

04; 10

© 1993

К ВОПРОСУ О ПОПЕРЕЧНОЙ ОТКАЧКЕ ИОНОВ  
ИЗ ПРОБКТОРНА ВНЕШНИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ  
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В.И. Х в е с ю к, Н.В. Ш а б р о в

Анализ показывает, что для обеспечения высокой эффективности стационарных магнитных реакторов синтеза необходимо сочетание хорошего удержания плазмы с возможностью селективной откачки отдельных популяций частиц (тяжелых примесей, продуктов реакций синтеза, ионов из термобарьера амбиполярного реактора и т.д.). Особую важность проблема откачки может приобрести в связи с разработкой малорадиоактивных реакторов синтеза на  $D^3He$  топливе. Оценки показывают [1], что требуемая эффективность такого устройства может быть достигнута только при использовании экономичной системы откачки, обеспечивающей высокую поперечную диффузию  $\alpha$ -частиц.

Для откачки ионов из открытых магнитных систем были предложены различные методы [2-4], однако каждому из них присущи определенные недостатки. Это либо неприемлемо высокие затраты мощности, либо большие сопутствующие потери электронов, либо необходимость использования квадрупольной геометрии магнитной системы.

В данной работе обсуждается новый вариант откачки ионов из аксиально-симметричной ловушки. Исходный принцип метода - тот же, что и в работе [4]. Это создание внешнего возмущения, которое периодически изменяется с частотой, равной азимутальной дрейфовой частоте откачиваемых частиц. Основное отличие от [4] заключается в используемом виде возмущающего магнитного поля и способе его наложения. Благодаря этим отличиям удастся реализовать данный метод откачки в аксиально-симметричных системах и добиться существенных деформаций дрейфовых поверхностей частиц при относительно небольших значениях возмущающего магнитного поля ( $\leq 1\%$  величины основного поля).

Механизм радиальной откачки ионов из аксиально-симметричной открытой ловушки базируется на двух основных положениях. 1) Создание малого возмущающего магнитного поля, вносящего слабую асимметрию в основное поле пробкотрона. 2) Вращение возмущающего поля вокруг оси системы с частотой  $\omega^*$ , равной  $\omega_d$  - частоте азимутального дрейфа откачиваемых частиц. Это обеспечивает резонансное воздействие возмущения и жесткую селекцию частиц, подверженных этому воздействию. Поскольку скорости дрейфа ионов и электронов направлены в разные стороны, данный метод обеспечивает откачку только ионной компоненты.

В качестве возмущающей системы предлагается магнитная катушка, обмотки которой выполнены в виде сегментов кольца и стационарно расположены вокруг шнура плазмы (рис. 1). Несимметричная неоднородность возмущающего поля обеспечивается различными величинами токов в сегментах (например, постепенно уменьшающимися от сегмента с максимальным током  $I_{max}$  до диаметрально противоположного ему сегмента с минимальным током  $I_{min}$ ), а эффект вращения создается за счет программируемого последовательного переключения обмоток.

Возмущающее поле нарушает аксиальную симметрию. В результате появляется ненулевая радиальная составляющая вектора скорости дрейфа. За один пролет ловушки ведущий центр частицы может сместиться в радиальном направлении на расстояние  $\Delta r$ . Направление смещения зависит от положения частицы в поле возмущения. Частицы с углом  $\delta > 0$  ( $\delta$  — угол между лучами, направленными из центра системы на сегмент с  $I_{max}$  и на ведущий центр частицы) будут испытывать смещение от оси системы, частицы с углом  $\delta < 0$  — к оси. Такое смещение по радиусу будет особенно эффективно для частиц, имеющих резонансное совпадение собственных угловых частот азимутального дрейфа  $W_d$  с частотой вращения возмущения  $W^*$ . Пролет за пролетом при этом накапливается радиальное смещение от первоначальной дрейфовой поверхности. По мере развития процесса меняется собственная частота дрейфа частицы, зависящая от радиуса. Резонанс нарушается, возникает рассогласование между  $W_d$  и  $W^*$  и изменение  $r$  — радиального положения ведущего центра прекращается. Подробный анализ данного процесса, представляющего собой типичный пример нелинейного резонанса [5], показывает, что изменения  $r$  имеют характер устойчивых ограниченных колебаний вокруг резонансного значения  $r = r^*$ , при котором  $W_d(r^*)$  в точности равна  $W^*$ . Величина угла  $\delta$ , определяющего положение частицы относительно возмущения, также испытывает регулярные колебания. Весь процесс наглядно иллюстрирует фазовый портрет изменений значений  $r$  и  $\delta$ , фиксируемых в момент прохождения частицей среднего сечения ловушки (рис. 2).

