

04

Возможность демонстрации самоподдерживающейся термоядерной реакции в амбиполярной ловушке

© Г.И. Димов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 28 июля 1999 г.

Кратко описывается осесимметричная пробочная ловушка для демонстрации зажигания D–T плазмы, удерживаемой амбиполярными барьерами. Ключевыми проблемами для такой демонстрации являются откачка ионов и подавление неустойчивостей в термобарьерах. Предлагается откачивать основные ионы из термобарьеров возбуждением баунс-колебаний захваченных ионов на параметрических резонансах.

На основе амбиполярной ловушки в принципе может быть реализовано несколько вариантов амбиполярного термоядерного реактора. Амбиполярный реактор с полной аксиальной симметрией и двойными концевыми пробкотронами [1] представляется наиболее перспективным вариантом. Для реализации полной аксиальной симметрии необходимо удерживать в ловушке плазму высокого давления ($\beta \sim 1$), магнитогидродинамическую (МГД) устойчивость которой можно поддерживать проводящими стенками вакуумной камеры и эффектом конечного ларморовского радиуса ионов (КЛР) [2,3].

Для демонстрации осуществимости амбиполярного D–T реактора возможно построить термоядерную пробочную установку (ТПУ) в виде реактора с укороченным центральным соленоидом. На рисунке представлена сверхпроводящая магнитная система и геометрия плазмы установки ТПУ. Вакуумное магнитное поле в соленоиде 2 Т, в термобарьерах "b" 1.67 Т, в амбиполярных барьерах "b" 4.3 Т, в пробках "m" и "h" 14 Т и в выходной пробке "m*" 14.8 Т. Общий вес сверхпроводящих катушек с бондажными шайбами около 300 т, что меньше соответствующего веса катушек стелларатора LHD, работающего в институте NIFS (Япония).

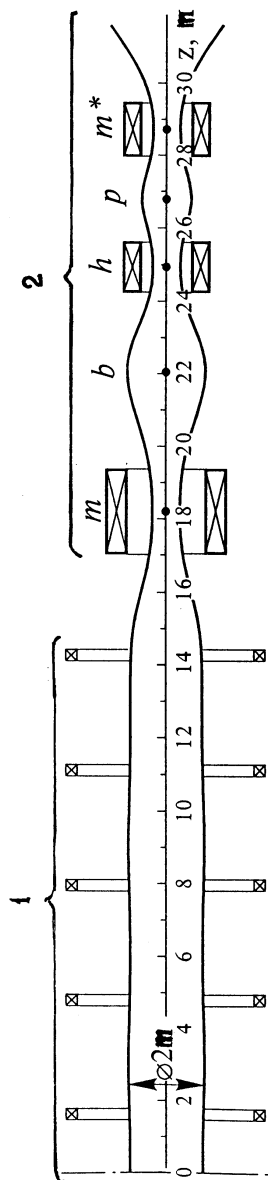


Схема установки ТПУ (правая половина): 1 — соленоид, 2 — двойной концевой пробкотрон.

Параметры D–T плазмы в соленоиде: плотность $n_s = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, температура $T_s = 25 \text{ keV}$, $\beta = 0.85$, радиус плазмы 1 m (радиус вакуумной стенки 1.3 m), нейтронная нагрузка на стенку 1.8 MV/m^2 , термоядерная мощность вместе с выделяющейся в blankets 24 MV/m. Глубина термобарьеров 112 kV, амбиполярные барьеры 105 kV. Параметр удержания энергии плазмы $n\tau_\varepsilon = 1.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ при $n\tau_{\varepsilon\perp} \approx n\tau_{\varepsilon\parallel}$.

В термобарьерах "b" плотность плазмы 10^{13} cm^{-3} и температура горячих электронов 360 keV. В амбиполярных барьерах "p" плотность плазмы $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, температура горячих ионов 400 keV и температура электронов 77 keV. Величины β_\perp 0.7 и 0.65 в плоскостях "b" и "p" соответственно. Отношение давлений p_\perp/p_\parallel 1.9 и 2.4 в плоскостях "b" и "p" соответственно. Увеличение величин β_\perp и p_\perp/p_\parallel улучшает стабилизацию плазмы проводящими стенками.

Несколько низших МГД-мод стабилизируются стенками вакуумной камеры в соленоиде, термобарьерах и амбиполярных барьерах. Более высокие МГД-моды могут стабилизироваться эффектом КЛР в соленоиде и амбиполярных барьерах. Медленный поперечный дрейф плазмы в целом может быть подавлен рядом методов [4].

Мощность ЭЦР-нагрева $2 \cdot 70 \text{ MW}$ (38 MHz) в термобарьерах и $2 \cdot 16.7 \text{ MW}$ (77 MHz) в амбиполярных барьерах. Мощность атомарной инжекции в амбиполярные барьеры $2 \cdot 3.8 \text{ MW}$. Суммарная мощность, поглощаемая в плазме двойных концевых пробкотронов, составляет 176 MW. Отношение мощности, вырабатываемой в соленоиде, к мощности, вводимой в концевые пробкотроны, $Q \approx 4$. Продолжительное испытание установки ТПУ может проводиться без потребления внешней электроэнергии за счет использования вырабатываемой термоядерной энергии. При заданной удельной нейтронной нагрузке на стенки капитальная стоимость защиты и blankets с системой теплосъема на единицу термоядерной мощности не будет больше, чем в любой другой термоядерной установке с магнитным удержанием плазмы. Основными источниками мощности для нагрева частиц в пробкотронах являются СВЧ-генераторы в диапазоне частот $40 \div 80 \text{ GHz}$. Такие генераторы не должны быть очень дорогими.

