

УДК:539.141;537.868

ИОНИЗАЦИОННО-ПОЛЕВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.А. Двинин, В.А. Довженко*, О.А. Синкевич**

МГУ им. М.В. Ломоносова, 199991 Москва, Ленинские горы 1-2,
e-mail: s_dvinin@mail.ru

*Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер. 3.

**Национальный исследовательский университет, Московский Энергетический Институт, 111250, Москва,
Красноказарменная ул. 14. e-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

Аннотация

Рассматривается ионизационная неустойчивость разряда, при поддержке плоской волны в бесконечной и конечной цилиндрической разрядной трубке. Когда условие резонанса при низком давлении неустойчивость приводит к возбуждению поверхностных волн. Амплитуда поверхностной волны может превышать поле плоской волны, в результате чего существование разряда при более низких значениях поля и неоднородностью плазмы. Аналогичные эффекты могут происходить в больших размерах плазменного травления реакторов.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, ионизационная неустойчивость, плазма, разрядная трубка, давление газа, ксенон

Введение

Впервые развитие ионизационной неустойчивости, связанное с положительной обратной связью по полю, было описано в работе Кима и Гильденбурга [1], в которой показано, что для электромагнитной волны с частотой выше Ленгмюровской $\omega > \omega_{pe}$ существует три типа неустойчивостей:

- крупномасштабная ((а) рост плотности во всем пространстве),
- стратификация вдоль направления вектора электрического поля (б) и
- неустойчивость обратной волны (в).

Периодические неоднородности в неравновесных ВЧ- и СВЧ-разрядах наблюдаются в различных электродинамических системах [2–8]. Однако полного объяснения они до сих пор не получили. В первых работах предполагалось, что эти неустойчивости аналогичны стратам в разрядах постоянного тока [9, 10], ток проводимости много больше тока смещения, поэтому обратная связь через поле отрицательна, а возникновение неустойчивости связано с особенностями кинетики.

Целью данной работы является построение усовершенствованной теории разряда в волноводе, позволяющей учесть указанные выше два эффекта (сохранение полного тока в отсутствие неустойчивости и возбуждение поверхностных волн).

При исследовании СВЧ разряда в волноводе 72x34 мм на частоте 3.2 ГГц в плазменном столбе в трубках диаметром от 12 до 20 мм, помещенных в прямоугольный волновод в его центральном сечении параллельно узкой стенке (рис. 1) была обнаружена немонотонная зависимость минимальной мощности поддержания разряда от давления (рис. 2).

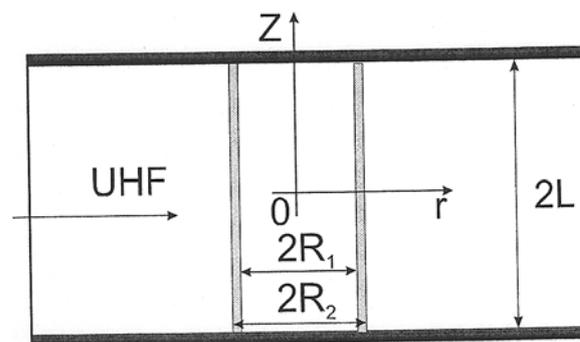


Рис. 1 – Геометрия разряда. Плазма находится в разрядной трубке, помещенной в прямоугольный волновод. СВЧ волна падает слева

Расчеты, выполненные в предположении однородности плазменного столба, показали, что при низком давлении нейтрального газа, разряд существует при гораздо меньших напряженностях поля в СВЧ волне, чем это следует из модели однородной плазмы (Рис. 2). Точки – эксперимент в трубке диаметром 12 мм точки, обозначенные квадратами – экс-

перимент в трубках диаметром 20 мм в ксене-
ноне.

Изучение структуры плазменного столба
показало, что в области низких давлений (0.5–
1 Торр и менее на рис. 1) нарушается однород-

ность плазменного столба (рис. 3), на зависи-
мости плотности плазмы от подводимой СВЧ
мощности наблюдается гистерезис (рис. 4).
Фотографии 3А, Б соответствуют верхней кри-
вой на рис. 4, а остальные – нижней.

