

УДК 533.9

## ЭЦР-нагрев плазмы в источнике CERA-RX в присутствии пульсирующего по случайному закону электрического поля

А. А. Балмашнов, С. П. Степина, А. М. Умнов

*Представлены результаты численного моделирования ЭЦР-нагрева частиц плазмы в источнике CERA-RX в присутствии пульсирующего по случайному закону электрического поля с учетом влияния коллективных эффектов. Установлено, что в этих условиях энергетический спектр электронов обедняется в области низких энергий за счет увеличения числа частиц в высокоэнергетической области и зависит от полярности пульсирующего поля.*

PACS: 52.50.Sw, 52.27.Ny, 52.40.Db

*Ключевые слова:* плазма, электронный циклотронный резонанс, релятивизм, неоднородное магнитное поле, пульсирующее электрическое поле, численное моделирование.

### Введение

Эффективность нагрева электронной компоненты плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) представляет как научный, так и практический интерес, в частности, применительно к созданию ЭЦР-генераторов рентгеновского излучения [1—3].

В отличие от традиционно применяемых с этой целью систем, состоящих из полых резонаторов, помещенных в магнитное поле пробочной конфигурации, авторами было предложено использовать коаксиальные резонаторы [4], позволяющие значительно уменьшить их габариты. Позже, в связи с тем, что при ЭЦР-нагреве в стационарных магнитных полях за счет влияния релятивистского фактора значительная часть электронов располагается в низкоэнергетической области их функции распределения, в целях исследования возможности повышения энергетической эффективности ЭЦР-нагрева авторами были начаты исследования [5] влияния пульсирующего по случайному закону электрического поля на характер распределения электронов по энергиям. Представленные в работе [5] результаты вычислительного эксперимента показали, что вне зависимости от полярности пульсирующего поля его наличие приводит к уменьшению числа ЭЦР-частиц в низкоэнергетической области функции распределения и к их увеличению в высокоэнергетической. Однако эти исследования носили демонстрационный характер, так

как в расчетах отсутствовали самосогласованные поля, которые могут существенно влиять на изучаемое взаимодействие.

С целью установить степень влияния коллективных эффектов, возникающих в плазме, на нагрев электронов в ЭЦР-источнике рентгеновского излучения CERA-RX [4] были проведены расчеты, результаты которых представлены в данной работе.

### Постановка задачи и метод ее решения

Изучение влияния пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев частиц с учетом собственного электрического поля плазмы осуществлялось численным 3D-моделированием этого процесса для стационарного магнитного и СВЧ-электрического полей, реализуемых в источнике рентгеновского излучения CERA-RX [4].

Источник CERA-RX состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора переменного сечения, возбуждаемого на основной моде (TEM,  $\omega = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ ). Центральная часть резонатора имеет диаметр 9,0 см и протяженность 3,2 см. Диаметр осевого электрода — 4,5 см. Сильно неоднородное стационарное магнитное поле формируется кольцеобразными постоянными магнитами. Реализуются две аксиально симметричные ЭЦР-поверхности, расположенные на расстояниях 1,75 и 3,20 см от оси симметрии в медианной плоскости резонатора. Градиент магнитного поля в их окрестности достигает 140 Гс/см. Подробное описание CERA-RX представлено в работе [4].

Изучаемый процесс взаимодействия осуществлялся для дальней ЭЦР-поверхности. При расчете магнитного поля использовались измеренные величины индукции магнитного поля (точнее, его компоненты  $B_r$  и  $B_z$ ), которые сохранялись на стационарной пространственной сетке с шагом 0,1 см. Количество узлов пространственной сетки  $91 \times 29$ .

Балмашнов Александр Александрович, профессор.  
Степина Светлана Петровна, доцент.  
Умнов Анатолий Михайлович, доцент.  
Российский университет дружбы народов.  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.  
Тел. (495) 955-09-23. E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2011 г.

© Балмашнов А. А., Степина С. П., Умнов А. М., 2011

В точках расположения электронов компоненты магнитного поля  $B_x, B_y, B_z$  рассчитывались методом билинейной интерполяции [6].