При одновременном воздействии двух или нескольких возмущений, вращающихся с разными частотами  $W_k^*$ , изменения  $r$  приобретают более сложный характер. Изменения  $r$  выглядят случайными, хотя и однозначно детерминированы начальными условиями. Если частоты возмущений выбраны достаточно близкими и их сепаратрисы пересекаются [6], то это ведет к образованию для резонансных частиц стохастического (по  $r$ ) слоя, охватывающего резонансные значения  $r_k^*$ . Характерной особенностью этого слоя является то, что изменения  $r$  для частиц, находящихся в нем, возможны по всей ширине слоя  $\Delta R_s$ . Частица, резонансная первоначально с одним из возмущений, под их совместным влиянием смещается по  $r$ , подхватывается другим возмущением и входит в резонанс с ним и т.д. Строго детерминированное движение выглядят как хаотическое блуждание частицы между резонансами.

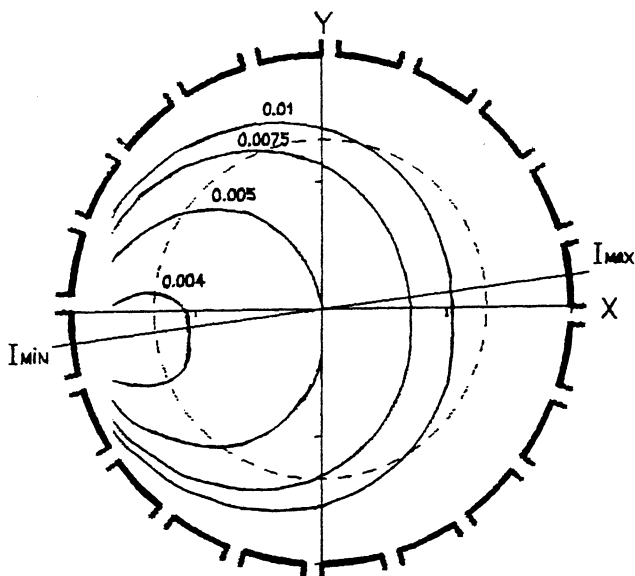


Рис. 1. Схема секционированной возмущающей катушки и линии уровня возмущающего магнитного поля в Тл. Пунктиром показан шнур плазмы ( $I_{max} = 10^4$  А,  $I_{min} = 0$ , радиус катушки 1.2 м, количество сегментов 20).

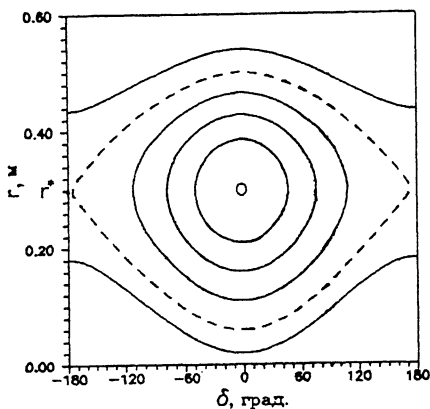


Рис. 2. Фазовый „портрет“ отображения движения ведущего центра частицы в магнитном поле пробкотрона с возмущением на среднее сечение ловушки (по результатам численного решения точного уравнения движения). Пунктиром показана сепаратриса. Параметры частицы: энергия протона - 60 кэВ, питч угол  $\theta = 89^\circ$ . Параметры пробкотрона:  $B_0 = 5$  Тл,  $L = 2$  м,  $B = B_0(1 + z^2/L^2 - r^2/2L^2)$ . Параметры возмущения:  $I_{max} = 10^4$  А,  $I_{min} = 0$ ; радиус катушки - 1.2 м; количество сегментов - 20,  $\omega^* = 3000$  рад/с,  $z = 0$ .

