

P9-2007-75

А. В. Филиппов, Г. Д. Ширков, Ф. Консоли¹, С. Гаммино¹,
Г. Чиавола¹, Л. Челона¹, С. Барбарино²

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ
СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА
ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАРЯДОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИОНОВ
В ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ ЭЦР-ТИПА

Направлено в оргкомитет Восьмого Всероссийского семинара
«Проблемы теоретической и прикладной электронной
и ионной оптики», Москва, 29–31 мая 2007 г.

¹Национальный институт ядерной физики, Южная национальная лаборатория, Катания, Италия

²Университет Катании, факультет физики и астрономии, Катания, Италия

Филиппов А. В. и др.

P9-2007-75

Развитие модели системы уравнений баланса для расчета зарядовых распределений ионов в ионном источнике ЭЦР-типа

Проанализирована широко распространенная модель уравнений баланса для расчета зарядовых распределений ионов (ЗРИ) в ионном источнике на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР), и предложена ее модификация, позволяющая более точно описывать процессы удержания и накопления тяжелых ионов в ЭЦР-плазме ионного источника в случае смеси газов. Предложен новый подход расчета времен удержания частиц (ионов и электронов) на основе теории Пастухова, а именно расчет времен удержания в процессе двухэтапной минимизации функционалов специального вида. Дается сравнение с экспериментальными результатами.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Philippov A. V. et al.

P9-2007-75

Development of the Balance Equations Model for Calculation of Ion Charge-State Distribution in ECR Ion Sources

The investigation of the widespread model for the calculation of ion charge-state distributions (CSD) in electron cyclotron-resonance ion source based on the set of balance equations is given. The modification of this model that allows one to describe the confinement and accumulation processes of highly charged ions in ECR plasma for gas mixing case more precisely is discussed. The new approach for the time confinement calculation (ions and electrons) based on the theory of Pastukhov is offered, viz. — calculation of confinement times during two step minimization of special type functionals. The results obtained by this approach have been compared with available experimental data.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

1. МОДЕЛИ РАСЧЕТА ЗАРЯДОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИОНОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА

Наибольшее распространение среди моделей по расчету зарядовых распределений ионов (ЗРИ) в источнике ионов на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) [1] получили модели на основе системы уравнений баланса для ионных концентраций [2–8] и [12–16].

Эти модели имеют феноменологический характер, каждая из них включает свой набор параметров, что является удобным в процессе сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Отметим, что представляющий собой отдельную проблему расчет времен удержания электронов и ионов, в целом выражающий полуэмпирический подход [9–11], также приводит к введению дополнительных параметров (потенциал плазмы для электронов и величина удерживающего потенциала для ионов), а учет уравнения для нейтральной компоненты плазмы в общей системе уравнений баланса [7] и [8] — к появлению еще двух параметров: объема, ограниченного ЭЦР-поверхностью, и ее площади. Поэтому, как правило, характерным набором параметров для большинства моделей на основе уравнений баланса является следующий: температура ионов, электронов и нейтральных атомов; потенциал плазмы для электронов и величина удерживающего потенциала для ионов; параметры ЭЦР-поверхности — ее объем и площадь.

Новые экспериментальные исследования в области физики ионных источников ЭЦР-типа ставят новые задачи, например, как описывать процесс удержания заряженных частиц в магнитном поле с минимумом-В [10] ионного источника ЭЦР-типа; как корректно описать процесс ЭЦР-нагрева электронов внешним сверхвысокочастотным (СВЧ) электромагнитным полем; как корректно описать немаксвелловскую анизотропию функции распределений электронов по энергии, наблюдаемую в экспериментах по диагностике рентгеновского излучения из ЭЦР-плазмы ионного источника, и т. д.

Вышеописанные проблемы и задачи требуют дальнейшего развития моделей на основе уравнений баланса. В данной работе составляющая основу модели система уравнений баланса не упрощалась путем исключения из рассмотрения некоторых уравнений, как, например, в исследованиях [2–4] не учитывались уравнения для нейтральных атомов и однозарядных ионов, а в

исследовании [5] не учитывались уравнения для ионов высших зарядностей. И для описания того или иного явления или процесса система была дополнена новыми уравнениями, т. е. развитие модели проводилось по пути ее наибольшего приближения к реальным физическим процессам, происходящим в ЭЦР-плазме ионного источника.

2. СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА ДЛЯ РАСЧЕТА ЗРИ

Фактически модель расчета ЗРИ, основанная на системе уравнений баланса для ионных концентраций, является развитием метода решения уравнения Больцмана, перенесенного на рассмотрение процессов накопления многозарядных ионов в ионном источнике ЭЦР-типа. Представленное развитие основано на следующей системе уравнений баланса:

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{s,0}}{dt} &= \frac{\bar{v}_{s,0} S_p}{V_p} (n_s - n_{s,0}) - \\
&\quad - \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,0 \rightarrow m,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S \sum_{z=m+1}^{Z_{s'}} m \nu_{s',z \rightarrow z-m}^{\text{cx}} n_{s',z} \right) n_{s,0}, \\
\frac{dn_{s,1}}{dt} &= \sum_{k=1}^K 1 \nu_{s,0 \rightarrow 1,k}^{\text{ion}} n_{e,k} n_{s,0} + \\
&\quad + \sum_{s'=1}^S \left(\sum_{m=1}^M m \nu_{s,m+1 \rightarrow 1}^{\text{cx}} n_{s,m+1} n_{s',0} + \sum_{z=2}^{Z_{s'}} 1 \nu_{s',z \rightarrow z-1}^{\text{cx}} n_{s',z} n_{s,0} \right) - \\
&\quad - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{k,1 \rightarrow m+1,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \frac{1}{\tau_{s,1}} \right) n_{s,1}, \\
\frac{dn_{s,2}}{dt} &= \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{s,2-m \rightarrow 2,k}^{\text{ion}} n_{e,k} n_{s,2-m} + \\
&\quad + \sum_{s'=1}^S \left(\sum_{m=1}^M m \nu_{s,m+2 \rightarrow 2}^{\text{cx}} n_{s,m+2} n_{s',0} + \sum_{z=3}^{Z_{s'}} 2 \nu_{s',z \rightarrow z-2}^{\text{cx}} n_{s',z} n_{s,0} \right) - \\
&\quad - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{k,2 \rightarrow m+2,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S 1 \nu_{s',2 \rightarrow 1}^{\text{cx}} n_{s',0} + \frac{1}{\tau_{s,2}} \right) n_{s,2}, \quad (1) \\
&\quad \dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{s,z}}{dt} &= \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,z-m \rightarrow z,k}^{\text{ion}} n_{s,z-m} n_{e,k} + \right. \\
&\quad \left. + \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,z+m \rightarrow z}^{\text{cx}} n_{s,z+m} n_{s',0} \right) - \\
&\quad - \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,z \rightarrow z+m,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,z \rightarrow z-m}^{\text{cx}} n_{s',0} \right) n_{s,z} - \frac{n_{s,z}}{\tau_{s,z}}, \\
&\quad \dots \\
\frac{dn_{s,Z_s-1}}{dt} &= \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{s,Z_s-m-1 \rightarrow Z_s-1,k}^{\text{ion}} n_{s,Z_s-m-1} n_{e,k} + \\
&\quad + \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,Z_s \rightarrow Z_s-1}^{\text{cx}} n_{s,Z_s} n_{s',0} - \\
&\quad - \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,Z_s-1 \rightarrow Z_s,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \right. \\
&\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,Z_s-1 \rightarrow Z_s-m-1}^{\text{cx}} n_{s',0} + \frac{1}{\tau_{s,Z_s-1}} \right) n_{s,Z_s-1}, \\
\frac{dn_{s,Z_s}}{dt} &= \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,Z_s-m \rightarrow Z_s,k}^{\text{ion}} n_{s,Z_s-m} n_{e,k} - \right. \\
&\quad \left. - \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,Z_s \rightarrow Z_s-m}^{\text{cx}} n_{s,Z_s} n_{s',0} \right) - \frac{n_{s,Z_s}}{\tau_{s,Z_s}}.
\end{aligned}$$

Здесь и далее выдержана следующая система обозначений: s, s' — индекс сорта ионов; S — число ионов различных сортов; z, z' — индекс зарядового состояния; m — индекс кратности процесса, M — максимальный индекс кратности процесса; k, k' — индекс сорта электронной компоненты, K — число электронных компонент; $\bar{v}_{s,0}$ — средняя скорость нейтралов; S_p, V_p — площадь и объем ЭЦР-поверхности; $m \nu_{s,z \rightarrow z',k}^{\text{ion}}, m \nu_{s,z \rightarrow z'}^{\text{cx}}$ — скорости процессов ионизации и перезарядки зарядового состояния z в z' ; $n_{e,k}, n_{s,z}$ — концентрации электронов и ионов; $n_{s,0}$ и n_s — концентрации нейтралов внутри и снаружи камеры источника; $\tau_{s,z}$ — времена удержания ионов.

