

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 153

В.Г. Пономаренко, Л.Я. Трайнин,
В.И. Юрченко, А.Н. Яснецкий

**Эксперименты по адиабатическому
нагреву электронов, захваченных
в магнитную ловушку**

г. Новосибирск 1967

В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин,
В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АДИАБАТИЧЕСКОМУ НАГРЕВУ ЭЛЕКТРОНОВ,
ЗАХВАЧЕННЫХ В МАГНИТНУЮ ЛОВУШКУ

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведены теоретические оценки влияния адиабатического нагрева на движение заряженных частиц в магнитной ловушке. Приведены экспериментальные осциллограммы адиабатического нагрева и зависимости времени удержания электронов в ловушке от магнитного поля при адиабатическом нагреве. Описана методика получения больших времен удержания (свыше 500 сек) с помощью адиабатического нагрева. Измерения проведены на установке, описанной в /1/, /2/.

V.G.Ponomarenko, L.Ja.Traynin,
V.I.Jurtchenko, A.N.Jasnetsky

EXPERIMENTS ON THE ADIABATIC HEATING IN A
MAGNETIC MIRROR MACHINE.

Estimations of the influence of adiabatic heating on electrons motion in the magnetic mirror machine are carried out. It is found that energies initial W_{01} and final W_{02} are connected by formula:

$$W_{02} = W_{01} \sqrt{b} (\sin^2 \alpha_{01} \cdot b^{\frac{1}{2}} + \cos^2 \alpha_{01}), \text{ where:}$$

α_{01} is the angle between electrons velocity and vector of the magnetic induction \vec{B} in the centre of the magnetic mirror machine

$$b = \sqrt{\frac{B_{02}}{B_{01}}}$$

The initial angle α_{01} and the final angle α_{02} are connected by the formula:

$$\text{tg } \alpha_{02} = \text{tg } \alpha_{01} \cdot b^{\frac{1}{4}}$$

Any experimental oscillograms of the adiabatic heating are presented.

A sharp drop up of the dependance captured electrons loss rate while adiabatic heating was observed.

The experiments in which the electrons confinement time up to 540 sec. is described.

Comparison of the dependance of confinement time on the magnetic induction with the adiabatic heating and without last are presented.

I. Теоретическое рассмотрение

Наиболее просто особенности влияния адиабатического нагрева на движение электронов в магнитной ловушке выявляются при рассмотрении движения в поле с параболическим законом нарастания по оси.

$$B(z) = B_0 + \frac{1}{2} B'' z^2$$

В этом случае из уравнения продольного движения

$$m \ddot{z} = -M \frac{\partial B}{\partial z} = -M B'' z, \text{ находим}$$

$$z = z_1 \sin \sqrt{\frac{M B''}{m}} t$$

Так как

$$M = \frac{eU \sin^2 \alpha_0}{B_0}, \text{ то } \Omega = \sqrt{\frac{eU}{m} \cdot \frac{B''}{B_0} \sin^2 \alpha_0}$$

При адиабатическом нагреве

$$M = \frac{eU \sin^2 \alpha_0}{B_0} = \text{const.} \quad (I)$$

(α_0 - угол между вектором скорости и вектором \vec{B} в центре ловушки).

Кроме того, продольный адиабатический инвариант

$$\int p_{||} dz = \bar{W}_{||} T = \text{const.} \quad (2),$$

где

$$\bar{W}_{||} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{m \dot{z}^2}{2} dt = eU \cos^2 \alpha_0$$

Тогда имеем из (I)

$$\frac{W_{01} \sin^2 \alpha_{01}}{B_{01}} = \frac{W_{02} \sin^2 \alpha_{02}}{B_{02}}$$

и из (2)

$$\frac{W_{01} \cos^2 \alpha_{01}}{\sqrt{B_{01}}} = \frac{W_{02} \cos^2 \alpha_{02}}{\sqrt{B_{02}}}$$

где индекс 1 относится к величинам до нагрева, а 2 - после нагрева. Обозначим

$$\frac{B_{02}}{B_{01}} = b > 1$$

Тогда

$$W_{02} \sin^2 \alpha_{02} = W_{01} \sin^2 \alpha_{01} \sqrt{B}$$

$$W_{02} \cos^2 \alpha_{02} = W_{01} \cos^2 \alpha_{01} \sqrt{B}$$

$$W_{02} = W_{01} \sqrt{B} (\sin^2 \alpha_{01} \sqrt{B} + \cos^2 \alpha_{01}) \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{02} = \sqrt{B} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{01} \quad (4)$$

2. Экспериментальная часть

Для адиабатического нагрева электронов использовалась схема, показанная на рис.1. В момент инжекции производилось отпирание управляемых клапанов УПКЛ-50.5, включенных параллельно со-противлениям R , величина которых могла плавно регулироваться от 0 до 12 ом. Сопротивления обмоток соленоидов были равны 2,4 ом. Переходный процесс длился $\sim 0,1$ сек.

