

О НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В ЗАМКНУТЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ ИНЖЕКЦИЕЙ БЫСТРЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

М.В.Незлин

Один из методов нагрева ионов плазмы в современных замкнутых магнитных ловушках – инжекция в плазму быстрых атомов водорода с энергией в десятки-сотни килоэлектронвольт [1, 2, 12, 13]. Быстрые нейтральные атомы создаются нейтрализацией пучка ионов в перезарядной газовой мишени. Войдя в плазму, они ионизируются, захватываются в ловушку и передают энергию частицам плазмы, которые удерживают эту энергию в течение характерного времени τ_e . В данной статье показано, что замена атомов водорода на атомы лития той же энергии делает этот метод нагрева плазмы значительно более эффективным и предпочтительным для использования на существующих и сооружаемых экспериментальных установках. Рассмотрим основные факторы, определяющие эффективность данного метода нагрева плазмы.

1. Скорость передачи энергии от быстрого иона с энергией W к ионам и электронам плазмы выражается соотношениями [3, 4]¹⁾:

$$\frac{dW}{dt_{ii}} = - 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{A_1^{1/2} Z^2 n L}{W^{1/2} A_2} \text{ эв/сек} \quad , \quad (1)$$

$$\frac{dW}{dt_{ie}} = - 3,2 \cdot 10^{-9} \frac{Z^2 n W L}{A_1 T_e^{3/2}} \text{ эв/сек} \quad , \quad (2)$$

где A_1 и Z – массовое число и кратность заряда быстрого иона, A_2 – массовое число ионов плазмы, L – кулоновский логарифм, M и m – массы протона и электрона, n – концентрация плазмы, в см^{-3} , T_e – электронная температура, (ниже полагаем $A_2 = 1$ и $L = 15$ [3]). Граничная энергия, при которой $dW/dt_{ii} = dW/dt_{ie}$, равна [4]:

$$W_2 \approx 16 T_e A_1 \quad . \quad (3)$$

При $W < W_2$ быстрый ион передает энергию преимущественно ионам плазмы, при $W > W_2$ – электронам. Время охлаждения быстрого иона до $W \approx T_i$, T_e [12]:

$$\tau = - \int \frac{W}{dW/dt} \approx 2,6 \cdot 10^7 \frac{A_1 T_e^{3/2}}{Z^2 n} \ln[1 + (W/W_2)^{3/2}] \quad (4)$$

¹⁾ Соотношения, используемые в [2], ошибочны, поскольку они определяют время релаксации направленного импульса быстрого иона, но не его энергии.

²⁾ $W < \frac{A_1 M}{m} T_e$

В соотношения (1) – (4) следует подставлять для протонов $A_1 = Z = 1$, для ионов лития $A_1 = 7, Z = 3$ (легко видеть, что время потери атомом лития всей электронной оболочки в плазме с $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$ ничтожно мало по сравнению с временем охлаждения: сечение отрыва первого электрона электронами плазмы $\sigma_e \approx 6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, второго $\sim 3 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, третьего – почти как второго [5, 6]).

2. Пробег нейтрального атома до ионизации в плазме:

$$\lambda = \left(n\sigma_i + n\sigma_e \frac{v_e}{v_0} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где σ_e, σ_i – сечения ионизации атома (скорость v_0) электронами (скорость $v_e \gg v_0$) и ионами плазмы. У атомов лития величины σ_i, σ_e в 3 – 6 раз больше, чем у атомов водорода [5, 7], а скорость v_0 (при одинаковой энергии) в 2,7 раза меньше. Поэтому атомы лития имеют значительно меньшую величину λ .

3. Эффективность нейтрализации ионного пучка в перезарядной мишени равна $(1 + \sigma_{01}/\sigma_{10})^{-1}$, где σ_{10}, σ_{01} – сечения нейтрализации иона и обдирки атома на атомах мишени. Величина σ_{01} составляет $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$ [8 – 10]. Величина σ_{10} быстро убывает с увеличением скорости иона [8 – 10], вследствие чего при $W = 100 \text{ кэВ}$ эффективность нейтрализации не превышает 0,2 в случае иона водорода [8] и составляет ~ 1 в случае иона лития (на парах K, Na, Li) [9 – 10].