В работах [7, 8] был развит подход, трактующий немаксвелловскую анизотропию функции распределения электронов как набор популяций (с различными энергиями) максвелловских электронов, удерживаемых в ЭЦР-плазме. При этом переход электронов из компоненты с одной энергией в компоненту с другой, большей энергией вследствие ЭЦР-нагрева внешним СВЧ-полем,

описывался дополнительным параметром модели, а именно временем нагрева. На основе такого подхода система (1) была дополнена уравнениями вида

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{e,1}}{dt} &= \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^{Z_s-m} m \nu_{s,z-m \rightarrow z,k}^{\text{ion}} n_{s,z-m} m n_{e,k} - \frac{n_{e,1}}{\tau_{e,1 \rightarrow 2}^h} - \frac{n_{e,1}}{\tau_{e,1}}, \\
&\dots \\
\frac{dn_{e,k}}{dt} &= \frac{n_{e,k-1}}{\tau_{e,k-1 \rightarrow k}^h} - \frac{n_{e,k}}{\tau_{e,k \rightarrow k+1}^h} - \frac{n_{e,k}}{\tau_{e,k}}, \\
&\dots \\
\frac{dn_{e,K}}{dt} &= \frac{n_{e,K-1}}{\tau_{e,K-1 \rightarrow K}^h} - \frac{n_{e,K}}{\tau_{e,K}}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $\tau_{e,k}$ — времена удержания электронной компоненты; $\tau_{e,k \rightarrow k'}^h$ — времена перехода электронной компоненты k в компоненту k' в процессе ЭЦР-нагрева.

Учет немонахроматичности компонент ЭЦР-плазмы по энергиям может быть достигнут добавлением в рассматриваемую систему следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{s,z}}{dt} &= \sum_{s'=1}^S \sum_{z'=1}^{Z_{s'}} \nu^{s,z \setminus s',z'} (T_{s',z'} - T_{s,z}) + \sum_{k=1}^K \nu^{s,z \setminus e,k} (T_{e,k} - T_{s,z}), \\
\frac{dT_{e,k}}{dt} &= \sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} \nu^{e,k \setminus s,z} (T_{s,z} - T_{e,k}) + \sum_{k'=1}^K \nu^{e,k \setminus e,k'} (T_{e,k'} - T_{e,k}).
\end{aligned} \tag{3}$$

Здесь $T_{s,z}$, $T_{e,k}$ — температуры ионов и электронов; $\nu^{s,z \setminus e,k}$, $\nu^{e,k \setminus s,z}$ — частота столкновений между ионами и электронами и наоборот; $\nu^{s,z \setminus s',z'}$, $\nu^{e,k \setminus e,k'}$ — частота столкновений между ионами и между электронами соответственно.

Дополняя систему (1)–(2) начальными условиями, можно получить полную задачу Коши для определения концентраций ионов и электронов в плазме ионного источника ЭЦР-типа [8].

В стационарном режиме работы ЭЦР-источника система уравнений (1)–(2) переходит в систему нелинейных алгебраических уравнений, т. е. правые

части системы (1)–(2) приравниваются нулю:

$$\begin{aligned}
& \frac{\bar{v}_{s,0} S_p}{V_p} (n_s - n_{s,0}) - \\
& - \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,0 \rightarrow m,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S \sum_{z=m+1}^{Z_{s'}} m \nu_{s',z \rightarrow z-m}^{\text{cx}} n_{s',z} \right) n_{s,0} = 0, \\
& \sum_{k=1}^K {}^1 \nu_{s,0 \rightarrow 1,k}^{\text{ion}} n_{e,k} n_{s,0} + \\
& + \sum_{s'=1}^S \left(\sum_{m=1}^M m \nu_{s,m+1 \rightarrow 1}^{\text{cx}} n_{s,m+1} n_{s',0} + \sum_{z=2}^{Z_{s'}} {}^1 \nu_{s',z \rightarrow z-1}^{\text{cx}} n_{s',z} n_{s,0} \right) - \\
& - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{k,1 \rightarrow m+1,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \frac{1}{\tau_{s,1}} \right) n_{s,1} = 0, \\
& \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{s,2-m \rightarrow 2,k}^{\text{ion}} n_{e,k} n_{s,2-m} + \\
& + \sum_{s'=1}^S \left(\sum_{m=1}^M m \nu_{s,m+2 \rightarrow 2}^{\text{cx}} n_{s,m+2} n_{s',0} + \sum_{z=3}^{Z_{s'}} {}^2 \nu_{s',z \rightarrow z-2}^{\text{cx}} n_{s',z} n_{s,0} \right) - \\
& - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{k,2 \rightarrow m+2,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S {}^1 \nu_{s',2 \rightarrow 1}^{\text{cx}} n_{s',0} + \frac{1}{\tau_{s,2}} \right) n_{s,2} = 0, \quad (4) \\
& \dots \\
& \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,z-m \rightarrow z,k}^{\text{ion}} n_{s,z-m} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,z+m \rightarrow z}^{\text{cx}} n_{s,z+m} n_{s',0} \right) - \\
& - \sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s,z \rightarrow z+m,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,z \rightarrow z-m}^{\text{cx}} n_{s',0} \right) n_{s,z} - \frac{n_{s,z}}{\tau_{s,z}} = 0, \\
& \dots \\
& \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K m \nu_{s,Z_s-m-1 \rightarrow Z_s-1,k}^{\text{ion}} n_{s,Z_s-m-1} n_{e,k} + \sum_{s'=1}^S {}^1 \nu_{s,Z_s \rightarrow Z_s-1}^{\text{cx}} n_{s,Z_s} n_{s',0} - \\
& - \left(\sum_{k=1}^K {}^1 \nu_{s,Z_s-1 \rightarrow Z_s,k}^{\text{ion}} n_{e,k} + \right. \\
& \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{s'=1}^S m \nu_{s,Z_s-1 \rightarrow Z_s-m-1}^{\text{cx}} n_{s',0} + \frac{1}{\tau_{s,Z_s-1}} \right) n_{s,Z_s-1} = 0,
\end{aligned}$$

