

Письма в ЖЭТФ, том 16, вып. 1, стр. 37–39

5 июля 1972 г.

КОЭФФИЦИЕНТ ВЫХОДА ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ "ТЕРМОЯДЕРНОЙ" ПЛАЗМЫ

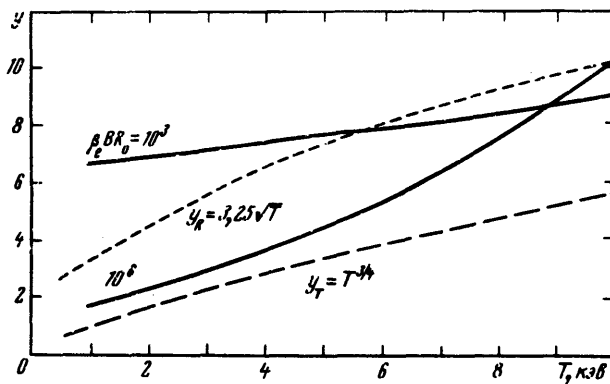
Б. А. Трубников

В энергетическом балансе термоядерных реакторов важную роль будет играть циклотронное излучение, которое ввиду сложности формул для коэффициентов поглощения можно подсчитать лишь численными методами. Результаты обычно представляются в виде графиков. Весьма полезными, однако, могут оказаться простейшие аппроксимационные формулы, приближенно описывающие эти графики.

Анализируя три примера [1 - 3] численных расчетов, можно убедиться, что с 50%-й точностью относительный коэффициент выхода излучения может быть аппроксимирован "универсальной" формулой, пригодной для плазменного слоя, цилиндра и тора

$$\Phi \cong 60 \frac{t^{3/2}}{\sqrt{\rho_a}} \sqrt{1-r} \sqrt{1+\chi_T}. \quad (1)$$

Здесь: $t = T/mc^2$ - температура в единицах $mc^2 = 511$ кэв; $\rho_a = \sigma \omega_0^2 / c \omega_B$ - безразмерный "параметр непрозрачности", в котором σ - радиус цилиндра, или толщина плоского слоя, или малый радиус тора, $\omega_0^2 = 4\pi n_e e^2 / m$ - квадрат плазменной частоты, $\omega_B = eB/mc$ - циклотронная частота электронов, c - скорость света; r - коэффициент отражения зеркал, расположенных на границе плазмы; и наконец $\chi_T = a/R \sqrt{t}$ - параметр неоднородности магнитного поля в торе с малым и большим радиусом a и R .



Рисунок, аналогичный рис. 2 работы [3], но учитывающий формулу (2). Показаны две кривые $y = 5\pi \sqrt{\beta_e BR_0} \phi / T$ кэв для $\beta_e BR_0 = 10^3$ и 10^6 и две аппроксимации y_R - Розенблота [3] и y_T - наша, соответствующая формуле (1)

Случай Розенблота [3] соответствует $\chi_T \gg 1$, однако формула (1), удовлетворительно описывающая результаты работ [1 - 2], приводит - для условий [3] к излучению, примерно в два раза меньшему, чем было найдено в работе [3], где совершенно не учитывалось доплеровское уширение линий циклотронного спектра. Основное расхождение, однако, обусловлено видимо тем, что при вычислении коэффициентов поглощения Розенблот использовал лишь первый член разложения функций Бесселя $J_n(x) \approx (x/2)^n / n!$, где $x = n\beta_1 \sin \theta$, $\theta = \angle(\mathbf{k}, \mathbf{B})$, что при усреднении по нерелятивистскому максвеллов-

скому распределению давало $\langle J_n^2(x) \rangle = (\xi/2)^n / n!$, где $\xi = n^2 t \sin^2 \theta$, и приводило к появлению расходящихся рядов в суммах по n . Между тем, использование точной формулы

$$\langle J_n^2(x) \rangle = e^{-\xi} I_n(\xi) \quad (2)$$

показывает, что величины $\alpha \Lambda^j$, фигурирующие в [3], следует умножить примерно на $\exp(-n^2 t)$, что приводит (для $T \cong 5 \div 10$ кэВ) к более быстрой сходимости рядов и к лучшему согласованию результатов с аппроксимационной формулой (1) (см. рисунок).

Полное циклотронное излучение слоя, цилиндра или тора (токамака) подсчитывается по формуле (v – объем плазмы)

$$w = N_e \frac{2e^2}{3c^3} \langle \dot{v}^2 \rangle \Phi, \quad \text{где } N_e = n_e V, \quad \langle \dot{v}^2 \rangle = \omega_B^2 \frac{2T}{m} \quad (3)$$

и будет меньше выделения в плазме термоядерной энергии в реакторе на смеси 1:1 дейтерия и трития примерно (для $T = 15$ кэВ) при условии $\Phi \lesssim 8\beta_e$, где $\beta_e = 8\pi n_e T / B^2$.

Для обсуждаемых в работе [4] проектов токамаков с $\beta_e \approx 0,1$ излучение не опасно даже при отсутствии отражателей. Установки с малым β_e на чистом дейтерии менее перспективны, так как требуются отражатели с $r \gtrsim 0,99$.

Подробная статья будет направлена для опубликования в журнале "Ядерный синтез".

Автор признателен Л.А.Арцимовичу и В.Д.Шафранову за стимулирование настоящей работы и М.А.Леонтовичу, Л.С.Соловьеву и В.С.Муховакову за ценные дискуссии.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
4 мая 1972 г.

Литература

- [1] Б.А.Трубников, А.Е.Бажанова. Физика плазмы и проблема УТР. 3; стр. 121 (см. рисунок 6 для $\Phi(\rho_0, T)$).
- [2] W.E.Drummond, M.N.Rosenbluth. Phys. Fluids, 6, 276, 1963. (see Fig. 5, 6 for $m^{*3} = 2\pi\rho_0\Phi$).
- [3] M.N.Rosenbluth. Nucl. Fusion, 10, 340, 1970 (see Fig. 2 for $y(T, \beta_e RB) = 5\pi\sqrt{\beta_e RB}\Phi/T$ кэВ).
- [4] I.N.Golovin, Y.W.Dnestrovski, D.P.Costomarov. Proc. Nucl. Fusion Reactor Conference (Culham, 1969) p. 194.