Численная модель плазмы построена по методу частиц в ячейке с учетом электрических взаимодействий. В начальный момент времени задавалось однородное пространственное распределение низкоэнергетичных электронов (с энергией до 1 эВ) и однозарядных ионов водорода в области изменения стационарного магнитного поля в границах 3 % относительно резонансного значения ЭЦР (для электронов с массой покоя). Начальные направления импульсов электронов задавались случайным образом. Граничные условия для частиц определялись размерами центральной части резонатора, а именно, производилась компенсация частиц, уходящих на электроды резонатора, соответствующими низкоэнергетичными электронами и ионами с энергией, равной нулю. Общее число моделируемых частиц — 120 000. Плотность частиц плазмы  $n = 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Уравнение Пуассона решалось методом быстрого преобразования Фурье на сетке  $91 \times 91 \times 29$ .

Уравнение движения электронов с учетом релятивизма, безразмерная форма которого имеет вид:

$$\frac{\bar{u}^{n+1/2} - \bar{u}^{n-1/2}}{\Delta\tau} = \bar{g}^n + \frac{\bar{u}^{n+1/2} + \bar{u}^{n-1/2}}{2\gamma^n} \cdot \bar{b}^n, \quad (1)$$

решалось по схеме Бориса [6]. В уравнении (1)  $\bar{u}$  — импульс электрона в единицах  $m_0c$ ,  $m_0$  — масса покоя электрона,  $c$  — скорость света в вакууме,  $\bar{g}^n$  — безразмерное суммарное электрическое поле  $\bar{g}^n = \frac{(\bar{E}_{hf}^n + \bar{E}_{pulse}^n + \bar{E}_s^n)}{B_0}$ ,  $\bar{E}_{hf}^n$  — напряженность электрического СВЧ-поля,  $\bar{E}_{pulse}^n$  — напряженность пульсирующего электрического поля,  $\bar{E}_s^n$  — напряженность самосогласованного электрического поля плазмы,  $\bar{b}^n$  — индукция магнитного поля, нормированная на  $B_0 = \frac{m_0c\omega}{e}$ ,  $e$  — заряд электрона,  $\Delta\tau = \omega \cdot \Delta t$  — временной шаг,  $n$  — номер временного шага интегрирования уравнения (1),  $\gamma^n = (1 + u^2)^{1/2}$  — релятивистский фактор. Временной шаг решения уравнения движения для электронов составлял не более 1/250 периода СВЧ-поля. Координаты частицы, нормированные на релятивистский радиус циклотронного вращения электрона  $r_L = c/\omega$ , на каждом временном шаге пересчитываются в соответствии с равенством:

$$\bar{x}^{n+1} = \bar{x}^n + \bar{u}^{n+1/2} \Delta\tau / \gamma^{n+1/2}. \quad (2)$$

Аналогичным образом рассчитываются координаты электронов  $y$  и  $z$ . Уравнение движения для ионов решалось методом "с перешагиванием".

Расчеты проводились для значений напряженности электрического СВЧ-поля 300 В/см и напряженности пульсирующего поля, изменяющегося во времени по закону  $E_{pulse}(t) = E_0 \sin[\beta(1 \pm \delta)\omega \cdot t + \delta\phi(t)]$  с использованием лишь одного полупериода, где  $\beta = T_{hf} / T_{pulse}$  — отношение периода СВЧ-поля к периоду пульсирующего поля. Расчеты проводились при  $\beta = 0,01$ . Величины  $\delta$  ( $-0,02 \leq \delta \leq 0,02$ ) и  $\delta\phi$  ( $-0,01\pi \leq \delta\phi \leq 0,01\pi$ ) задавались (для обеспечения стохастичности процесса) с помощью датчиков случайных чисел, причем  $E_0 = 300 \text{ В/см}$ .

