

УПРАВЛЯЕМАЯ СТОХАСТИЗАЦИЯ ЗАПЕРТЫХ ЧАСТИЦ В ТОКАМАКЕ

© А.Н.Лятов, Н.В.Шабров

В современной концепции реактора-токамака важное место отводится созданию диверторной конфигурации, предназначенной для очистки плазмы от шлаков. Особую актуальность приобретает вопрос очистки плазмы для системы, использующей с качестве топлива смесь дейтерия и гелия-3 [1].

Ранее был предложен принцип селективного удаления ионов из замагниченной плазмы и его реализация для аксиально-симметричной магнитной ловушки [2-4]. Ниже показано, что предложенный принцип может, с соответствующими изменениями, учитывающими особенности тороидальной магнитной конфигурации, быть использован для селективного удаления ионов из плазмы токамака.

В основе метода лежит индуцированная селективная стохастизация движения частиц, находящихся в определенном энергетическом диапазоне. Стохастизация вызывается воздействием слабых внешних переменных магнитных полей, и приводит к бесстолкновительной диффузии по радиусу. Частота возмущения выбирается близкой к частоте градиентного дрейфа частицы в криволинейном магнитном поле токамака. Рассматривалось воздействие возмущения на частицы с "банановыми" траекториями. Возмущающее магнитное поле представляет собой многомодовую волну, бегущую вдоль внешнего обвода тора со скоростью, равной скорости тороидального дрейфа банановых частиц.

Исходя из анализа уравнения дрейфа частицы в совместном поле токамака и внешнего возмущения, была получена следующая система уравнений, описывающая динамику частицы:

$$\frac{dx}{dt} = C_1 \sin(\alpha) + C_2 \sin(\alpha + [\omega_2 - \omega_1] \cdot t) + \dots + C_n \sin(\alpha + [\omega_n - \omega_1] \cdot t)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = A x. \quad (1)$$

Здесь α — угол между направлением на ведущий центр частицы и вращающимся возмущением; ω_i — частота вращения i -го возмущения; $x = r - r_1$ — расстояние между резонансной поверхностью (на которой частота дрейфа ба-

на на равна частоте внешнего возмущающего поля) и ведущим центром частицы. Каждому значению ω_i соответствует некоторое резонансное значение малого радиуса: $\omega_{\text{дрейфа}}(\tau_i) = \omega_i$.

Таким образом, в первом приближении, модель движения частицы сводится к уравнению для нелинейного маятника, возмущаемого внешней периодической силой. Наличие ряда частот создает цепочку резонансов, соответствующих различным значениям малого радиуса тора. Реализовав условие перекрытия резонансов (расстояние между резонансами меньше, чем их ширина) можно перевести частицу в режим бесстолкновительной стохастической диффузии. В этом случае образуется общий стохастический слой, и частица получает возможность свободно перемещаться по радиусу в диапазоне $r_1 \leq r \leq r_n$ [5]. Если принять, что все возмущения равны по абсолютной величине и что сдвиг по частоте $\omega_{i+1} - \omega_i = \Delta\omega = \text{const}$, то можно получить следующее аналитическое выражение для коэффициента радиальной диффузии:

$$D_r = \pi \frac{C^2}{\Delta\omega}; \quad (2)$$

здесь $C = \frac{mc}{Ze} \left(\nu_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} \nu_{\perp}^2 \right) \frac{B^*}{B_0^2 R_p}$, B_0 — основное магнитное поле; B^* — величина поля возмущения; R_p — величина смещения возмущающей системы по вертикали; m и Ze — масса и заряд удаляемой частицы.

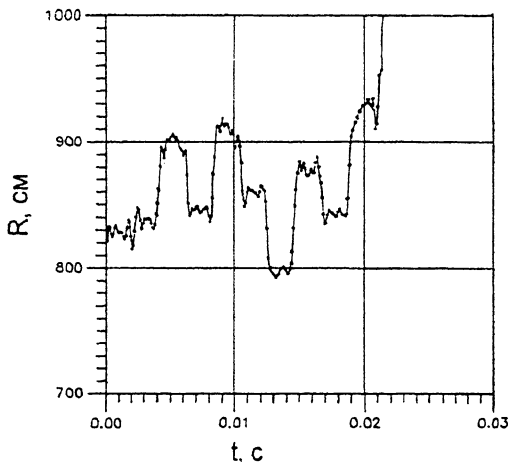
Отметим следующие свойства процесса:

а) время удаления определяется коэффициентом диффузии (2);

б) задача селективного удаления протонов и альфа-частиц решается благодаря большой разнице их средней энергии и температуры горючего;

в) диапазон энергий удаляемых ионов $E_{\min} \dots E_{\max}$ определяется разностью частот возмущающего магнитного поля $\omega_n - \omega_1$; нижняя граница этого интервала E_{\min} должна быть больше температуры ионов топлива, чтобы воздействие возмущения не оказывало существенного влияния на их динамику; значение E_{\max} должно быть существенно меньше энергии рождения продуктов синтеза, чтобы они за время торможения успели передать основную долю своей энергии плазме. С другой стороны, ширина диапазона должна быть достаточной для обеспечения эффективной откачки шлаков.

Численные результаты расчетов как по уравнениям (1), так и по точной модели движения частицы показывают возможность селективного удаления частицы из токамака. На



Пример изменений радиального положения “банановой” орбиты откачиваемой частицы во времени в случае воздействия 8 возмущений с $B^* = 0.03$ Тл, $B_0 = 12$ Тл.

рисунке показаны изменения во времени радиальной координаты ведущего центра при воздействии многомодового возмущения. Видно, что движение по радиусу приобретает стохастический характер. Задача откачки шлаков сводится к созданию стохастического слоя, перекрывающего расстояние до лимитера. Для параметров токамака ARIES-III при использовании 8 возмущений и суммарном поле возмущения $\Sigma B^* \approx 0.24T \approx 0.02\%$ от основного поля коэффициент радиальной стохастической диффузии составит $D_r \approx 34 \text{ м}^2/\text{с}$. Соответствующее характерное время радиальных потерь будет $\tau \approx 0.03$ с, что позволит обеспечить эффективную откачку. Полученные значения на порядок выше коэффициентов диффузии, связанных с гофрировкой [6].

Анализ результатов показывает:

- а) принципиальную возможность удаления ионов из плазмы токамака в бесстолкновительном режиме;
- б) возможность селекции по сортам частиц;
- в) возможность удаления частиц выбранного сорта из жестко заданного энергетического диапазона.

Данная работа была выполнена по гранту международного научного фонда J5Y100.

Список литературы

- [1] *Santarius J.F.* // Proc. Workshop on D-3He based reactor studies, KAEI, Moscow, 1991, 1. A3.
- [2] *Хвесьюк В.И., Шабров Н.В.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 1. С. 42-46.
- [3] *Shabrov N.V., Khvesyuk V.I., Lyakhov A.N.* // Proc. of Intern. Conf. on Open Plasma Confinement Systems for Fusion, Novosibirsk, Russia, June 14-18 1993, p. 231. World Scientific Publishing, Singapore (1994).
- [4] *Shabrov N.V., Khvesyuk V.I.* // Fusion Technology. 1994. V. 26. N 2.
- [5] *Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.* Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 386 с.
- [6] *Yushmanov P.N.* // Nuclear Fusion. 1983. V. 23. N 12. P. 1599.

Поступило в Редакцию
30 мая 1996 г.