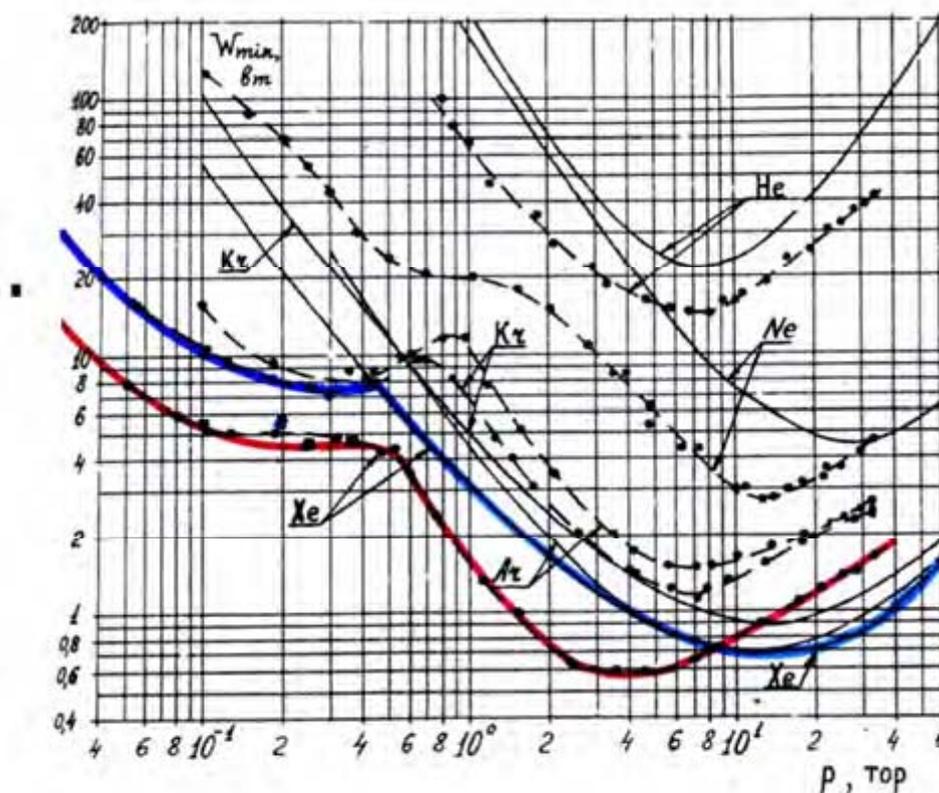
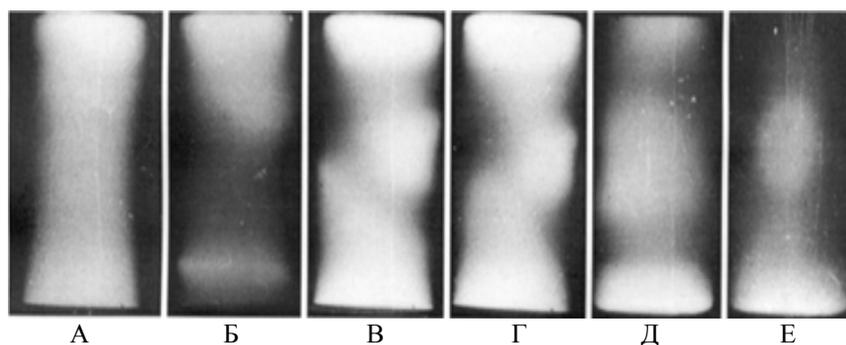


Рис. 2 – Зависимость минимальной мощности поддержания разряда W_{\min} от давления газа в гелии, неоне, аргоне, криптоне и ксеноне. сплошные кривые – расчет в модели однородного столба (12 мм), жирные кривые – расчет в модели ионизационной неустойчивости



А) – 140 Вт, Б) – 9 Вт, В) – 17 Вт, Г) – 9 Вт, Д) – 6,5 Вт, Е) – 5.5 Вт

Рис. 3 – Структуры разряда в волноводе связанные с ионизационно-полевой неустойчивостью. Давление ксенона 0,1 Торр

С физической точки зрения данный эффект связан с тем, что периодические возмущения плотности электронов в плазме приводят к трансформации волны H_{10} в поверхностную волну. Если длина возмущения близка к

длине поверхностной волны при данной плотности электронов, то амплитуда поверхностной волны может быть существенно больше, амплитуды волны H_{10} . При выполнении определенных фазовых соотношений поля поверх-

ностной волны и волны H_{10} будут синфазны в области пространства, где возмущения плотности электронов положительны и противофазны в обратном случае. В этом случае обратная связь по электромагнитному полю оказывается положительной и возмущения плот-

ности электронов возрастают во времени. На рис. 4 приведены дисперсионные кривые поверхностных мод для $m = 0$ и $m = 1$, f на рис. 5 – измеренные зависимости плотности электронов в плазме как функции подводимой мощности.

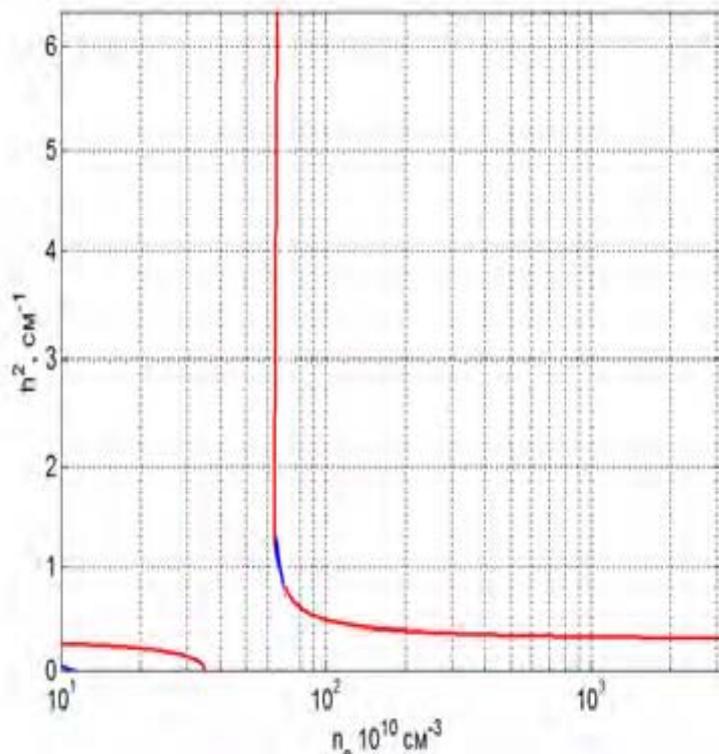


Рис. 4 – Дисперсионные кривые поверхностных волн для $m = 0$ (сверху) и $m = 1$. Частота 3 ГГц, радиус плазмы – 1 см, радиус стеклянной трубки – 1.2 см

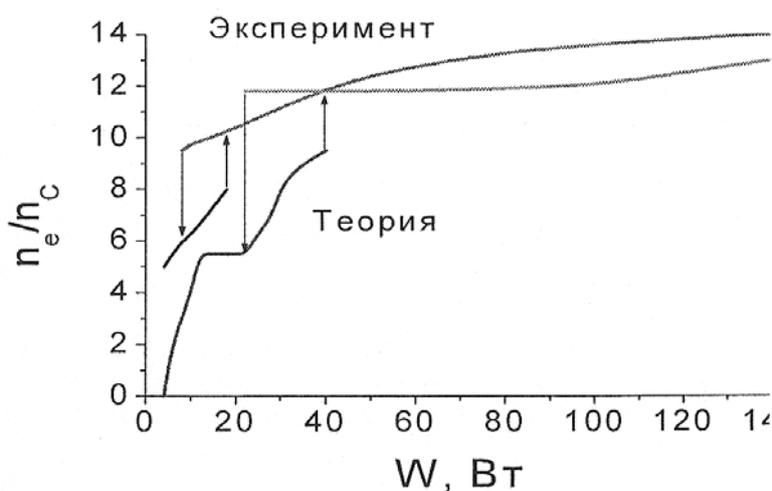


Рис. 5 – Зависимость плотности электронов n_e/n_c в плазме разряда от подводимой мощности при различных давлениях нейтрального газа (1 – эксперимент, 2 – теория).

Ксенон, а – $P = 3$ Торр, б – $P = 0,1$ Торр.