Изучалось влияние пульсирующего поля на нагрев электронов в случаях направления  $E_0$  в сторону увеличения  $B_z$  компоненты магнитного поля в радиальном направлении (отрицательная полярность) и в противоположном направлении (положительная полярность). Индуцированное на фронтах пульсирующего электрического поля магнитное поле в расчетах не учитывалось, так как для приведенных выше параметров является несущественным и не влияет на характер ЭЦР-взаимодействия.

### Полученные результаты и выводы

На рис. 1 представлено характерное для исследуемого процесса пространственное распределение частиц плазмы в сечении  $ZY$ .

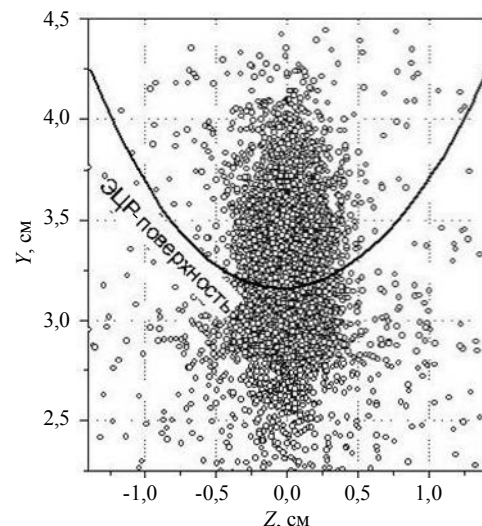
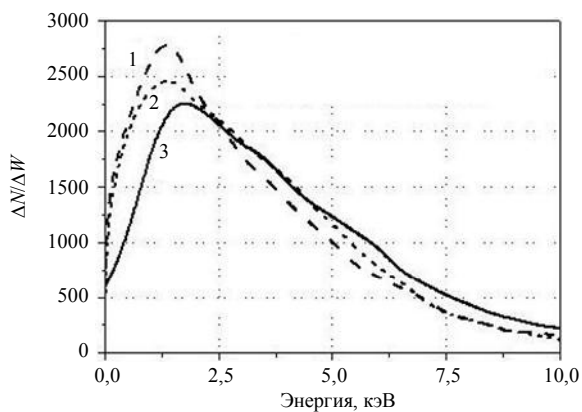


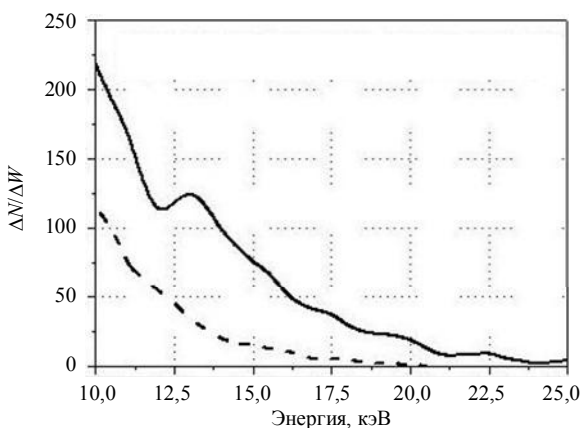
Рис. 1. Пространственное распределение частиц плазмы (ZY-сечение)

На рис. 2 и 3 приведены низкоэнергетичные и высокоэнергетичные части спектров электронов, соответственно, полученные для различных условий изучаемого взаимодействия.



**Рис. 2. Низкоэнергетические части спектров электронов (в усл. ед.):**

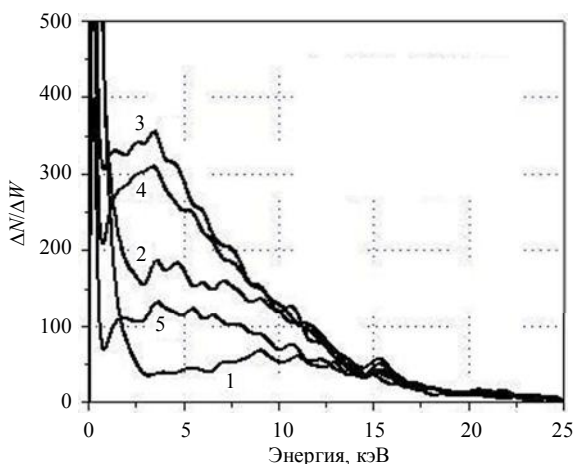
1 — отсутствие пульсирующего поля; 2 — положительная полярность; 3 — отрицательная полярность



**Рис. 3. Высокоэнергетические части спектров электронов (в усл. ед.):**

----- — положительная полярность;  
 ————— — отрицательная полярность

На рис. 4 изображены энергетические спектры электронов в различных радиальных областях, полученные при отрицательной полярности пульсирующего электрического поля.