$$\sum_{m=1}^M \left(\sum_{k=1}^K m \nu_{s, Z_s - m \rightarrow Z_s, k}^{\text{ion}} n_{s, Z_s - m} n_{e, k} - \sum_{s'=1}^S m \nu_{s, Z_s \rightarrow Z_s - m}^{\text{cx}} n_{s, Z_s} n_{s', 0} \right) - \frac{n_{s, Z_s}}{\tau_{s, Z_s}} = 0,$$

и соответственно для электронной компоненты имеем

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^{Z_s - m} m \nu_{s, z - m \rightarrow z, k}^{\text{ion}} n_{s, z - m} n_{e, k} - \frac{n_{e, 1}}{\tau_{e, 1 \rightarrow 2}^h} - \frac{n_{e, 1}}{\tau_{e, 1}} &= 0, \\ \dots \\ \frac{n_{e, k-1}}{\tau_{e, k-1 \rightarrow k}^h} - \frac{n_{e, k}}{\tau_{e, k \rightarrow k+1}^h} - \frac{n_{e, k}}{\tau_{e, k}} &= 0, \\ \dots \\ \frac{n_{e, K-1}}{\tau_{e, K-1 \rightarrow K}^h} - \frac{n_{e, K}}{\tau_{e, K}} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Модель на основе систем (1)–(2) и (4)–(5) принимает во внимание все главные физические принципы, лежащие в основе работы ЭЦР-источника [1]: процесс образования ионов в результате ионизации электронным ударом, перезарядку ионов на нейтральных атомах рабочего газа, феномен ЭЦР-нагрева, удержание ионов и электронов магнитным полем с минимумом-В [10]. Также предложенная модель описывает накопление многозарядных ионов и процессы потерь электронов и ионов из камеры ионного источника.

3. НОВЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ВРЕМЕН УДЕРЖАНИЯ

Предыдущие работы [2–5] по расчету ЗРИ использовали подход [11] для расчета времен удержания:

$$\begin{aligned} \tau_z &= \left(R L \sqrt{\frac{\pi m_z}{2 k_B T_z}} + \frac{G \frac{z e \Delta \varphi}{k_B T_z}}{\nu_z} \right) \exp \left(\frac{z e \Delta \varphi}{k_B T_z} \right), \\ \tau_{e, c} &= \left(R L \sqrt{\frac{\pi m_e}{2 k_B T_{e, c}}} + \frac{G \frac{e \varphi}{k_B T_{e, c}}}{\nu_{e, c}} \right) \exp \left(\frac{e \varphi}{k_B T_{e, c}} \right), \\ \tau_{e, h} &= \frac{1}{\nu_{e, h}}, \quad G = \frac{\sqrt{\pi} (R + 1) \ln (2 R + 2)}{2 R}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь индексы c, h выбраны для обозначения холодных и горячих электронов соответственно; $\Delta\varphi$ — величина удерживающего потенциала для ионов; φ — потенциал плазмы для электронов; ν_z — полная частота столкновений ионов зарядового состояния z со всеми типами заряженных частиц в плазме; $\nu_{e,c}$ — полная частота столкновений холодных электронов с ионами и горячими электронами плазмы; $\nu_{e,h}$ — полная частота столкновений горячих электронов с ионами и холодными электронами плазмы; k_B — постоянная Больцмана; R — пробочное отношение; e — заряд электрона.

