

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАТОРАХ ТОР-1 и ТОР-2

Д.К. Акулина, Э.Д. Андрухина, М.А. Ивановский,
Ю.И. Нечаев, С.Н. Попов, И.В. Солдатский,
О.И. Федянин, Ю.В. Хольнов.

1. В работе приведены первые результаты исследования удержания плазмы в новых двухзаходных стеллараторах Физического института им. П.Н.Лебедева Академии наук СССР.

Стеллараторы ТОР-1 и ТОР-2 представляют собой тороидальные магнитные ловушки с двухзаходным винтовым магнитным полем. Особенностью установки ТОР-2 является возможность изменения числа периодов винтового магнитного поля¹.

Описание установок и основные физические параметры можно найти в работе².

Магнитные измерения, проведённые на установках, показали^{3,4}, что структура магнитного поля этих стеллараторов более совершенна, чем в стеллараторе Л-1⁵. Это достигнуто за счёт большей точности в изготовлении магнитной системы. На этих стеллараторах удалось достаточно близко подойти к предельно возможной величине угла вращательного преобразования для тороидальной системы, величина которого в соответствии с теорией определяется тороидальным возмущением и равна 25-30% от угла вращательного преобразования на сепаратриссе⁶.

2. Эксперименты по исследованию плазмы были проведены для плазмы малой плотности (слабостолкновительный режим). Плазма создавалась искровой пушкой.

Основные параметры плазмы: $n_e \approx 0,5 \div 1.10^{11} \text{ см}^{-3}$,
 $T_e \approx 2 - 4 \text{ эв}$, $T_i \approx 20-30 \text{ эв}$.

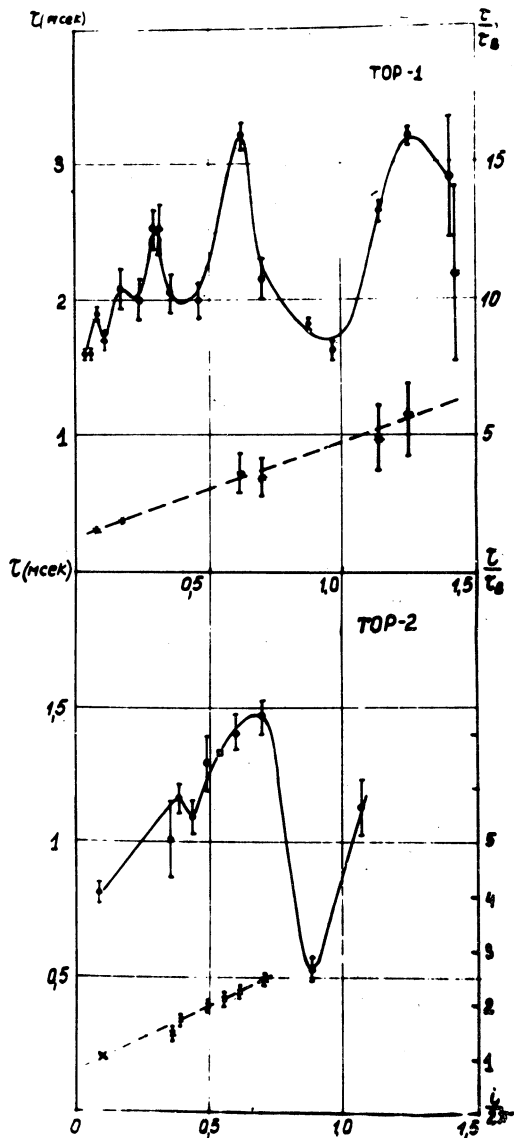
Распределение плотности по радиусу соответствует профилю обычного диффузионного распределения. Изменение плотности во времени (при уменьшении плотности примерно на порядок) носит экспоненциальный характер.

Одной из основных задач экспериментов в стеллараторах было выяснение влияния вращательного преобразования на удержание плазмы. Результаты экспериментов приведены на рис. 1. На графике представлена зависимость времени жизни плазмы τ от угла вращательного преобразования на магнитной оси $i(0)$. Особенностью приведённого графика является: 1) Рост времени жизни при увеличении $i(0)$; 2) Наличие провалов в кривой $\tau(i)$ в областях углов $i = \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \pi, 2\pi$. Уменьшению времени жизни соответствуют значения $i(0)$, при которых имеют место резонансные возмущения структуры магнитных поверхностей. Это свидетельствует о том, что структура магнитного поля оказывает весьма существенное влияние на поведение плазмы в ловушке.