Частицы, далекие от резонанса и располагающиеся за пределами слоя, испытывают лишь слабое (по сравнению с  $\Delta R_s$ ) „дрожание“ дрейфовой поверхности.

Предложенный метод воздействия может привести к существенному увеличению поперечных потерь для резонансных частиц. При этом возможны два механизма потерь: столкновительный и бесстолкновительный.

Из-за деформации дрейфовых поверхностей частиц в результате воздействия возмущения может иметь место радиальная диффузия неоклассического характера [7] с коэффициентом диффузии  $D \sim \Delta R^2 / \tau_{col}$  ( $\tau_{col}$  – время электрон-ионных столкновений,  $\Delta R$  – характерный размер этой деформации). В результате столкновения частица „забывает“ свое прежнее движение и может случайным образом переместиться с одной фазовой кривой на другую (рис. 2). Величина такого „перескока“  $\Delta R$  может достигать максимального размаха колебаний  $\gamma$ . Аналогичные „перескоки“ возможны и при воздействии нескольких возмущений, причем тогда для резонансных частиц  $\Delta R$  может достигать значения  $\Delta R_s$ . Величины  $\Delta R$  существенно превышают ларморовский радиус электрона. Это обстоятельство и должно обеспечить усиленный поперечный перенос. В наибольшей степени ему будут подвержены резонансные частицы.

Другой возможный механизм наведенных поперечных потерь – бесстолкновительный. Частица под влиянием внешнего возмущения может достичь такой радиальной координаты  $R_{lim}$ , что либо попадает на лимитер, либо будет потеряна из ловушки через пробки из-за уменьшения амбиполярного потенциала на большом удалении от оси. Для резонансных частиц этот процесс имеет место, если значение  $R_{lim}$  находится ниже верхней границы стохастического слоя (или сепаратрисы фазовых кривых в случае воздействия одного возмущения). Характерные времена радиальных „блужданий“ частицы определяются параметрами возмущений и могут быть значительно меньше  $\tau_{col}$ . Бесстолкновительный механизм может существенно увеличить наведенные потери резонансных частиц.

Предложенный метод может послужить основой для откачки ионов из термобарьера, а также шлаков и примесей из амбиполярного реактора. Представляет интерес анализ перспектив использования данного метода откачки ионов для широкого спектра различных магнитных конфигураций, в частности – токамаков, плазменных технологических установок.

Авторы выражают признательность И.Н. Головину за постоянное внимание и плодотворные обсуждения основных положений данной работы.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G o l o v i n I.N. et al. // Proc. Workshop on D<sup>3</sup>He based reactor studies. Moscow, 1991.

- [2] H a m i l t o n G.W., L o g a n B.G. // Com-  
ments on plasma phys. 1981. V. 6. N 4. P. 139-  
145.
- [3] L o g a n B.G. // Proc. Intern. School of Plasma  
Phys. Workshop. Varenna, 1983. V. 1. P. 125-142.
- [4] B a l d w i n D.E., B e y r s J.A., C h e n Y.J.,  
K a i s e r T.B. // Intern. Conf. on Plasma Phys.  
and Control. Nucl. Fus. Res. Kioto, 1986. P. 293-  
303.
- [5] З а с л а в с к и й Г.М., С а г д е е в Р.Х. Введение в не-  
линейную физику. От маятника до нелинейности и хаоса. М.,  
1988. 386 с.
- [6] Л и х т е н б е р г А., Л и б е р м а н М. Регулярная и  
стохастическая динамика. М., 1984. 528 с.
- [7] Р ю т о в Д.Д., С т у п а к о в Г.В. Процессы переноса в  
аксиальнонесимметричных открытых ловушках. В сб.: Вопросы  
теории плазмы. / Под ред. Б.Б. Кадомцева. В. 13, М., 1984.  
С. 74-159.

Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана

Поступило в Редакцию  
18 декабря 1992 г.