Расчет времен удержания электронов и ионов в работах [7, 8] основывался на развитой В.П. Пастуховым теории [9, 10] удержания плазмы в открытых магнитных ловушках:

$$\begin{aligned}\tau_{s,z} &= \left(R L \sqrt{\frac{\pi m_{s,z}}{2 k_B T_{s,z}}} + \frac{G \left(\frac{z e \Delta\varphi}{k_B T_{s,z}} \right)^2}{\left(\frac{1}{2} + \frac{z e \Delta\varphi}{k_B T_{s,z}} \right) \nu_{s,z}} \right) \exp \left(\frac{z e \Delta\varphi}{k_B T_{s,z}} \right), \\ \tau_{e,0} &= \left(R L \sqrt{\frac{\pi m_e}{2 k_B T_{e,0}}} + \frac{G \left(\frac{e \varphi}{k_B T_{e,0}} \right)^2}{\left(\frac{1}{2} + \frac{e \varphi}{k_B T_{e,0}} \right) \nu_{e,0}} \right) \exp \left(\frac{e \varphi}{k_B T_{e,0}} \right), \quad (7) \\ \tau_{e,k} &= \frac{1,48 \left(\ln R + \sqrt{\ln R} \right)}{\nu_{e,k}}, \\ G &= \frac{\sqrt{\pi} (R+1) \ln (2R+2)}{2R}.\end{aligned}$$

Здесь $\nu_{s,z}$ — полная частота столкновений зарядового состояния z ионов сорта s со всеми типами заряженных частиц в плазме, а также с нейтральными атомами.

Набор формул (7) обобщен на случай смеси газов и в полной мере применим для определения времен удержания электронов и ионов плазмы в процессе поиска решения систем (1)–(2) и (4)–(5) в рамках моделей, описанных в [7, 8].

Анализ системы уравнений (1)–(2) показывает справедливость уравнения о равенстве потоков из камеры в динамическом режиме работы ионного источника ЭЦР-типа. Действительно,

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} z n_{s,z} - \sum_{k=0}^K n_{e,k} \right) = \sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} \frac{z n_{s,z}}{\tau_{s,z}} - \sum_{k=0}^K \frac{n_{e,k}}{\tau_{e,k}} = 0. \quad (8)$$

В представленной работе уравнение (8) используется для разработки нового подхода к расчету времен удержания. Проследивая зависимость времени

удержания от величины удерживающего потенциала $\tau_{s,z} = \tau_{s,z}(\Delta\varphi)$ и времени удержания холодной электронной компоненты от величины потенциала плазмы $\tau_{e,0} = \tau_{e,0}(\varphi)$, на основе уравнения (8) составим функционал следующего вида:

$$F_1(\Delta\varphi, \varphi) = \left(1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} \frac{z n_{s,z}}{\tau_{s,z}(\Delta\varphi)}}{\frac{n_{e,0}}{\tau_{e,0}(\varphi)} + \sum_{k=1}^K \frac{n_{e,k}}{\tau_{e,k}}} \right)^2. \quad (9)$$

Использование функционала в форме (9) позволяет нам определить величины удерживающего потенциала $\Delta\varphi$ и потенциала плазмы φ . Далее, используя эти значения, мы можем определить времена удержания, составляя следующий функционал:

$$F_2(\tau_{1,1}, \tau_{1,2}, \dots, \tau_{1,Z_1}, \dots, \tau_{S,1}, \tau_{S,2}, \dots, \tau_{S,Z_S}, \tau_{e,0}, \tau_{e,1}, \dots, \tau_{e,K}) = \left(1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} \frac{z n_{s,z}}{\tau_{s,z}}}{\sum_{k=0}^K \frac{n_{e,k}}{\tau_{e,k}}} \right)^2. \quad (10)$$

При этом в качестве начальных значений для аргументов функционала (10) используются величины, полученные с помощью формул (7), а величины $\Delta\varphi$ и φ берутся из минимизированного функционала (9).

Расчет времен удержания в процессе двухэтапной минимизации функционалов (9) и (10) составляет новый подход к определению времен удержания электронов и ионов в ионном источнике ЭЦР-типа.

4. НОВЫЙ ПОДХОД К УЧЕТУ ПРОЦЕССА ЭЦР-НАГРЕВА ВНЕШНИМ СВЧ-ПОЛЕМ

Корректный учет процесса ЭЦР-нагрева электронной компоненты плазмы внешним СВЧ-полем может быть произведен следующим образом: в предположении, что известна полная частота столкновений для электронов в ЭЦР-плазме ν_e , время ЭЦР-нагрева электронов внешним СВЧ-полем может быть определено из уравнения баланса энергии W для электронов:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{e^2 E^2}{m_e \nu_e} \sin^2(\omega t + \varphi) - \frac{2 \nu_e m_e W}{m_z}, \quad (11)$$

где E , ω , φ — амплитуда, частота и начальная фаза внешнего СВЧ-поля соответственно; m_e , m_z — масса электрона и иона зарядового состояния z . Найденное решение уравнения (11), усредненное по фазе внешнего СВЧ-поля, было использовано для определения времени ЭЦР-нагрева электронов компоненты k до температуры $T_{e,k'}$ компоненты k' :

$$\tau_{e,k \rightarrow k'}^h = \frac{2 m_e \nu_{e,k} T_{e,k'}}{e^2 E^2}, P_s \propto E^2. \quad (12)$$

Здесь P_s — мощность источника внешнего СВЧ-поля, для ее зависимости от амплитуды использовалась работа [1]. Выражение (12) было использовано в процессе решения систем (1)–(2) и (4)–(5).

5. НОВЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ОБЪЕМА И ПЛОЩАДИ ДЛЯ ЭЦР-ПОВЕРХНОСТИ

В работах [7, 8] учет уравнения для нейтралов приводит к необходимости расчета потока нейтральных частиц плазмы через резонансную поверхность внутрь ЭЦР-плазмы, что требует дополнительных параметров, а именно: объема и площади для ЭЦР-поверхности. В работах [6–8] резонансная поверхность представлялась эллипсоидом и объем и площадь вычислялись, соответственно, для этого случая.

В данной работе объем, ограниченный ЭЦР-поверхностью, и ее площадь рассчитываются исходя из реальных магнитных полей магнитной системы ЭЦР-источника, которые были выбраны в следующем виде:

$$\begin{aligned} B(x, y, z) &= \sqrt{B_x^2(x, y, z) + B_y^2(x, y, z) + B_z^2(z)} - B_{\text{res}}, \\ B_x(x, y, z) &= (x^2 - y^2) B_0 - x z B_2, \\ B_y(x, y, z) &= -y (2 x B_0 + z B_2), \\ B_z(z) &= B_1 + z^2 B_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь B_0 , B_1 , B_2 — размерные константы, характеризующие магнитное поле ионного источника, величина B_{res} характеризует резонансное значение магнитного поля. Объем и площадь для ЭЦР-поверхности определялись следующим образом:

$$\begin{aligned} S_p &= \oint_S \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{\Omega} \text{div } \mathbf{n} \, dV, \quad d\mathbf{S} = \mathbf{n} dS, \quad dS = dx dy, \\ V_p &= \iiint_{\Omega} dV, \quad dV = dx dy dz, \end{aligned} \quad (14)$$

$$S = \{(x, y, z) : B(x, y, z) = 0\}, \Omega = \{(x, y, z) : B(x, y, z) < 0\},$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}(x, y, z), \mathbf{n}(x, y, z) = \frac{\text{grad}B(x, y, z)}{|\text{grad}B(x, y, z)|}.$$

Расчет по формулам (14) производился с помощью метода статистического моделирования (метод Монте-Карло), который был протестирован для случаев, в которых используются аналитические формулы объема и площади: для шара с заданным радиусом и эллипсоида с заданными полуосями.

6. РАСЧЕТ ТОКОВ ЭКСТРАКЦИИ И МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ

Токи вывода в стационарном режиме работы ионного источника были вычислены так же, как и в работах [4], [6–8]:

$$J_{s,z} = \frac{e V_p a z n_{s,z}}{2 S_p \tau_{s,z}}, \quad (15)$$

где a — размер отверстия вывода пучка. Также был использован подход, учитывающий ограничение тока вывода пространственным зарядом на основе закона Ленгмюра [18]:

$$J_{s,z} = \sqrt{\frac{z}{Z_s}} \frac{e V_p a z n_{s,z}}{2 S_p \tau_{s,z}}. \quad (16)$$

Уравнение баланса мощностей потерь было выбрано в пренебрежении потерями отражения внешнего СВЧ-поля от резонансной поверхности, т. е.

$$P_s \approx P_{\text{tr}} + P_{\text{Br}} + P_c,$$

$$P_{\text{tr}} = e V_p (\varphi + T_{e,0}) \frac{n_{e,0}}{\tau_{e,0}} + e V_p \sum_{k=1}^K \frac{n_{e,k} T_{e,k}}{\tau_{e,k}} +$$

$$+ e V_p \sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s-1} \left(z \Delta\varphi + \sum_{z'=1}^z I_{s,z'} \right) \frac{n_{s,z}}{\tau_{s,z}}, \quad (17)$$

$$P_{\text{Br}} = 1,69 \cdot 10^{-32} V_p \sum_{k=1}^K n_{e,k} \sqrt{T_{e,k}} \sum_{s=1}^S \sum_{z=1}^{Z_s} z^2 n_{s,z},$$

$$P_c = 6,21 \cdot 10^{-32} V_p B_{\text{res}}^2 \sum_{k=1}^K n_{e,k} T_{e,k}.$$

Здесь P_{tr} — мощность потерь при удержании; P_{Br} — мощность тормозного излучения; P_c — мощность циклотронного излучения.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Далее приведено сравнение расчетных значений ЗРИ для ионного источника ЭЦР-типа (SERSE 18 ГГц) Национального института ядерной физики, Южной национальной лаборатории (Катания, Италия) с экспериментальными результатами [17].