Запуск установки может начинаться с нагрева с помощью электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в термобарьерах "b". В экспериментах на ряде пробкотронов (ELMO, SM-1, STM) наблюдалась макроскопическая устойчивость электронных популяций, в том числе дискообразных, при их накоплении ЭЦР-нагревом до

высоких значений $\beta \sim 1$. Поэтому можно надеяться накапливать популяции горячих электронов в термобарьерах с β выше критического значения по МГД-стабилизации стенками без дополнительных способов стабилизации. Затем в амбиполярных барьерах "р" накапливаются горячие ионы атомарной инжекции и производится ЭЦР-нагрев электронов. Одновременно включается откачка ионов из термобарьеров. В результате в двойных пробкотронах получаем МГД-устойчивую плазму с начальными удерживающими барьерами.

После этого в соленоиде производится накопление и нагрев D–T плазмы. Нагрев этой плазмы может осуществляться вводом в нее мощности ~ 2 MW в течение ~ 100 s любым подходящим способом. В начале накопления макроскопическая устойчивость плазмы в соленоиде поддерживается МГД-стабилизированными концевыми пробкотронами. После нагрева до термоядерной температуры и достижения $\beta \approx 0.8$ D–T плазма в соленоиде становится МГД-устойчивой, в концевых пробкотронах устанавливаются стационарные удерживающие барьеры. По мере зажигания D–T плазмы в соленоиде ее стартовый нагрев прекращается.

В качестве предыдущего шага предлагается построить прототип с высокотемпературной плазмой — установку ППУ. Для уменьшения стоимости такой установки можно убавить диаметр плазмы в соленоиде до 1 m и понизить ее температуру. Общая длина ППУ будет около 30 m с центральным соленоидом длиной 12 m. Общий вес сверхпроводящих катушек с бондажными шайбами будет около 50 t. Мощность, поглощаемая в концевых пробкотронах, снизится до ~ 30 MW.

На установке ППУ должны быть экспериментально решены основные физические проблемы: откачка ионов из термобарьеров и подавление неустойчивостей пролетных ионов в концевых пробкотронах. Захваченные в термобарьеры основные ионы (D^+ и T^+ в реакторе) должны и могут быть откачаны обратно в соленоид вдоль магнитного поля [4]. Одной из возможностей реализации обратной продольной откачки захваченных ионов является возбуждение их продольных колебаний на параметрических резонаторах. Это может быть осуществлено с помощью коаксиальных витков с относительно небольшим переменным током, расположенных в окрестности средней плоскости "b". Примесные ионы могут удаляться из термобарьеров резонансными

низкочастотными поперечными магнитными полями по радиусу в гало на поверхности плазмы. Плотность плазмы в термобарьерах "b" и в амбиполярных барьерах "p" должна быть снижена до необходимой величины. Также должна быть отработана технология изготовления компактных сверхпроводящих пробочных катушек, создающих магнитные поля до 14 Т. Эксперименты на установке ППУ будут иметь решающее значение.

В качестве первого шага в рамках проекта ППУ следует провести ряд относительно недорогих экспериментов, например: МГД-стабилизация плазмы с высоким $\beta \sim 1$ в осесимметричной геометрии; исследование устойчивости пролетных ионов в глубоком пробкотроне с продольной откачкой захваченных ионов; ЭЦР-нагрев электронов плазмы в пробкотроне до высокого β пробкотрона.

Успешное проведение экспериментов на установке ТПУ откроет путь для реализации слаборадиоактивного D-³He термоядерного амбиполярного реактора. Для создания D-T реактора ($Q \sim 20$) потребуется увеличить длину центрального соленоида до $100 \div 150$ м [5].

В принятых двойных концевых пробкотронах основная часть мощности затрачивается на ЭЦР-нагрев электронов в термобарьерах. Существует возможность создавать термобарьеры пролетными ионами самопроизвольно без ЭЦР-нагрева электронов в термобарьерных пробкотронах. В этом случае в средней плоскости "b":

$$\frac{n_{beth}}{n_s} \sqrt{\ln \frac{n_s}{n_{beth}}} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{n_{bitr}}{n_{bipas}} \right) \left(1 + \frac{b_{bepas}}{n_{beth}} \right)^{-1} \frac{1}{R_{mb}},$$

где n_{eth} и n_{epas} — плотности термических и пролетных электронов, n_{itr} и n_{ipas} — плотности захваченных и пролетных ионов, R_{mb} — отношение магнитного поля во входной пробке "b" (B_m) к полю в термобарьере "b". При $B_m \sim 20$ Т возможно достичь $R_{mb} \sim 30$. В результате устанавливается очень низкая плотность n_{beth} и соответственно относительно большая глубина термобарьера $\varphi = T_s \ln(n_s/n_{beth})$. По оценкам в этом случае поглощение энергии в двойных концевых пробкотронах понижается в два раза по сравнению с поглощением энергии в приведенных выше концевых пробкотронах установки ТПУ. Сверхпроводящие входные катушки, возбуждающие магнитные поля до 20 Т, могут быть созданы, однако, они будут достаточно дорогими.

Список литературы

- [1] *Baldwin D.E., Logan B.G.* // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. N 18. P. 1318–1321.
- [2] *Berk H.L., Wong H.V., Tsang K.T.* // Phys. Fluids. 1987. V. 30. N 9. P. 2681–2693.
- [3] *Li Xing-Zhong, Kesner J., LoDestro L.L.* // Nucl. Fusion. 1987. V. 27. N 8. P. 1259–1266.
- [4] *Димов Г.И.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 10. С. 883–908.
- [5] *Dimov G.I.* // Transactions of Fusion technology. 1999. V. 35. N 1T. P. 10–19.