Поскольку зависимость времени жизни плазмы от напряжённости магнитного поля почти линейная ($H = 2-15 \text{ кэ}$), можно провести сравнение времени жизни плазмы с принятой масштабной единицей — "бомовским" временем жизни, определяемым как $\tau_B(\text{сек}) =$
 $= \frac{4 \cdot 10^{-5} r_0^2 (\text{см}) H (\text{кэ})}{T_e (\text{эв})}$. На рис. 1 приведена зависи-

мость отношения $\frac{\tau}{\tau_B}$ от i . с учётом того, что r_0 —

— средний радиус граничной магнитной поверхности, определённый по магнитным измерениям, уменьшается с ростом $i(0)$. Пунктирная кривая соответствует



Р и с. 1. Зависимость времени жизни τ от угла вращательного преобразования $i(0)$ на оси. Пунктирной кривой представлена зависимость безразмерного

времени жизни $\frac{\tau}{\tau_0}$. ($H=6$ кэ, $T_e = 2$ эв).

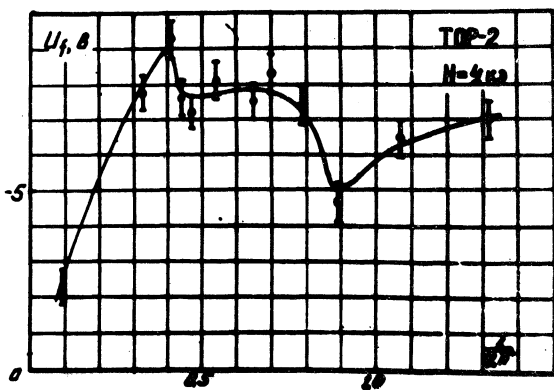
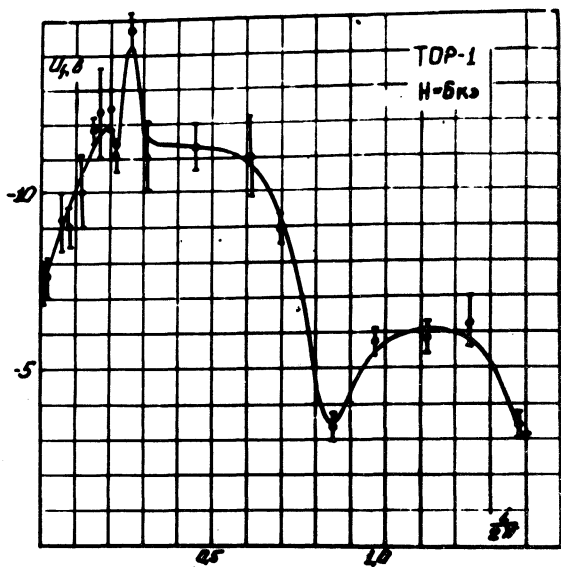
регулярной структуре магнитного поля, не возмущённой резонансами (т.е. максимумами сплошной кривой).

Как видно из рис. 1 функциональная зависимость времени жизни плазмы в единицах "бомовского" времени жизни от угла $\mathbf{i}(0)$ носит линейный характер.