Типичные осциллограммы выходного тока коллектора приведены на рис.2, где показан полный процесс выхода, а также его начало при различном увеличении осциллографа и различном масштабе времени. Из рис.2 видно, что \bar{T} и $T_k / 2$ при адиабатическом нагреве возрастают сильнее, чем T_n . Это можно объяснить тем, что в соответствии с вышеприведенными соотношениями происходит увеличение угла α_0 .

Осциллограммы рис.3 показывают, как при нагреве в начальный момент происходит спадание первичного тока до 0 с последующим нарастанием, что можно объяснить возрастанием угла α_0 для электронов, находящихся вблизи конуса потерь.

Интересны результаты экспериментов на высоком вакууме. Так при условиях $p = 5 \cdot 10^{-9}$ тор, $U_{\text{пушки}} = 35$ кв, $U_{\text{коллектора}} = 40$ кв и расстоянии между пробками 77 см, время удержания T_n составляло 40 сек, при $N_{\text{пробки}} = 960$ э, а при нагреве с 960 э до 1680 э поднялось до 80 сек.

Однако при $p = 5 \cdot 10^{-10}$ тор и аналогичных в остальных условиях время удержания изменялось с 426 сек до 540 сек.

Можно предположить, что причиной этой непропорциональности является излучение электронов, захваченных в ловушку.

Представляет интерес зависимость времени удержания электронов в ловушке от магнитного поля при адиабатическом нагреве при увеличении поля в 1,5 раза (рис.4). При этом приведена зависимость времени удержания от конечного значения поля, установившегося после нагрева.

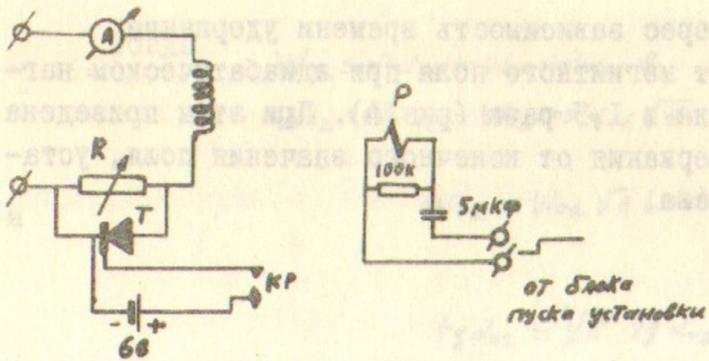


Рис. I

Принципиальная схема включения адиабатического нагрева.

