

- [3] Yoshikawa S. // Ядерный синтез. Т. 13. № 3. С. 433-450.
- [4] Зыков В.Г. Свойства полоидального гелиотрона. Препринт ХФТИ 79-12. Харьков, 1979. С. 44.
- [5] Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1962. Т. 32. В. 3, С. 261, С. 777; ЖТФ. 1962. Т. 32. В. 7. С. 777.
- [6] Peregoud B.P., Lehner B. // Nucl. Just. Meth. V. 180. 1981. P. 357.
- [7] Биологический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1986. С. 362.
- [8] Виргильев Ю.С. и др. Исследование физико-химических, механических и вакуумных свойств углесталла. Препринт ИАЭ № 3248/8. 1980. С. 32.
- [9] Мани Л. Транспорт, энергетика и будущее. М.: Мир, 1987. С. 155.

Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова,
Москва

Поступило в Редакцию
24 января 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 15

12 августа 1990 г.

04

© 1990

ДИФФУЗИОННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЛОВУШКИ С $\beta = 1$

А.И. Морозов

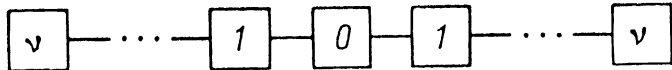
К прямым неадиабатическим ловушкам относятся „пролетотрон“ (ПТ) [1, 2] и „длинная адиабатическая ловушка“ (ДАЛ) [3, 4], „газодинамическая ловушка“ (ГДЛ) [5, 6]. Время жизни частиц в них при условии вытекания через оба конца выражается формулой

$$\tau = \theta \frac{L}{2V_T} \xi, \quad (1)$$

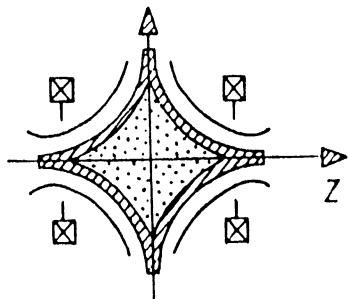
где ξ - коэффициент замедления, равный соответственно

$$\xi_{ПТ} = 1, \quad \xi_{ДАЛ} = \frac{a}{\rho_i^M}, \quad \xi_{ГДЛ} = \frac{H_M}{H_0}. \quad (2)$$

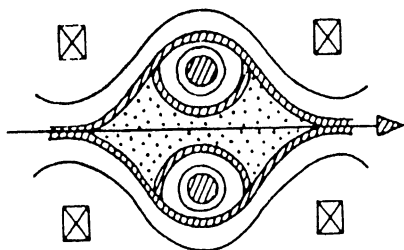
Здесь θ - фактор ~ 1 , зависящий от особенностей ловушки, L - ее длина, a - радиус „основной“ части ловушки (ниже предполагается, что $L \gg a$). V_T - тепловая скорость ионов, ρ_i^M , H_M - ларморовский радиус и магнитное поле в щели (пробке), H_0 - магнитное поле в основной части ловушки.



а



б



в

Рис. 1. Д - ловушка, а - схема Д-ловушки, б - антипробкотрон, в - СА-ячейка.

Для получения времен удержания, удовлетворяющих критерий Арцимовича-Лоусона, эти ловушки должны иметь большую длину. Однако можно предложить схемы неадиабатических ловушек, в которых нужное время жизни получается при существенно меньших длинах. С этой целью воспользуемся принципом диффузионных ловушек, ("Д-ловушек"), сформулированных автором в конце 50-х годов и реализованного в конце 60-х годов в виде ловушки ЭСПЛ [7, 8]. Основу Д-ловушки составляют "стахастизирующие ячейки" ("С-ячейки")-ловушки, имеющие два торцевых входа (выхода) и обладающие тем свойством, что частица, попадающая в С-ячейку через любой из входов, "забывает" место входа и с равной вероятностью может выйти через любой из двух торцов. В результате, время жизни частиц в цепочке из $\mu = 2\nu + 1$ ячейки (рис. 1, а) будет при $\nu \gg 1$

$$\bar{\tau} \approx \bar{\tau}_0 \nu^2.$$

(3)

Здесь τ_0 - время жизни в С-ячейки. Такую цепочку мы и будем называть Д-ловушкой (рис. 1, а).

Обычные антипробочные ловушки (рис. 1, б), будучи стохастизирующими, из-за радиальной щели не являются С-ячейками. Однако, используя "плавающие" в плазме твердотельные витки с током (назовем их "миксинами" (рис. 1, в - М) [9]) можно создать С-ячейки с $\beta = 1$. Такая ячейка, напоминающая Астрон (СА-ячейка), изображена на рис. 1, в.

Время жизни частицы в СА-ячейке длиной L , равно

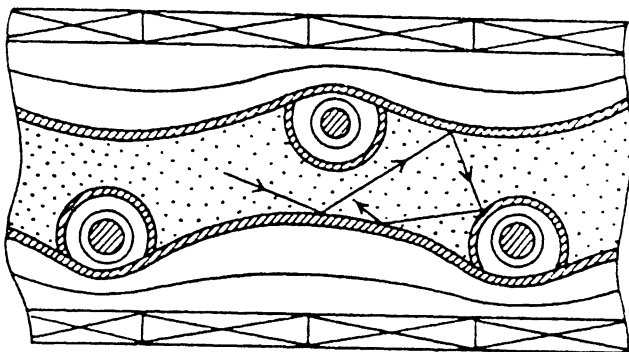


Рис. 2. Схема ловушки „Гега“.

$$\tau_1 = \frac{\theta_{CA}}{2} \frac{L_1}{V_T} \frac{a}{\rho_i^M} \quad (4)$$

Следовательно, в цепочке из $2\nu + 1$ ячеек (назовем эту ловушку сокращенно ДАГ¹) время жизни частицы

$$\tau_{ДАГ}^\nu = \frac{\theta_{ДАГ}}{2} \frac{L_1}{V_T} \frac{a}{\rho_i^M} \nu^2 = \left(\frac{\theta_{ДАГ}}{2} L_K \frac{a}{\rho_i^M} \right) \nu \quad (5)$$

Здесь L_K — длина концевой „запирающей“ цепочки. Общая же длина ловушки $L = L_0 + 2L_K$. Величина L_0 — длина рабочей части ловушки в существенной степени произвольна.

