

Письма в ЖЭТФ, том 14, стр. 184—187.

5 августа 1971 г.

**О ВЛИЯНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОРОИДАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЗАПИРАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ**

*P. A. Демирханов, M. A. Стомланд, Ш. В. Хиль,
Д. Г. Баратов*

В последнее время появился ряд теоретических работ [1—3], посвященных влиянию постоянного продольного электрического поля на движение частиц и процессы переноса плазмы в замкнутых магнитных ловушках. Представляет также интерес изучение влияния высокочастотного (ВЧ) электрического поля на движение заряженных частиц в магнитных ловушках в связи с возможным применением ВЧ электрического поля для уменьшения неоклассической диффузии слабостолкновительной плазмы [4] и стабилизации неустойчивости [4—6]. В данной работе обращается внимание на то, что присущая замкнутым ловушкам тороидальная неоднородность продольного электрического поля в случае ВЧ электрического поля может приводить к увеличению "степени запертости" частиц и ухудшению их удержания.

Рассмотрим замкнутую ловушку с винтовым магнитным полем и продольным ВЧ электрическим полем $E = E_0 (1 - \epsilon \cos \phi) \sin \omega t$ (E и ω – амплитуда и частота изменения электрического поля, $\epsilon = r/R_0$ – тороидальное отношение, R_0 – большой радиус тора, ϕ – полярный угол в меридиональном сечении тора). Вследствие тороидальной неоднородности электрического поля возникает градиент его вдоль винтовой траектории частицы. Если амплитуда осцилляции частицы $qE_0/M\omega^2$ существенно меньше характерного размера изменения электрического поля вдоль траектории, на частицу действует дополнительная сила $F = -\nabla U$, связанная с ВЧ потенциалом $U = q^2 E^2 / 4M\omega^2$ [7], (q и M – заряд и масса частицы). В случае осесимметричного магнитного винтового поля $F = (q^2 E_0^2 \epsilon \sin \phi / 4\pi M \omega^2 R) \hat{e}$ (ϵ – угол вращательного преобразования магнитных силовых линий, \hat{e} – единичный вектор вдоль траектории). При $\omega \ll \omega_H = qB/cM$ магнитный момент частицы является адиабатическим инвариантом и условие запирания частицы определяется выражением

$$\frac{M}{2} (\bar{V}_1^2 - \frac{B_2^2}{B_1} \bar{V}_1^2) < \frac{q^2 (\hat{E}_1^2 - \hat{E}_2^2)}{4M\omega^2} \quad (1)$$

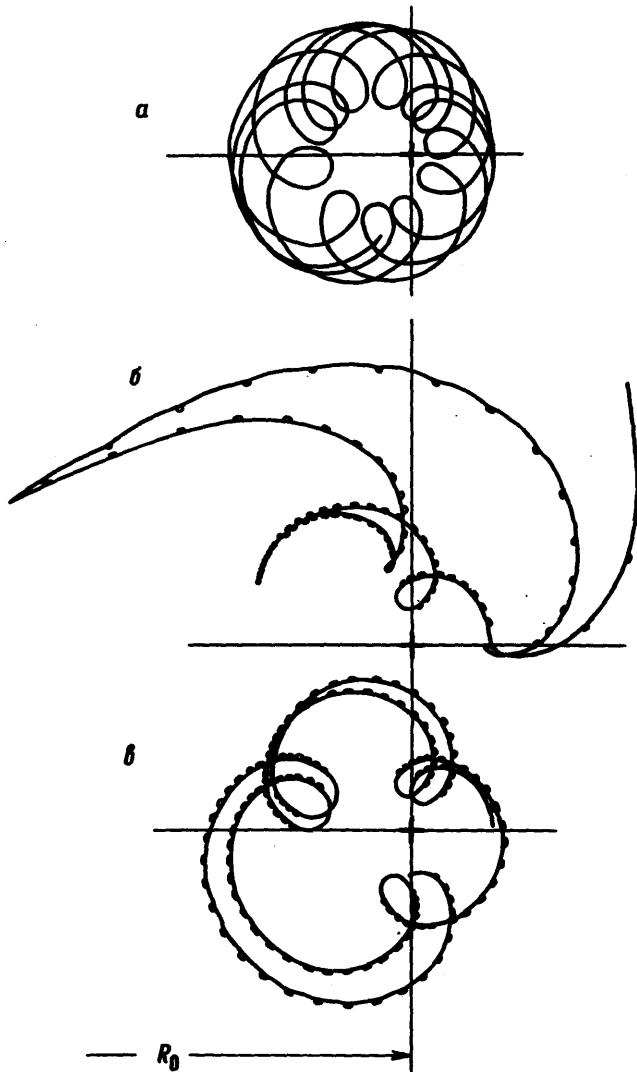
где \hat{E} – проекция напряженности электрического поля на траекторию частицы, B – напряженность магнитного поля, $\bar{V} = \sqrt{\bar{V}_{||}^2 + \bar{V}_\perp^2}$ – полная скорость частицы, усредненная по ВЧ колебаниям, индексы 1 и 2 соответствуют значениям величин в начальном положении частицы и в точке отражения. Из условия (1) может быть получено выражение для границы, разделяющей области запертых и пролетных частиц,

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \left[2\epsilon \left(1 + \frac{\tilde{V}^2}{\bar{V}_1^2} \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\tilde{V} = qE_0/\omega M$ – амплитуда осцилляторной скорости. Заметим, что при сохранении магнитного момента величина \bar{V}_\perp близка к величине по-перечной скорости V_\perp в отсутствие ВЧ поля и, следовательно, при $\tilde{V} \sim \bar{V}_\perp$ область запертых частиц в пространстве скоростей существенно расширяется по сравнению со случаем без ВЧ поля.

Приведенные соображения подтверждаются численным расчетом траекторий частиц в двухзаходном круговом стеллараторе, параметры которого соответствуют стелларатору РТ-2 [8]. Интегрировались уравнения движения частицы в дрейфовом приближении. Рассматривалось движение протонов, ларморовский радиус которых, определенный по полной начальной скорости, составлял 0,031 (в качестве единицы длины принят максимальный радиус сепараторы, равный 4,7 см). Исходные положения частицы выбирались в точках минимума магнитного поля. Тороидальное ВЧ электрическое поле, имеющее единственную компоненту, параллельную магнитной оси, задавалось в виде $E = E_0 (1 - \epsilon \cos \phi) \sin(\omega t + \phi)$. Выбранная частота изменения электрического поля $\omega = 1,26 \cdot 10^7 \text{ рад. сек}^{-1}$ удовлетворяла неравенству $\omega_B \ll \omega \ll \omega_H$, где ω_B – частота прохождения частицей периодов винтового магнитного поля. В расчете принимались три значения E_0 , соответствующие $\tilde{V}/V_0 = 0,065; 0,26; 0,65$. Диапазон начальных значений $V_{||}/V_0$ выбирался так, чтобы при $E_0 = 0$

охватить все группы частиц, различающихся видом траекторий — пролетные частицы и частицы, запертые в пробках торoidalного и винтового магнитных полей.



Проекции траекторий частиц с начальным значением $V_L/V_o = 0,9$ на меридиональную плоскость: *a* — траектория пролетной частицы в отсутствии ВЧ электрического поля; *b* — траектория частицы в присутствии торoidalного ВЧ электрического поля $V/V_o = 0,65$. Мелко-масштабная структура связана с дрейфом в скрещенных E и B полях; *c* — траектория частицы, полученная без учета торoidalности электрического поля $\tilde{V}/V_o = 0,65$.

Результаты расчета при $E_o = 0$ показывают, что граница запирания частиц определяется торoidalной неоднородностью магнитного поля и, следовательно, приведенные ниже результаты приложимы к случаю осесимметричного винтового поля, для которого получено выражение (2). Влияние ВЧ потенциала на траектории было очень слабым когда $V/V_o = 0,065$.

При $\tilde{V}/V_0 = 0,26$ влияние на траектории частиц оказывалось заметным, хотя область запирания частиц в пространстве скоростей осталась практически неизменной. При $\tilde{V}/V_0 = 0,65$ доля частиц, бывших в отсутствие ВЧ электрического поля пролетными (рис. 1, а), переходит в группу запертых. В этом случае заметно увеличивается область запирания частиц и новая граница ее удовлетворительно согласуется с выражением (2). Типичная траектория такой частицы приведена на рис. 1, б. Контрольный расчет, проведенный для частицы с теми же начальными условиями, но в случае однородного по сечению электрического поля показывает, что частица остается пролетной (рис. 1, в). Для частиц, пролетных в присутствии ВЧ поля, отклонение дрейфовых поверхностей от исходных магнитных поверхностей увеличивается по сравнению со случаем без ВЧ поля. Это связано, в основном, с увеличением времени обращения частицы вокруг магнитной оси. Особенно сильно ВЧ потенциал влияет на отклонение дрейфовых поверхностей пролетных частиц, близких к захвату. В соответствии с вышеприведенным, удержание частиц в ловушке ухудшается.

В заключение отметим, что при одинаковой энергии частиц, усредненной по периоду ВЧ поля, величина \tilde{V}/V_0 в случае электронов в $\sqrt{M_i/M_e}$ раз больше, чем для однозарядных ионов. Поэтому влияние ВЧ потенциала на запирание электронов может проявиться при относительно малых значениях напряженности электрического поля, характерных для плазменных экспериментов.

Авторы благодарны В.Г.Устюжанинову, проводившему расчеты на электронной вычислительной машине.

Поступила в редакцию
21 июня 1971 г.

Литература

- [1] A.A.Ware. Phys. Rev. Lett., 25, 15, 1970.
- [2] А.А.Галеев. ЖЭТФ, 59, 1378, 1970.
- [3] P.H.Rutherford, L.M.Kovrzhnikh, M.N.Rosenbluth, F.L.Hinton. Phys Rev. Lett., 25, 1090, 1970.
- [4] M.Dobrowolny, O.P.Pogutse. Phys. Rev. Lett., 25, 1608, 1970.
- [5] Р.А.Демирханов, Т.И.Гуткин, С.И.Лозовский. ЖЭТФ, 55, 2195, 1966.
- [6] Н.А.Бобырев, О.И.Федягин, ЖТФ, 33, 1187, 1963.
- [7] А.В.Гапонов, М.А.Миллер. ЖЭТФ, 34, 242, 1958.
- [8] Р.А.Демирханов, Д.Г.Баратов, Н.И.Малых, В.Г.Мережкин, М.А.Стотланд, Ю.Тен, Ш.В.Хиль. ЖЭТФ, 60, 569, 1971.