Рис. I

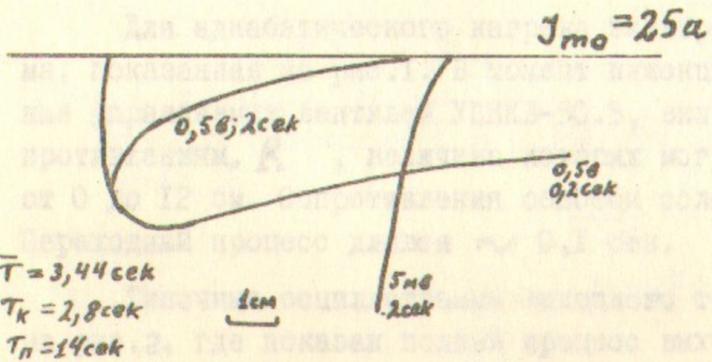


Рис. 2а

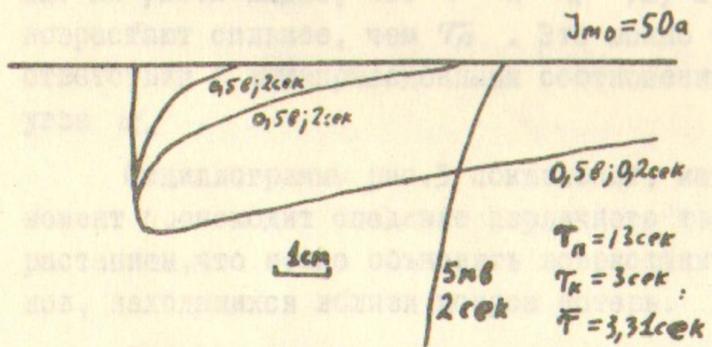


Рис. 2б

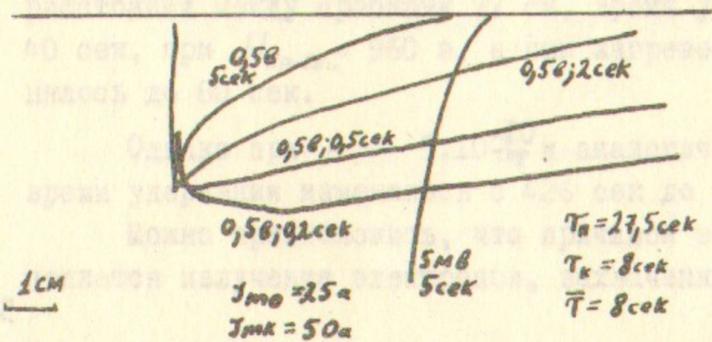


Рис. 2в

Осциллограммы тока вторичных электронов без адиабатического нагрева. J_{mo} - ток соленоидов пробки. 1 а соответствует 24 эрстедам в центре пробки.
 $U_{\text{пушки}} = 4 \text{ кВ}$
 $U_{\text{кольца}} = 8 \text{ кВ}$
 расстояние между центрами пробок = 77 см. Цифры при кривых показывают масштаб времени в сек/см и чувствительность осциллографа в в/см. 1 в соответствует 10^{-9} а тока коллектора.

Осциллограммы тока вторичных электронов при адиабатическом нагреве.
 I_{mk} - конечная величина тока соленоидов после нагрева.

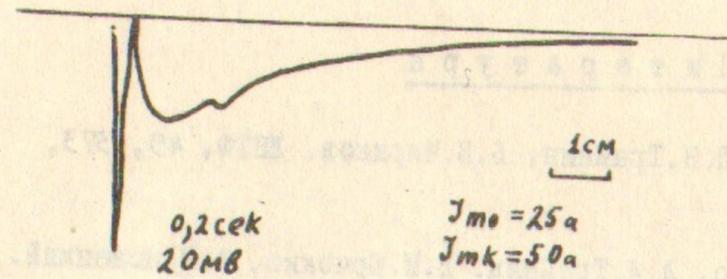


Рис. 3

Рис. 3

Осциллограммы тока первичных электронов при адиабатическом нагреве.