Заметим, что в отличие от ловушки Будкера-Рютова „ГОЛ“ [10, 11], блуждание в ДАГ вызвано не столкновениями частиц, а как в ЭСПЛ — конфигурацией полей.

Величину ν , а точнее $\tau_{ДАГ}$, в (5) нельзя неограниченно увеличивать, так как при этом увеличивается число столкновений в переходном слое плазма-поле, наличие которых приводит к захвату ионов магнитным полем. После захвата частица либо покидает ловушку, либо оказывается запертой между пробками. Если пренебречь последней группой частиц, то „истинное“ время жизни частиц $\tau_{ДАГ}$ определяется формулой

$$\frac{1}{\tau_{ДАГ}^*} = \frac{1}{\tau_{ДАГ}^\nu} + \frac{V_1}{V_0} \frac{1}{\tau_{СТ}} \quad (6)$$

Здесь V_1 — объем переходного слоя $\frac{V_1}{V_0} \sim \frac{\rho_i}{a}$, $\tau_{СТ}$ — время кулоновских столкновений. Учитывая, что в реакторе $\tau_E / \tau_{СТ} \sim 0.1$, видно, что если $\rho_i / a \ll 0.1$, то оценка (5) разумна.

¹ Все разновидности ловушек с погруженными в плазму токонесящими витками мы предполагаем называть „галатееями“. ДАГ — диффузионная астрон-галатеея.

Наряду с ДАГ представляет определенный интерес и другая схема Д-ловушки, которую можно рассматривать как „кнудсеновский“ вариант пролетотрона². Предлагаемая ловушка представляет собой соленоид длиной L , в которой вставлена спираль с током, „уничтожающим“ поле в окрестности оси ловушки (рис. 2). Если система не обладает симметрией (спираль в должной степени смята), то движение немагнитных частиц будет носить, вообще говоря, случайный характер и время жизни частиц в этой ловушке будет равно

$$\tau_{\text{ГГ}} = \theta_{\text{ГГ}} \frac{L}{2V_T} \left(\frac{L}{2a} \right). \quad (7)$$

Здесь a – характерный поперечный размер плазменного шнура. Сравнивая ϵ (1) и (2), мы видим, что эта ловушка, назовем ее „Геликон-Галатеей“ („Гега“) имеет очень большой коэффициент замедления:

$$\xi = \frac{L}{2a}, \quad (8)$$

который может достигать многих сотен и тысяч.

Как видно, мы не ставили перед собой задачи специального, хотя бы частичного, „запирания торцов“ в Д-ловушках. В принципе, в ДАГ и в СА-ячейках можно попытаться запереть плазму, например, приводя ее во вращение подобно [13]. В свою очередь, в ГЕГЕ продольный уход можно будет, по-видимому, также существенно ослабить, следуя схеме Скорнякова-Перегуда, реализованной в „Торнадо“ [17, 18]. Разумеется, запирание торцов будет вести к размыванию периферического слоя плазма-поле.

Пользуясь случаем, благодарю Ю.В. Скворцова и его коллег за обстоятельные обсуждения затронутых здесь вопросов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Морозов А.И. Ядерный синтез. Специальное приложение, т. 2, Вена, 1969. С. 111–120.
- [2] Брушлинский К.В., Морозов А.И., Савельев В.В. Численное моделирование стационарного течения плазмы в пролетотроне. Препринт ИПМ № 103, 1982. 21 с.
- [3] Алипчаннов В.М., Васильев В.И., Конкашбаев И.К. Препринт ИАЭ № 2753. М., 1976. 16 с.
- [4] Конкашбаев И.К., Ландман И.С., Улинин Ф.Р. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 8. С. 1007–1620.

² Эта идея напоминает идею Така [12], но у нас магнитное поле стационарно.

- [5] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖТФ. Т. 5. 1979. С. 678.
- [6] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Газодинамическая ловушка. Итоги науки и техники. Серия физика плазмы. Т. 8. М., 1988. С. 77-130.
- [7] Морозов А.И., Жуков В.В. Тез. 1 Всес. конф. по плазменным ускорителям. М., 1971. (см. Плазменные ускорители, М.: Машиностроение, 1973. С. 14, с. 83.
- [8] Морозов А.И., Жуков В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 6. С. 373-375.
- [9] Биологический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1986. 362 с.
- [10] Будкер Г.И. Собрание трудов. М.: Наука, 1982. 575 с.
- [11] Рютов Д.Д., Ступаков Г.В. Процессы переноса в аксиально-несимметричных открытых ловушках. Вопросы теории плазмы. 1984. В. 13. С. 52-73.
- [12] Туск J.L. Ibid. P.595.
- [13] Волосов В.И., Пальчиков В.Е., Цельник Ф.А. // ДАН. 1968. Т. 181. № 3. С. 575-576.
- [14] Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1962. Т. 32. В. 3. С.261; Ч. 11. Т. 32. В. 7. С. 777.
- [15] P e r e g o o d В.Р., L e h n s t В. // Nucl. Just. Meth. 1981. V. 180. P. 357.

Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова,
Москва

Поступило в Редакцию
24 января 1990 г.