

Литература

[1] А. А. Ведынов, В. М. Лопухин. УФН, 53, 69, 1954. — [2] С. К. Birdsall, J. R. Whipper. J. Appl. Phys., 24, 314, 1953; С. К. Birdsall, G. R. Brewer, A. V. Haeff. PIRE, 47, 865, 1953. — [3] А. А. Коломенский. Атомная энергия, 77, 57, 1964. — [4] А. М. Стефановский. Ядерный синтез, 5, 215, 1965. — [5] В. П. Силин, А. А. Рухадзе. Электромагнитные свойства плазмы и плазмopodobных сред. Атомиздат, 1961. — [6] А. Б. Михайловский, Э. А. Пашицкий. Поверхностные волны в плазме с током. Препринт ИАЭ-800, 1965; ЖТФ, XXXV, 1960, 1965. — [7] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Гостехиздат, 1957.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
28 июня 1965 г.
В окончательной редакции
16 декабря 1965 г.

УДК 533.9

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИНЖЕКЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

В. И. Волосов, В. Е. Пальчиков и Ф. А. Цельник

Экспериментально исследовалась инжекция электронов в магнитную ловушку через пробку с нарастающим во времени магнитным полем.

При угловых размерах пучка электронов $\sim 10^\circ$ в ловушку захватывалось около 100% от инжектируемого тока.

Один из простейших методов инжекции заряженных частиц в магнитную ловушку [1] состоит в том, что через магнитную пробку ловушки под малым углом α_0 (α — угол между скоростью частицы v и плоскостью, перпендикулярной магнитному полю H) вводится пучок частиц. Если поле этой пробки (H_0) нарастает в течение всего времени инжекции до стационарного значения и угол α остается постоянным, то происходит эффективный захват частиц в ловушку.

Основная техническая задача при осуществлении этого метода связана с необходимостью поддержания постоянства угла α_0 с большой точностью при инжекции пучка частиц через область переменного магнитного поля. Для ее решения можно поместить инжектор частиц за магнитной пробкой вблизи оси ловушки. Поле в области инжектора (H_1) должно быть достаточно сильным и меняться пропорционально полю в пробке ($\frac{H_1}{H_0} = \text{const}$). Если пучок частиц выходит из инжектора под постоянным углом α_1 (что довольно легко выполнить при достаточно малых размерах инжектора по сравнению с ларморовским радиусом частиц), то за счет сохранения первого адиабатического инварианта остается постоянным и угол α_0

$$\cos \alpha_0 = \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} \cos \alpha_1. \quad (1)$$

В ловушку захватываются частицы, для которых $0 < \alpha_0 < \alpha_{0\text{max}}$

$$\alpha_{0\text{max}} = \sqrt{\frac{\Delta H_0}{H_0(t)}} = \sqrt{\frac{1}{H_0(t)} \frac{\partial H_0}{\partial t} T}, \quad (2)$$

где T — время возврата частицы к магнитной пробке; грубо $T = \frac{2L}{\bar{v}_\parallel}$; L — длина ловушки; \bar{v}_\parallel — средняя продольная скорость.

Угловые размеры этого пучка вблизи инжектора ($\Delta \alpha_1$) можно найти из (1) и (2). Так как $d\alpha_0$ и $d\alpha_1$ связаны выражением

$$d\alpha_1 = d\alpha_0 \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} \sqrt{\frac{H_1}{H_0}}, \quad (3)$$

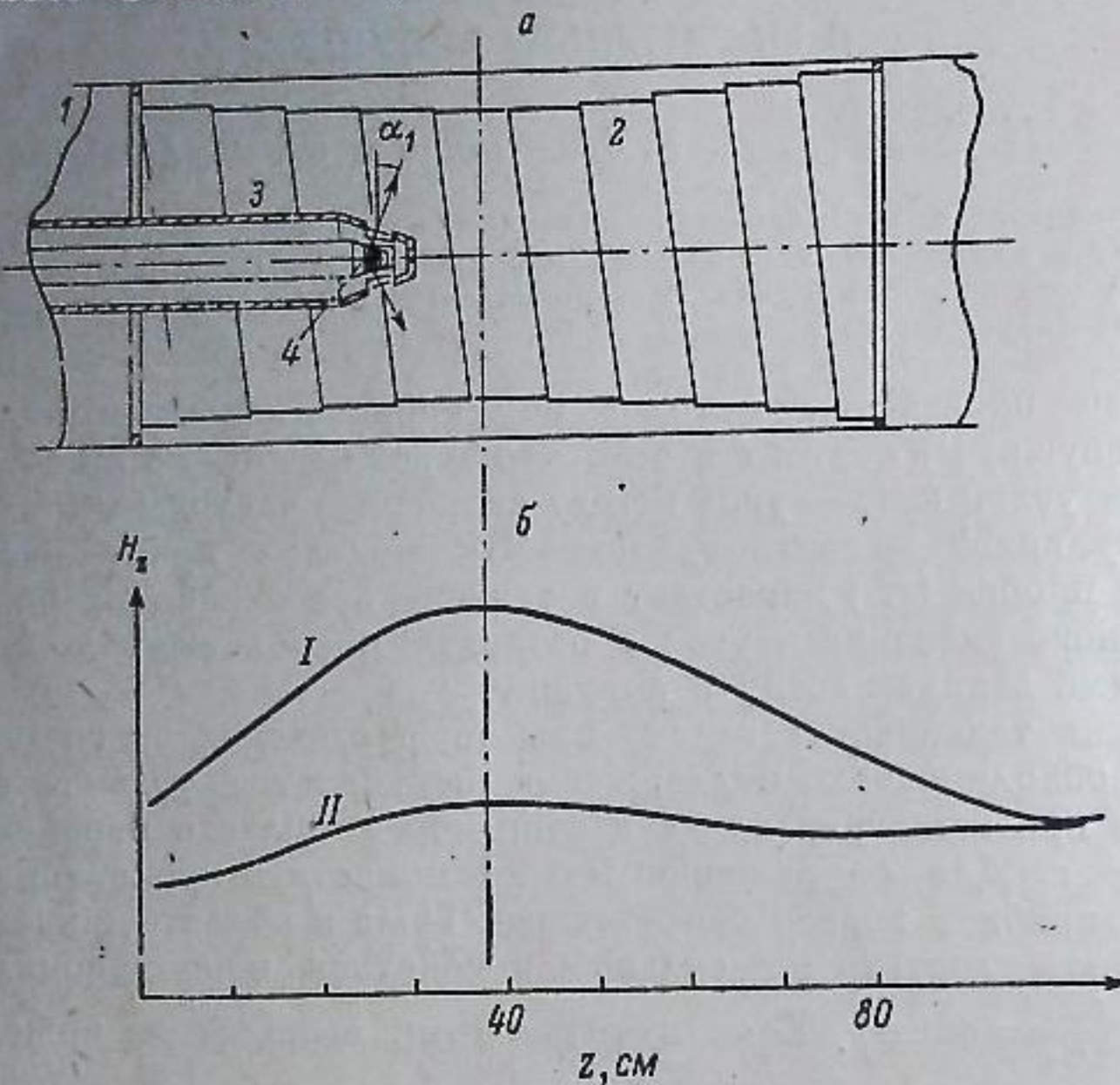
то, интегрируя (3) от 0 до $\alpha_{0\text{max}}$, получим (при $\alpha_0 \ll 1$)