I и II – кривые, соответствующие различным формам существования разряда

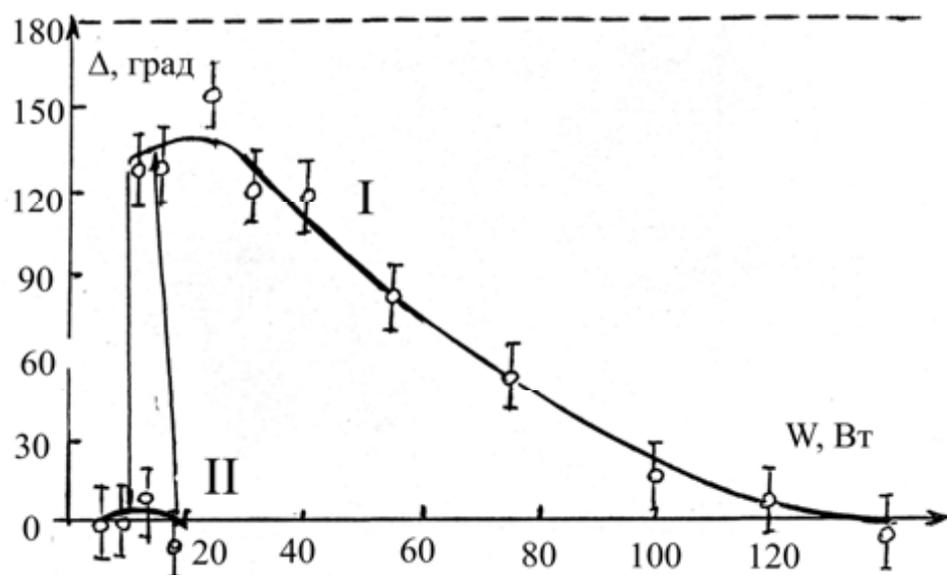


Рис. 6 – Зависимость фазового сдвига Δ между сигналами с СВЧ зондов 2 и 3 от падающей мощности (ксенон, $P = 0.1$ Торр, I соответствует кривой I на рис 2б, II – кривой II)

Из сравнения следует, что формирование структур происходит в области, в которой возможно распространение поверхностных волн. Прямые измерения фазы волны у торцов разрядной трубки показали, что в состоянии I существует сдвиг фаз между напряженностями поля, что свидетельствует, что амплитуда антисимметричной составляющей поля больше, чем амплитуда симметричной. Эти измерения подтверждают возбуждение поверхностной волны, так как согласно расчетам поверхностная волна имеет длину 6.8 см именно при измеренных плотностях плазмы.

Неустойчивость в трубке конечной длины

Для объяснения полученных результатов была построена математическая модель явления, основанная на совместном решении уравнений баланса электронов, их энергии и уравнений Максвелла. В модели предполагалось, что гармонические возмущения плотности электронов

$$\delta n = \delta n_1(t) \cos(kz)$$

приводят к появлению тока с тем же периодом, который возбуждает поверхностную волну. При определенных условиях поле возбуждаемой волны будет синфазно с полем волны H_{10} , поддерживающей плазму в областях пространстве, где возмущения плотности электронов больше нуля, т.е. обратная связь будет положительной. В этом случае возмущения плотности будут нарастать, так же как и энергия исходной волны, передаваемая поверхностной волне. При этом разряд будет существовать при подводимых к разряду мощностях меньших, чем в отсутствие неустойчивости. Часть энергии, необходимой для выполнения интегрального баланса частиц, подводится не непосредственно от падающей волны, а через трансформацию в поверхностную волну, объясняя поведение кривых на рис. 2.

Решение уравнений баланса электронной плотности, энергии и уравнений Максвелла приводит к соотношениям для средней плотности электронов и амплитуды возмущений.

$$\frac{\delta n_0}{\delta t} = \left(\nu_i \left(T_{e0} \left((E_0 E_0^*) + \frac{1}{2} (E_s E_s^*) \right) \right) - \frac{D_0}{A^2} \right) n_0, \quad (1)$$

$$E_s \cos(kz) = \frac{\delta n_0(t) E_0}{n_0 (1 + i\nu/\omega)} \left\{ \frac{K_0}{a_p - a_{res}(a_p/h)} \right\} \cos(kz) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}n_1 = \Gamma(n_0, n_1, h)n_1 =$$

$$= \left\{ -h^2 D_\alpha + \frac{\delta n_1(T_e n_e)}{\delta n_e} + \frac{\delta n_1 \frac{1}{2} \frac{e^2 v(E_0, E_p)}{\delta T_e \frac{1}{2} m(\omega^2 + v^2)} \left(\frac{3}{2} h^2 k + \frac{\delta W_k}{\delta T_e} \right)^{-1} \frac{n_e}{n_0} \times \times \operatorname{Re} \left[\left(1 + \frac{iv}{\omega} \right)^{-1} \left(\frac{K_1}{\epsilon_{rez} - \epsilon_p} + \frac{K_2}{\epsilon_p} \right) \right] \right\} n_1 \quad (3)$$

Здесь n_e , T_e – концентрация и температура электронов;

$D_\alpha = \mu_i k T_e / e$ – коэффициент амбиполярной диффузии;

μ_e , μ_i – электронная и ионная подвижности; \square

k – коэффициент электронной теплопроводности;

ν_i – частота ионизации;

$\Lambda = R/2,405$ – поперечный диффузионный размер;

ν – эффективная частота электрон-атомных столкновений;

w_1 – средняя энергия, теряемая электроном в 1 с;

e , m – заряд и масса электрона;

T_k – температура частиц сорта k ;

ω – частота поля;

$k_0 = \omega/c$;

c – скорость света;

E , H – напряженности электрического и магнитного полей;

ϵ_p – диэлектрическая проницаемость плазмы;

ϵ_{rez} – диэлектрическая проницаемость, при которой поверхностная волна находится в резонансе.

Знак $\langle \rangle$ означает усреднение по сечению трубки. Уравнение (1) описывает интегральный баланс частиц в плазме, показывая, что среднее значение температуры, определяется как полем основной волны E_0 , так и полем поверхностной волны E_s . Электрическое поле, генерируемое возмущением, связано с модуляцией плотности электронов соотношением (2), где выражения для нормировочных коэффициентов K_1 и K_2 не приводятся ввиду их громоздкости.

В (2) и (3) входят два слагаемых – описывающих положительную (при определенных плотностях электронов) обратную связь по полю через возбуждаемую поверхностную волну, и отрицательную обратную связь, связанную с выполнением условия непрерывности полного тока. При больших частотах столкновений резонансное усиление поля поверхностной волны отсутствует, наблюдаемые в ВЧ разряде структуры будут связаны с особенностями кинетики частиц (например, зави-

симостью частоты ионизации от плотности электронов), как в стратах в разряде постоянного тока.

Уравнение (3) описывает эволюцию возмущений плотности электронов. В стационарном состоянии поле основной волны в разряде равно пороговому полю развития неустойчивости, а необходимая для выполнения интегрального баланса частиц энергия доставляется в плазму за счет возбуждения поверхностной волны.

Сравнение параметров плазмы, рассчитанных с помощью данной модели с экспериментом (рис. 5) показывает их удовлетворительное согласие.

При записи формул (1) – (3) предполагалось, что спектр поверхностной волны дискретен, что обусловлено конечными размерами области взаимодействия по оси OZ .

Однако аналогичные результаты могут быть получены и для бесконечной разрядной трубки.

В этом случае поверхностная волна распространяется вдоль разрядной трубки и в определенных условиях могут формироваться возмущения в виде бегущей волны. Спектр поверхностных волн уже не будет дискретным, однако, как и раньше в конце концов будет возбуждаться волна с максимальным инкрементом (или минимальным пороговым полем, эти условия совпадают).

Система уравнений (1) – (3) в этом случае дополняется условием

$$\frac{\partial \Gamma(n_0, n_1, h)}{\partial h} = 0 \quad (4)$$

Аналогичные явления могут наблюдаться в плазменных технологических емкостных реакторах низкого давления с электродами большой площади, поддерживаемых ВЧ полем на частотах 50 МГц и выше. В этом случае неустойчивость может приводить к возбуждению антисимметричной поверхностной волны, распространяющейся вдоль слоя пространственного заряда [11], нарушая условия однородности плазмы. Длина этой волны обычно в

несколько раз меньше, чем у симметричной волны, которая обычно используется для возбуждения разряда, поэтому в определенных условиях возможно ее резонансное возбуждение.