**Рис. 4. Энергетические спектры электронов (в усл. ед.) в различных радиальных областях вблизи медианной плоскости системы ( $-0,2 \text{ см} < Z < 0,2 \text{ см}$ ):**

1 — (2,25—2,75) см; 2 — (2,50—3,00) см;  
 3 — (2,75—3,25) см; 4 — (3,00—3,50) см; 5 — (3,25—3,75) см

Результаты расчетов показывают влияние стохастических пульсаций электрического поля на энергетический спектр ЭЦР-электронов плазмы, а именно, его обеднение частицами в низкоэнергетической области и увеличение их числа в области более высоких энергий. Такое же влияние на ЭЦР-нагрев пульсирующее поле оказывает в случае, когда собственное электрическое поле плазмы не учитывается [5]. Различие состоит в том, что учет влияния коллективных эффектов приводит к более сглаженным энергетическим спектрам. При этом, как следует из рис. 4, наиболее эффективный нагрев электронов наблюдается в областях 3 и 4, в которых магнитное поле нарастает с приближением к центральному электроду резонатора от  $B_0$  до  $1,03 B_0$ . В областях как с меньшими (кривые 4 и 5), так и с большими (кривая 1) величинами индукции магнитного поля эффективность нагрева электронов значительно снижается.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность существенного влияния пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев электронов плазмы в сильно неоднородном в радиальном направлении магнитном поле. Показано, что пульсации электрического поля по случайному закону приводят к трансформации функции распределения электронов по энергиям, а именно, происходит ее обеднение частицами в низкоэнергетической области и их группировки в области более высоких энергий.

Результаты работы представляют интерес не только с точки зрения повышения энергетической эффективности ЭЦР-нагрева плазмы, но и, возможно, для объяснения эффектов генерации быстрых электронов, возникающих за счет пульсаций электрических и магнитных полей в микроволновых плазменных источниках в ЭЦР-областях с высокими градиентами стационарного магнитного поля.

В ближайшее время изучаемый процесс будет реализован в эксперименте и будет проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с представленными в данной работе численными расчетами.

Работа выполнена в рамках ГК № П 23-13  
 Федеральной целевой программы  
 "Научные и научно-педагогические кадры  
 инновационной России".

### Литература

1. Bacal M., Gaudin C., Bourdier A. et al. // Nature. 1996. V. 384. P. 421.

2. Gaudin C., Lamoureux M., Rouille C. // Phys. Med. Biol. 2001. V. 46. P. 835.
3. Карфилов Д. М., Сергейчев К. Ф. // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 102.
4. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Умнов А. М. // Там же. 2006. № 6. С. 80.
5. Балмашинов А. А., Умнов А. М. // Там же. 2010. № 6. С. 40.
6. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

## Modeling of the ECR plasma heating under a randomly pulsing electric field

A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, A. M. Umnov  
Russian University of People's Friendship,  
6 Mikluho-Maklay str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

*The results of modeling of the ECR plasma heating in the CERA-RX facility under a randomly pulsing electric field are presented. It is found that the electron energy spectrum is shifted to the high energy region due to the interaction of the electrons with the pulsing electric field. The obtained effect depends on polarity of the pulse electric field.*

PACS: 52.50.Sw, 52.27.Ny, 52.40.Db

*Keywords:* plasma, electron cyclotron resonance, relativistic effect, inhomogeneous magnetic field, pulse electric field, numerical modeling.

Bibliography — 6 references.

*Received June 20, 2011*