Рассмотрим теперь типичную ловушку типа "Токамак" [11]: $n \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $T_i \lesssim T_e \approx 1 \text{ кэВ}$, $\tau_e \approx 10 \text{ мсек}$, малый диаметр тора $d \lesssim 40 \text{ см}$. Требуется нагреть ионы плазмы до значительно более высокой температуры, соблюдая, естественно, следующие условия: время нагрева ионов меньше или равно τ_e , пробег инжектируемого атома до ионизации в плазме $\lambda \lesssim d$ (предполагается, что производительность ионного источника – при достаточно полном ее использовании – достаточна для нагрева плазмы). Рассмотрим сначала "литиевый" вариант нагрева при $W = W_2 \approx 110 \text{ кэВ}$. В этом случае, согласно (4), ионы лития за время $\tau \approx 8,5 \text{ мсек} < \tau_e$ передадут большую часть энергии ионам плазмы. Длина ионизации (захвата в ловушку) атомов лития ($v_0 \approx 1,8 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$, $\sigma_i \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ [7], $\sigma_e \approx 6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ [5]), согласно (5), составит: $\lambda \approx 20 \text{ см} < d$. В "водородном" варианте нагрева, при той же энергии $W \approx 110 \text{ кэВ}$, согласно (1) – (4), будут преимущественно греться электроны (с характерным временем $\tau \approx 50 \text{ мсек} \gg \tau_e$). Скорость нагрева ионов плазмы будет в этом варианте в 24 раза меньше, и за энергетическое время τ_e ионам плазмы будет передано всего около 4% энергии захваченных в ловушку быстрых протонов. Коэффициент захвата этих частиц в ловушку тоже окажется малым, поскольку (при $v_0 = 4,7 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$, $\sigma_i = 1,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_e \approx 1 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$) [7], согласно (5), $\lambda \approx 110 \text{ см} \gg d$. Кроме того, коэффициент нейтрализации ионного пучка в этом варианте составляет всего $\sim 0,2$. Следовательно, эффективность "водородного" варианта нагрева в типичной экспериментальной ситуации весьма мала.

Таким образом, основные факторы, определяющие эффективность рассматриваемого метода нагрева плазмы, оказываются существенно более благоприятными в "литиевом" варианте метода. Этот вариант

представляется поэтому более предпочтительным для использования на существующих и сооружаемых экспериментальных установках типа "Токамак".

Благодарю Б.А.Трубникова за обсуждения.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
7 июня 1972 г.

Литература

- [1] C.F.Barnett et al. Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Research, Vienna 1971, vol.I, p. 347.
- [2] D.R.Sweetman et al. Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Research, Vienna , 1971, vol. III, p. 393.
- [3] Л.А.Арцимович. Управляемые термоядерные реакции, изд. 2-е, стр. 61 – 62. Физматгиз, 1963.
- [4] Д.В.Сивухин. Вопросы теории плазмы, под ред. М.А.Леонтовича, том 4, стр. 111 1964.
- [5] R.H.Mc Farland. Phys. Rev., 139, 1A, 40, 1965.
- [6] D.L.Moores, H.Nussbaumer. Journ. Phys., B3, 161, 1970.
- [7] G.W.Catlow, M.R.C.McDowell. Proc. Phys. Soc., 92, 875, 1967.
- [8] Н.В.Федоренко. ЖТФ, 40, 2481, 1970.
- [9] S.K.Allison et al. Phys. Rev., 120, 1266, 1960.
- [10] Л.И.Пивовар и др. ЖЭТФ, 57, 432, 1969.
- [11] Л.А.Арцимович и др. Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Research, Vienna 1971, vol I, p. 343.
- [12] T.H.Stix, Plasma Phys., 14, 367, 1972.
- [13] G.G.Kelley et al., Nuclear Fusion, 12, 169, 1972.