Выводы

Рассмотрена задача об ионизационно-полевой неустойчивости плазмы, поддерживаемой плоской волной в бесконечной и конечной цилиндрических разрядных трубках. Показано, что при низких давлениях поле поверхностной волны, возбуждаемое вследствие неустойчивости, при выполнении условий резонанса будет превышать поле основной волны, обуславливая возможность существования разряда при более низких напряженностях поля. При высоких давлениях газа, когда резонансной неустойчивостью можно пренебречь, полученное решение, не влияя существенно на величину инкремента неустойчивости, позволяет объяснить, почему характерный размер страт обычно близок к размеру разрядной трубки. Учет рассмотренных в работе эффектов необходим при анализе характеристик плазменных технологических реакторов большого размера.

Литература

1. В.Б. Гильденбург, А.В. Ким. // Журнал экспериментальной и теоретической физики 1978. Т. 74. С. 141.
2. Wood. R.W. // Phys. Rev. 35 (1930) 673.
3. Penfold A.C., Thornton J.A., Warder R.C. // Czechosl. J. Phys. 1973. V. B23 P. 431.
4. Джерпетов Х.А., Зайцев А.А. // Доклады АН СССР. 1953. Т. 89. С. 825.
5. Зайцев А.А., Джерпетов Х.А. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1953. Т. 24. С. 516.
6. Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. С. 1228.
7. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Иванов О.А., Степанов А.Н. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. С. 165.
8. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. // В сб.: Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР. 1988. С. 41.
9. Ланда П.С. Автоколебания в распределенных системах. М.: URSS / Книжный дом «Либроком», 2010
10. Б.С. Кернер, В.В. Осипов В.В. Автосолитоны. М.: Наука. 1991.
11. Вологиров А.Г., Двинин С.А., Михеев В.В., Свиридкина В.С. // Физика плазмы. 2008. Т. 34, С. 746

IONIZATION INSTABILITY IN RADIO FREQUENCY LOW-PRESSURE DISCHARGE

S.A. Dvinin, V.A. Dovzhenko, O.A. Sinkevich

M.V. Lomonosov MSU, Department of Physics, 199991, Moscow, Lenin Hills 1-2,
e-mail: s_dvinin@mail.ru

*A.M. Obuhova Institute of Atmospheric Physics RAS, 119017, Moscow, Pyzhevsky per., 3

**National Research University Moscow Power Engineering Institute,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14. e-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

Abstract

Ionization instability of the discharge, supported by a plane wave in the infinite and finite cylindrical discharge tubes is considered. At low pressure the instability leads to excitation of the surface wave, when the resonance condition is satisfied. The amplitude of surface wave can exceed the field of the plane wave, causing the discharge existence at lower field strengths, and plasma inhomogeneity. The similar effects can take place in large size plasma etching reactors.

Keywords: high frequency discharge, ionization instability, plasma, time-row tube gas pressure, xenon

**ТӨМЕНГІ ҚЫСЫМ РАЗРЯДЫНДАҒЫ ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ ТҰРАҚСЫЗ
ИОНИЗАЦИЯЛЫҚ-ӨРІСТІК ТҰРАҚСЫЗДЫҚ**

С.А. Двинин, В.А. Довженко*, О.А. Синкевич **

М.В. Ломоносов атындағы ММУ, физика факультеті, 199991, Мәскеу, Ленин таулары 1-2,
e-mail: s_dvinin@mail.ru

*А.М. Обухова Атмосфералық физика институты РФА, 119017, Мәскеу, Пыжевский пер., 3

**Ұлттық зерттеу университеті Мәскеу энергетикалық институты, 111250, Мәскеу, Красноказарменная к., 14
e-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

Аннотация

Шекті және шексіз цилиндрлік разрядты трубканың тегіс толқын қолдауы кезіндегі ионизациялық тұрақсыз разряд қарастырылуда. Резонанс шарты төмен тұрақсыз қысым кезінде беттік толқынның қозуына алып келеді. Плазманың біркелкі еместігі және өрістің төмен мәндері кезінде разряд болуы нәтижесінде тегіс толқын беттік толқын амплитудасынан артық болуы мүмкін. Осындай эффектілер реакторды плазмаменөңдеу кезінде үлкен размерлерде де болуы мүмкін.

Түйінді сөздер: жоғары жиілікті разряд, иондалуы тұрақсыздық, плазмалық, уақыт-жол түтік газ қысым, ксенон