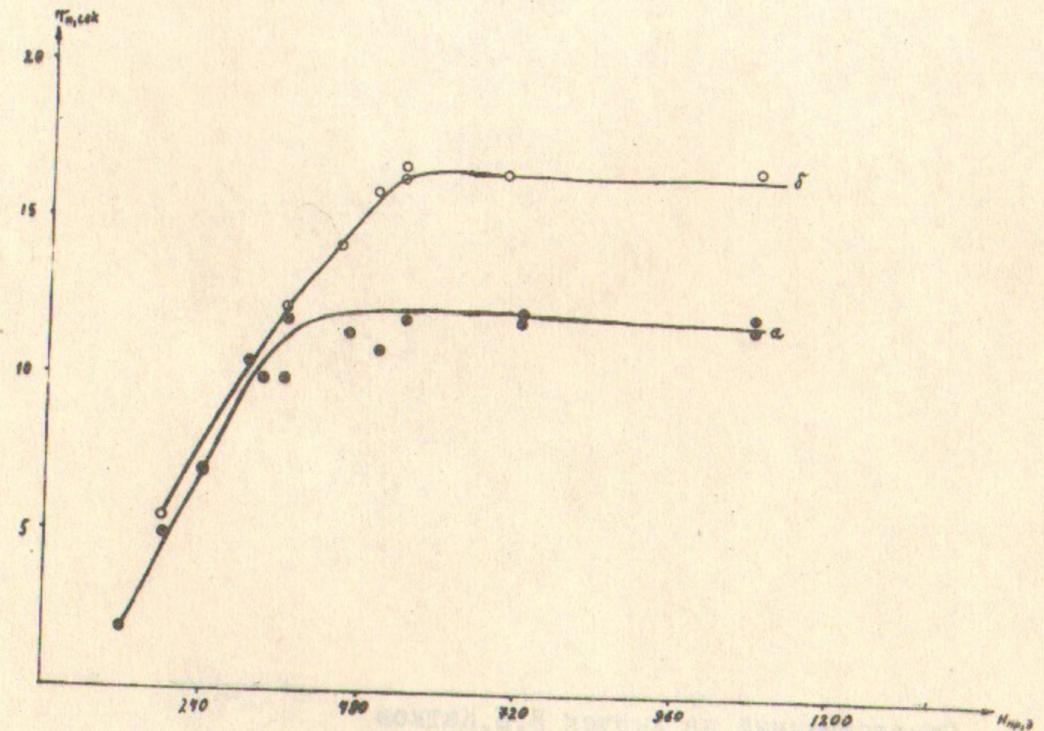
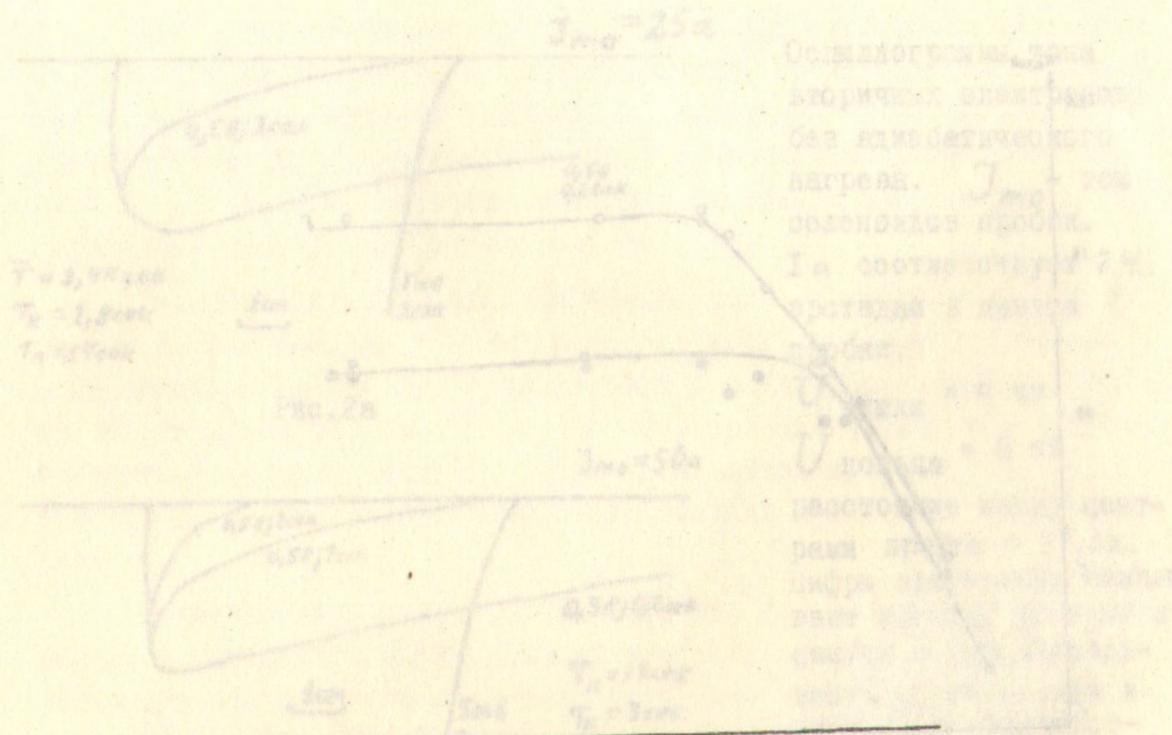


рис. 4 Зависимость времени удержания от магнитного поля без адиабатического нагрева (нижняя кривая) и при нагреве (верхняя кривая)

$U_{\text{пушки}} = 9 \text{ кВ}$ $U_{\text{кольца}} = 4 \text{ кВ}$

Л и т е р а т у р а

1. А.Н.Дубинина, Л.Я.Траинин, Б.В.Чириков. ЖЭТФ, 49, 373, 1965.
2. В.Г.Пономаренко, Л.Я.Траинин, В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий. Экспериментальное исследование процессов движения отдельных заряженных частиц в ловушке с магнитными пробками, ИЯФ СО АН СССР, 1967.



Ответственный за выпуск В.М.Катков

Подписано к печати 29.IX-1967 г.

Усл. 0,7 печ. л., тираж 250 экз.

Заказ № 153

БЕСПЛАТНО

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР