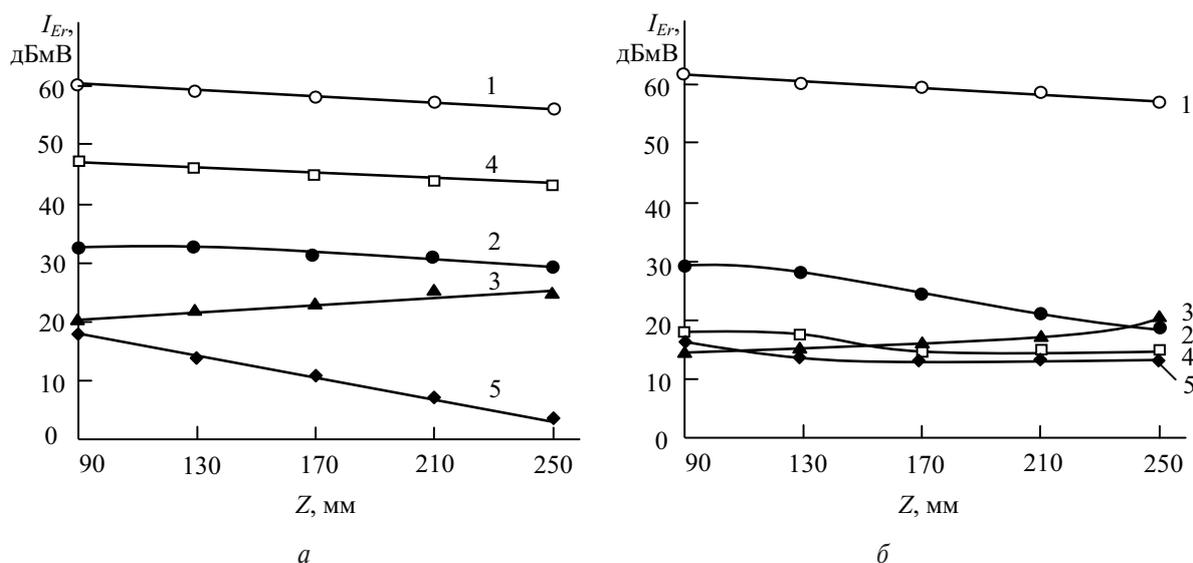


Рис. 3. Осевое распределение амплитуд гармоник электрического поля высокочастотного емкостного разряда, горящего в воздухе. 1-5 – номера гармоник при частоте разряда: а) 37,5; б) 39,8 МГц

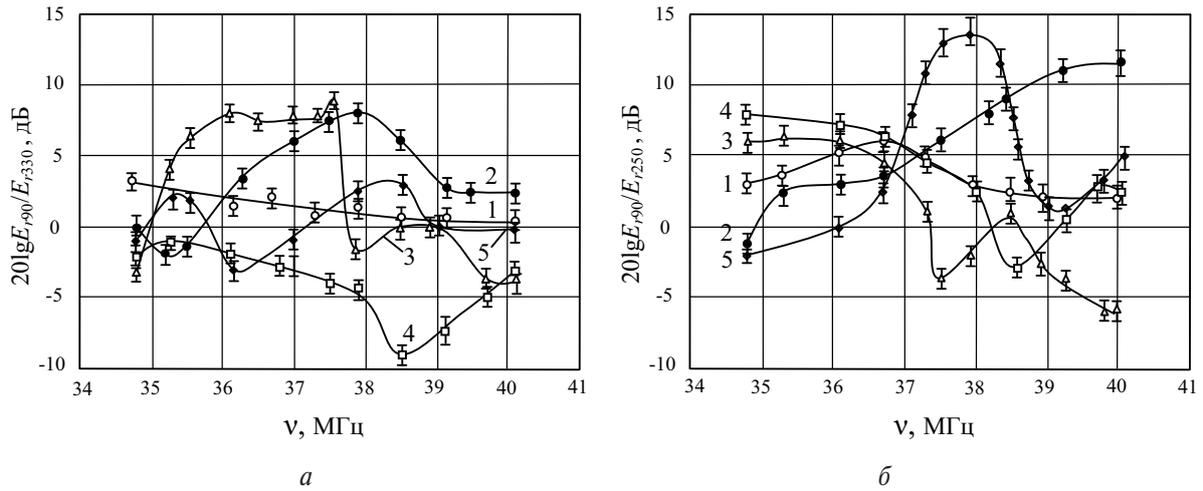


Рис. 4. Зависимость величины затухания электромагнитного поля вдоль оси емкостного разряда от частоты. 1–5 – номера гармоник: а) аргон; б) воздух

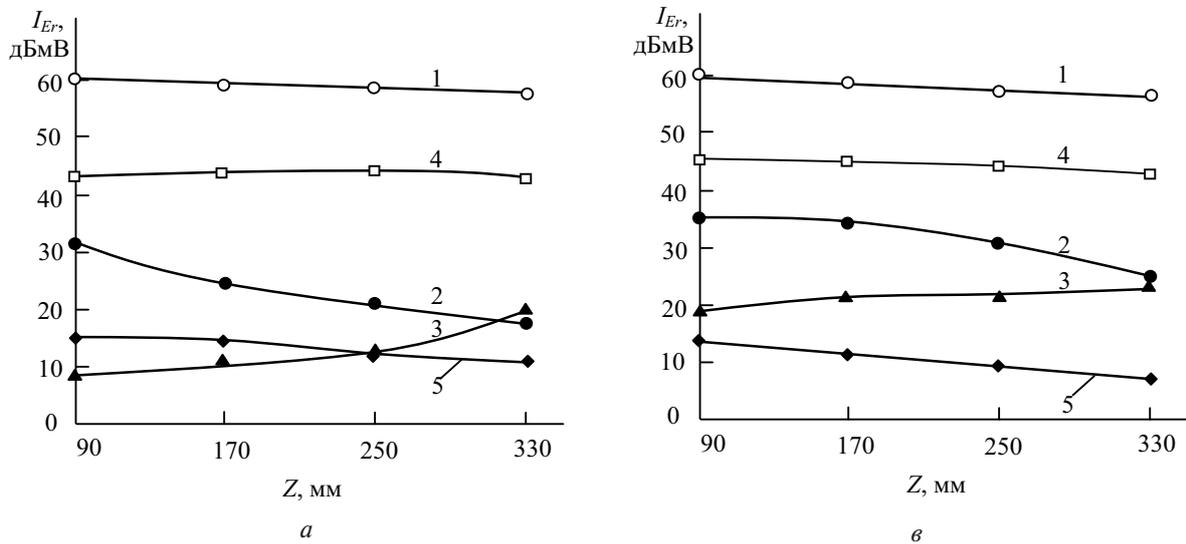
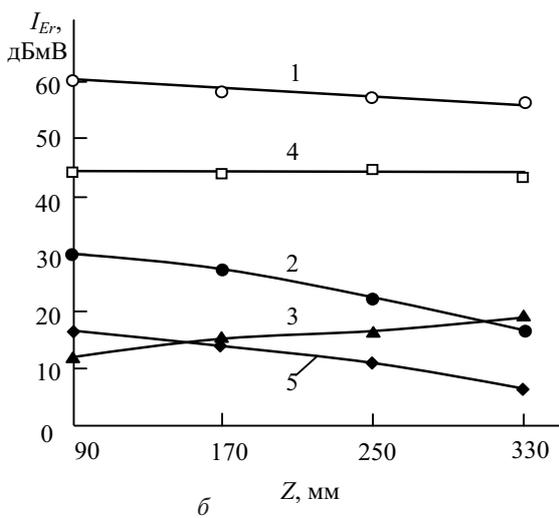


Рис. 5. Осевое распределение амплитуд гармоник электрического поля емкостного разряда, горящего в смеси аргон – воздух: а) А:В=90:10, $T_e=6950$ К; б) А:В=80:20, $T_e=6500$ К, в) А:В=70:30, $T_e=6200$ К



Как видно из рис. 4 осевое затухание гармонических составляющих высокочастотного емкостного разряда существенно зависит от частоты. В частности, переход от роста к затуханию, и обратно к росту третьей гармоники электрического поля разряда, горящего в аргоне, происходит при изменении частоты горения разряда на 3,5...4 МГц. Аналогично, выраженное затухание второй гармоники при горении разряда в аргоне, наблюдается лишь при изменении частоты на 2...2,5 МГц. При горении разряда в воздухе выраженное затухание пятой гармоники наблюдается в диапазоне частот 2...2,5 МГц. Подобный характер изменения гармоник в зависимости от частоты можно назвать резонансным. Можно предположить, что подобное поведение гармоник вдоль оси разряда связано

с отражением электромагнитной волны в конце канала разряда и образованием стоячей волны. Однако, как показывают расчёты, такое изменение амплитуды гармоник вдоль оси разряда возможно лишь при изменении волнового числа электромагнитной волны в несколько раз. Учитывая, что для случая проводящего цилиндра, волновое число пропорционально корню квадратному от частоты, получим, что величина частоты должна измениться минимум в десятки раз. В нашем же случае изменение частоты составляет всего 10...15 %. Таким образом, полученные нами экспериментальные результаты не могут быть объяснены лишь на основе предположения об отражении электромагнитной волны в конце канала разряда.

Также на распределение электромагнитного поля могут оказать влияние окружающие предметы, например металлическая стенка высокочастотного генератора. Для проверки этого влияния нами проводились измерения электромагнитного поля ёмкостного разряда, ориентированного как вдоль, так и перпендикулярно стенке генератора. Существенных различий в результатах измерений обнаружено не было.

При разбавлении аргона, подаваемого в разряд, воздухом, электронная температура разряда уменьшается. Уменьшается также концентрация электронов в плазме разряда. Так, в чистом аргоне измеренная электронная температура разряда составляла 8300 К. В случае добавления в аргон 10...15 % воздуха электронная температура разряда уменьшается до 7000 К. На рис. 5 представлены осевые распределения гармоник электрического поля ёмкостного разряда, горящего в аргоне с различным добавлением воздуха на частоте 37,5 МГц. Там же приведены результаты измерений электронной температуры на оси разряда.

Если сопоставить эти распределения с распределениями, полученными для чистого аргона (рис. 2, а), то можно видеть, что добавление воздуха в аргон вызывает увеличение затухания всех гармоник, за исключением третьей гармоники. Третья гармоника, вместо затухания наоборот, возрастает. Причём, чем меньше величина разбавления аргона

воздухом, тем больше рост третьей гармоники вдоль оси разряда. Подобное anomальное поведение третьей гармоники реализуется лишь в достаточно узком частотном диапазоне.

Данный эффект можно объяснить следующим образом. При разбавлении аргона воздухом концентрация электронов, и соответствующая ей плазменная частота уменьшаются до величин, обеспечивающих параметрический резонанс третьей гармоники поля. Вследствие этого наблюдается рост третьей гармоники вдоль оси разряда. При дальнейшем увеличении количества воздуха в плазмообразующем газе, концентрация электронов в плазме уменьшается в ещё большей степени, что вызывает рассогласование частоты третьей гармоники поля с резонансной частотой.

Таким образом, полученные нами экспериментальные результаты не могут быть объяснены посредством линейной электродинамической модели разряда. В первую очередь это связано с отсутствием увеличения затухания электромагнитного поля с увеличением его частоты. Частотная зависимость имеет более сложный, скорее всего циклический характер, что в свою очередь, позволяет предположить существование параметрического резонанса обертонов внешнего электромагнитного поля с собственными колебаниями плазмы разряда. Данное предположение подтверждается также anomальным ростом третьей гармоники электрического поля вдоль оси разряда, горящего в смеси аргон – воздух.

Выводы

1. Исследованы особенности осевого распределения гармоник электромагнитного поля высокочастотного ёмкостного разряда, горящего в воздухе и аргоне.
2. Показано, что величина затухания электромагнитного поля разряда характеризуется наличием множественных резонансов.
3. Установлен anomальный рост третьей гармонической составляющей электромагнитного поля при уменьшении электронной температуры, а также концентрации электронов в плазме разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда // Журнал технической физики. – 1970. – Т. 40. – № 2. – С. 340–345.
2. Mollwo L. Elektronentemperatur und Elektronenrauschen in der hochfrequenten Fackelentladung // Annal. Phys. – 1958. – Bd. 2. – № 3–4. – S. 97–129.
3. Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Тихомиров И.А. О характере затухания электромагнитного поля в плазме высокочастотного факельного разряда // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – Вып. 9. – С. 23–27.
4. Луценко Ю.Ю. Особенности электромагнитного поля высокочастотного ёмкостного разряда шнурового вида, горящего при

атмосферном давлении // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – Вып. 11. – С. 124–126.

5. Janča J. Spectral diagnostics of a unipolar high-frequency discharge excited in nitrogen and argon at pressures from 1 to 12 atm // Czech. J. Phys. – 1967. – V. B17. – № 9. – P. 761–772.
6. Hess H., Kloss H.-G., Rademacher K., Seliger K. Vergleich zwischen einem Verfahren zur Bestimmung von Bogentemperaturen mit Hilfe von Stoßwellen und einer spektroskopischen Methode // Beiträge aus der Plasmaphysik. – 1962. – Bd. 2. – № 3. – S. 171–178.

Поступила 03.06.2010 г.