При моделировании были выбраны следующие параметры оптимизированного для рабочей частоты (18 ГГц) магнитного поля и размеры камеры ионного источника SERSE:

$$B_0 = 333,7 \frac{\text{Гс}}{\text{см}^2}, B_1 = 5373,8 \text{ Гс}, B_2 = 42,5 \frac{\text{Гс}}{\text{см}^2}, B_{\text{res}} = 6425,9 \text{ Гс},$$

$$D = 13 \text{ см}, L = 48 \text{ см}.$$

Здесь D и L — диаметр и длина камеры источника.

Решалась задача Коши системы уравнений (1)–(2) для ^{18}O . После выхода решений на стационарный режим значения концентраций ионов и электронов использовались в качестве первой итерации поиска решения статической задачи (4)–(5). Процедура поиска значений удерживающего потенциала и

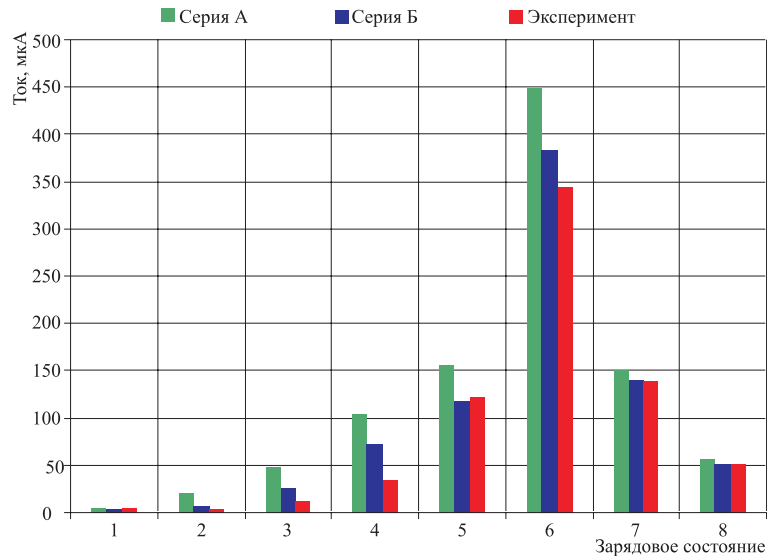


Рис. 1. Сравнение токов экстракции для различных моделей токов [17]. Времена ЭЦР-нагрева: $\tau_{e,0 \rightarrow 1}^h = 10^{-7}$ с, $\tau_{e,1 \rightarrow 2}^h = 10^{-8}$ с; серия А: $n_e = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_{e,0} = 100$ эВ, $T_{e,1} = 5$ кэВ, $T_{e,2} = 15$ кэВ, $P = 1466,2$ Вт — формула (15); серия Б: те же параметры, но выбрана формула (16); экспериментальный результат $P = 1400$ Вт

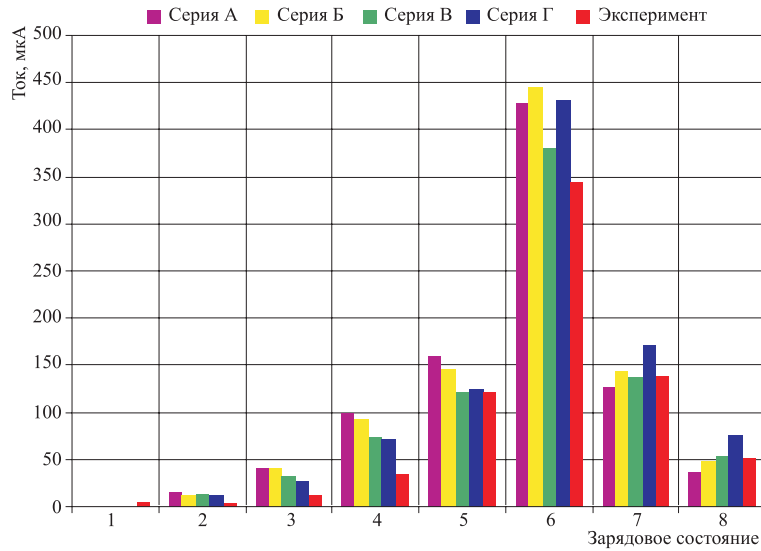


Рис. 2. Сравнение токов экстракции для различных времен ЭЦР-нагрева и начальных электронных температур [17]. Времена ЭЦР-нагрева: $\tau_{e,0 \rightarrow 1}^h = 10^{-7}$ с, $\tau_{e,1 \rightarrow 2}^h = 10^{-8}$ с; серия А: $n_e = 1,8 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $T_{e,0} = 100$ эВ, $T_{e,1} = 5$ кэВ, $T_{e,2} = 8$ кэВ, $P = 937,8$ Вт; серия Б: $n_e = 2,1 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $T_{e,0} = 100$ эВ, $T_{e,1} = 5$ кэВ, $T_{e,1} = 10$ кэВ, $P = 1157,8$ Вт; серия В: $n_e = 2,3 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $T_{e,0} = 100$ эВ, $T_{e,1} = 5$ кэВ, $T_{e,1} = 15$ кэВ, $P = 1466,2$ Вт; времена ЭЦР-нагрева $\tau_{e,0 \rightarrow 1}^h = 10^{-9}$ с, $\tau_{e,1 \rightarrow 2}^h = 10^{-10}$ с; серия Г: $n_e = 2,5 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $T_{e,0} = 100$ эВ, $T_{e,1} = 5$ кэВ, $T_{e,1} = 15$ кэВ, $P = 1852,8$ Вт; экспериментальный результат $P = 1400$ Вт

потенциала плазмы, а также времен удержания проводилась на каждом 10-м шаге интегрирования системы (1)–(2) и каждой итерации при решении статической задачи (4)–(5). Результаты расчета приведены на рис. 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные предварительные результаты численного моделирования должным образом соответствуют экспериментальным данным.

Предложенное развитие модели уравнений баланса включает в себя все главные физические принципы, лежащие в основе работы ЭЦР-источника, а именно: ионизацию электронным ударом, перезарядку на нейтральных атомах рабочего газа, удержание заряженных частиц магнитным полем с минимумом-В, феномен ЭЦР-нагрева.

Показана справедливость уравнения о равенстве потоков в динамическом режиме работы ионного источника ЭЦР-типа. Это позволило исключить два

параметра модели: потенциал плазмы и величину удерживающего потенциала, а также стало основанием для разработки нового подхода к расчету времен удержания электронов и ионов ЭЦР-плазмы магнитным полем источника: расчет времен удержания в процессе двухэтапной минимизации функционалов специального вида, построенных на основе уравнения о равенстве потоков. Предложенный новый подход использует полуэмпирические формулы теории Пастухова.

Уточнение времен переходов электронов одной энергетической компоненты в другую в процессе ЭЦР-нагрева внешним СВЧ-полем, а также учет новых уравнений, описывающих изменение энергий различных компонент ЭЦР-плазмы в процессе накопления многозарядных ионов, позволяет сократить число параметров модели и в какой-то степени лишает предложенную модель феноменологического статуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Geller R.* Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. Institute of Physics. Bristol and Philadelphia, 1996.
2. *Jongen Y.* Confinement and Charge-State Distribution in ECR Source. LC-8001. Laboratoire du Cyclotron. Université Catholique de Louvain, 1980.
3. *Jongen Y.* Distribution d'Etats de Charge dans le Plasma d'une Source ECR. LC-8003. Laboratoire du Cyclotron. Université Catholique de Louvain, 1980.
4. *West H. I., Jr.* Calculation of Ion Charge-State Distribution in ECR Ion Source. UCRL-53391. Lawrence Livermore National Laboratory. University of California, 1982.
5. *Chan-Tung N.* Thèse de doctorat. Grenoble, 1980.
6. *Shirkov G.* // Plasma Sources Science and Technology. 1993. V. 2, No. 4. P. 250–257.
7. *Shirkov G.* // Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71, No. 2. P. 850–852.
8. *Philippov A. V., Shirkov G. D., Tokareva N. A.* Multicomponent consideration of electron fraction and numerical simulation of the bremsstrahlung emission from the ECR source in afterglow mode. JINR Commun. E9-2001-21. Dubna, 2001. 15 p.
9. *Pastukhov V. P.* // Nuclear Fusion. 1974. V. 14, No. 3. P. 3–6.
10. *Пастухов В. П.* // Вопросы теории плазмы: Сб. ст. Вып. 13. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 160–204.
11. *Rognlien T. D., Catler T. A.* // Nuclear Fusion. 1980. V. 20. P. 1003–1011.
12. *Shirkov G., Zschornack G.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1995. V. 95. P. 527–532.

13. *Dougar-Jabone V. D., Kondratov B. A., Umnov A. M. // Rev. Sci. Instr.* 1992. V. 63, No. 4. P. 2864–2866.
14. *Dougar-Jabone V. D., Umnov A. M. // Ibid.* P. 2869–2871.
15. *Dougar-Jabone V. D., Umnov A. M., Kutner V. B // Rev. Sci. Instr.* 1996. V. 67, No. 3. P. 1152–1154.
16. *Dougar-Jabone V. D. et al. // Physica Scripta.* 1999. V. 60. P. 250–252.
17. *Consolil F., Philippov A. V., Shirkov G. D. et al. // Proc. of 33rd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Rome, Jun. 19–23, 2006. V. 30I. P-2.067.*
18. *Langmuir I., Compton K. T. // Rev. Mod. Phys.* 1931. V. 3, No. 2. P. 191–257.

Получено 23 мая 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 04.09.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,29. Тираж 280 экз. Заказ № 55869.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/