

Д.Р. ФИЛИПЕНКО^{1,2}, П.В. МИНАШИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

УПРОЩЕННЫЙ ЛУЧЕВОЙ КОД ДЛЯ РАСЧЕТА МНОГОПРОХОДНОГО ЭЦ-ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЭМ-ВОЛН ПЛАЗМОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ

Разработан новый код для расчета эффективности электронного циклотронного (ЭЦ) поглощения инжектированных в плазму ЭМ волн на начальной стадии разряда в токамаках. Новый код является упрощением для условий начальной стадии разряда лучевых кодов для расчета ЭЦ-нагрева плазмы: (1) применяется приближение прямолинейных траекторий для траекторий лучей, (2) используются аналитические коэффициенты поглощения ЭЦ-волн в разреженной максвелловской плазмы, (3) учитывается конверсия мод при отражении волны от стенки вакуумной камеры.

D.R. FILIPENKO^{1,2}, P.V. MINASHIN^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

SIMPLIFIED RAY TRACING CODE FOR CALCULATING THE MULTI-PASS EC-ABSORPTION OF INJECTED EM-WAVES IN PLASMA AT THE INITIAL STAGE OF DISCHARGE IN TOKAMAKS

A new code has been developed for calculating the efficiency of electron cyclotron (EC) absorption of electromagnetic (EM) waves injected into the plasma at the initial stage of discharge in tokamaks. The new code is a simplified version of ray-tracing codes for calculating the heating of plasma by EC waves for the conditions of the initial phase of discharge: (1) straight-line trajectory approximation for ray trajectories, (2) analytical coefficients for the absorption of EC waves in a tenuous Maxwellian plasma, and (3) mode conversion at wave reflection from the vacuum chamber wall.

Электронно-циклотронный (ЭЦ) резонансный нагрев используется в действующих токамаках как на квазистационарной стадии разряда для дополнительного нагрева плазмы, генерации неиндуктивного тока и подавления МГД неустойчивостей [1], так и на начальной стадии разряда для предионизации плазмы, преодоления радиационного барьера и увеличения скорости подъема тока [2]. ЭЦ-нагрев на начальной стадии разряда в больших токамаках (ИТЭР, ДЕМО) будет необходим, так как из-за технических особенностей одного омического нагрева будет недостаточно для надежного создания плазмы [3].

Температура и плотность плазмы на начальной стадии разряда в токамаках таковы ($T_e=10-1000$ эВ, $n_e=(0.1-1.0)\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$), что невозможно реализовать полное ЭЦ-поглощение инжектированной в плазму электромагнитной (ЭМ) волны на одном проходе волны до отражения от первой стенки (эффективность однопроходного поглощения, т.е. доля поглощенной мощности, меньше 5% [4]). Поэтому в сценариях с ЭЦ-нагревом на начальной стадии разряда требуется учитывать многопроходное ЭЦ-поглощение волн. Моделирование многопроходного ЭЦ-поглощения можно проводить с помощью следующих подходов: (I) модифицированные лучевые коды для расчета ЭЦ-нагрева, в которых учтены нескольких проходов ЭЦ-волны, изменение поляризации ЭЦ-волн при отражении от стенки и поглощение волны в стенке (например, путем модификации [5] кода TORAY); (II) расчет многопроходного поглощения в приближении изотропного и однородного размешивания излучения после первого отражения от стенки вакуумной камеры [6] и мультирезонансная модель для расчета излучения, рассеянного при отражении ЭМ-волн, инжектированных системой ЭЦ-нагрева плазмы [7].

В работе предлагается новый код для расчета многопроходного ЭЦ-поглощения плазмой инжектированных ЭМ волн на начальной стадии разряда, который является упрощением лучевых кодов для условий начальной стадии разряда: (1) применяется приближение прямолинейных траекторий для траекторий лучей, (2) используются аналитические коэффициенты поглощения ЭЦ-волн в разреженной максвелловской плазмы [8], (3) учитывается конверсия мод при отражении волны от стенки вакуумной камеры [9].

Список литературы

1. Prater R. // Physics of Plasmas. 2004. V. 11. PP. 2349-2376.
2. Stober J., Jackson G.L., Ascasibar E., Bae Y.S., et al. // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. P. 083031.
3. Lloyd B., Carolan P.G., Warrick C.D. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1996. V. 38. PP. 1627-1643.
4. Khayrutdinov R.R., Kuyanov A.Y., et al. // Proc. 38th EPS Conf. on Plasma Physics, France, 2011. ECA. V. 35G. P. P2.085.
5. Granucci G., Garavaglia S., Ricci D., Artaserse G., et al. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 093025.
6. Minashin P.V., Kukushkin A.B., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. // EPJ Web of Conferences. 2015. V. 87. P. 03005.
7. Moseev D., Oosterbeek J.W., Sirinelli A., Corre Y., et al. // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 172. P. 112754.
8. Bornatici M., Cano R., De Barbieri O., Engelmann F. // Nuclear Fusion. 1983. V. 23. P. 1153.
9. Hsu J.Y., Moeller C.P. // AIP Conference Proceedings. 1987. V. 159. PP. 13-16.