$$\Delta \alpha_1 = \frac{\alpha_{0\text{max}}^2}{2 \operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (4)$$

Как следует из (4), для снижения требований к угловым размерам пучка возле инжектора ($\Delta \alpha_1$) выгодно располагать инжектор возможно

ближе к магнитной пробке (минимальное расстояние лимитируется размерами „ножа“ инжектора) и увеличивать $\alpha_{0\max}$, т. е. увеличивать $\frac{\partial H_0}{\partial t}$ и T .

На процесс захвата частиц оказывает влияние объемный заряд пучка, увеличивая его угловые размеры. На участке между инжектором и пробкой этот эффект уменьшает угловую плотность инжектируемого тока, что приводит к снижению эффективности захвата; однако при движении пучка за пробкой увеличение угловых размеров пучка улучшает захват. Объемный заряд может оказать существенное влияние



Схематический разрез установки (а) и профиль магнитного поля (б).

а: 1 — стенка камеры, 2 — однослойный импульсный соленоид, 3 — анод кольцевой электронной пушки, 4 — катод (вольфрамовая спираль); б: I — стационарное поле магнитной пробки, II — суммарное поле в начале импульса инжекции (при максимальном токе соленоида).

даже при небольших токах, так как, согласно (3), расширение пучка на угол $\Delta\alpha_1$ в центральной части приводит к увеличению углового размера его в пробке в отношении $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} \gg 1$.

Экспериментальное исследование этого метода инжекции проводилось на магнитной ловушке с $L=150$ см, диаметром 40 см, пробочным отношением 2.5. Инжектировались электроны с энергией 100 кв.

Инжектором служила кольцевая электронная пушка, расположенная на оси ловушки и дающая симметричный по азимуту конический пучок с углом $\alpha_1 \approx 20^\circ$ (см. рисунок). Стационарное магнитное поле в области инжектора ослаблялось полем однослойного соленоида, помещенного внутри камеры, на который подавался колоколообразный импульс тока с длительностью спада 2.5 мксек. При этом $\frac{H_1}{H_0} = \text{const}$. Форма магнитного поля соленоида по z задавалась величиной зазоров между стенкой камеры и витками соленоида. (Величина скин-слоя много меньше толщины камеры). Угловой размер пучка вблизи инжектора составлял около 10° , по расчетам $\alpha_{0\max} \sim 5^\circ$, $\Delta\alpha_1 \sim 1^\circ$. Наблюдался захват в ловушку $\sim 10\%$ инжектируемого тока при различных токах инжекции, что

находится в удовлетворительном согласии с теоретическими оценками. Время жизни электронов, захваченных в ловушку, определялось только рассеянием на остаточном газе и составляло $\sim 0.01-0.1$ сек.

Экспериментально удалось наблюдать увеличение коэффициента захвата с ростом тока инжекции (за счет объемного заряда). Кроме того, при токах инжекции ~ 1 а наблюдался захват в ловушку только на объемном заряде при включенном импульсном соленоиде с коэффициентом захвата $\sim 1.0-0.5\%$. Более подробно влияние объемного заряда на захват не изучалось в связи с возникновением специфических колебаний в ловушке, ограничивающих плотность захваченных частиц (см. [2]).

Авторы выражают благодарность А. П. Ершову и А. А. Забродову за участие в проведении экспериментов.

Литература

- [1] Л. А. Арцимович. Управляемые термоядерные реакции, стр. 385. Физматгиз, М., 1961. — [2] Г. И. Будкер, В. И. Волосов, С. С. Моисеев, В. Е. Пальчиков, Ф. А. Цельник. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Conference proceedings, Culham, 6-10 sept., 1965), II, 245, IAEA, Vienna, 1966.

Поступило в Редакцию
8 октября 1965 г.