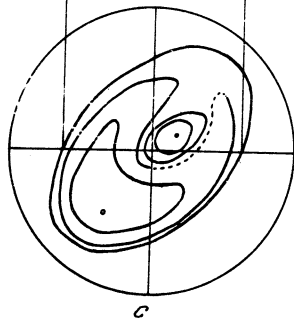
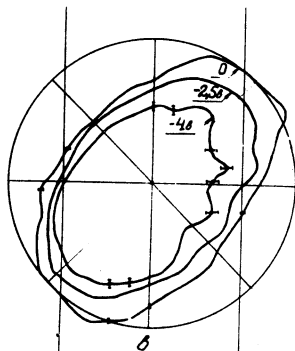
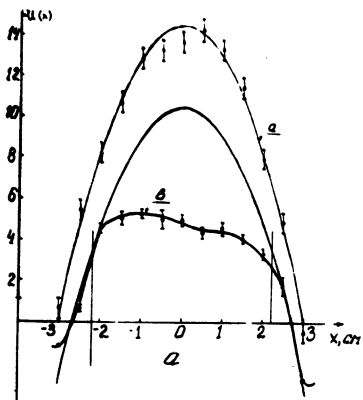
3. Амбиполярный характер диффузии плазмы в замкнутых магнитных ловушках приводит к возникновению в плазме электрических полей. На стеллараторах TOP-1 и TOP-2 были проведены измерения зависимости "плавающего" потенциала U_f от \mathbf{i} , \mathbf{H} , а также снято распределение потенциала по сечению плазмы. На рис. 2 приведена зависимость $U_f(\mathbf{i})$. Наблюдается отчётливая корреляция в зависимостях $U_f(\mathbf{i})$ и $\tau(\mathbf{i})$.

В частности, следует обратить внимание на наличие провалов в кривой $U_f(\mathbf{i})$, которые соответствуют тем же резонансным значениям $\mathbf{i}(0)$. Электрическое поле в плазме является отрицательным и его величина пропорциональна напряжённости магнитного поля.

4. Из приведённых экспериментальных данных следует, что время жизни τ и потенциал плазмы U_f сильно уменьшаются, если структура магнитного поля возмущена наличием резонансов. На рис.3 приведена картина магнитных поверхностей двухзаходного стелларатора TOP-2 в случае первого резонанса ($\mathbf{i} = 2\pi$). Внешние магнитные поверхности имеют эллиптическую форму. Наличие соответствующих гармоник внешних возмущений, период которых совпадает с периодом оборота силовой линии вокруг магнитной оси, приводит к расщеплению внутренних магнитных поверхностей и образованию розеток. Розеточная структура оказывает сильное влияние на распределение электрического поля и плотности по сечению камеры. На рис. 3 приведены измеренные распределения потенциала по радиусу и картина эквипотенциалей в области первого резонанса. Если в случае невозмущённых магнитных поверхностей распределение $U_f(\mathbf{r})$ соответствует квадратичной пара-



Р и с. 2. Зависимость величины "плавающего" потенциала плазмы U_f от угла вращательного преобразования $\alpha(0)$.



Р и с. 3. а) Распределение "плавающего" потенциала плазмы по радиусу для регулярной (кривая а) и резонансной (кривая в) структуры магнитного поля;
 в) Картина эквипотенциалей;
 с) Резонансная структура сечений магнитных поверхностей (первый резонанс $i = 2\pi$).

боле (кривая а), то при наличии розеток кривая сильно деформируется (кривая в). Потенциал в центральной области практически постоянен, т.е. электрическое поле равно нулю. Кроме того, следует отметить, что во внешней области ($r > 2$ см), эквипотенциали совпадают с магнитными поверхностями, а внутренняя область получается квазиэквипотенциальной.

Хотя для резонанса $i = 2\pi$ уменьшение времени жизни грубо соответствует уменьшению диффузионной характерной длины (принятой равной поперечнику розетки), однако, по-видимому, физические причины, приводящие к уменьшению жизни, более сложны и многообразны. Вполне возможно, что наличие розеток приводит к образованию конвективных ячеек, а их перемещение — к созданию зарегистрированной нами эквипотенциальной области.

5. Заключение. Более совершенная структура магнитного поля стеллараторов TOP-1 и TOP-2 позволила проследить зависимость времени жизни плазмы в существенно большем диапазоне углов вращательного преобразования (вплоть до 3π), чем это было сделано ранее⁷. Измерения показали, что полученный ранее рост времени жизни продолжается и в области углов вращательного преобразования, больших 2π , причём максимальное значение времени удержания превышает "бомовское" в 5-10 раз.

Точное знание структуры поля позволяет утверждать, что основной причиной, уменьшающей время жизни плазмы в областях $i = \frac{\pi}{2}, \pi, 2\pi$, является "розеточная" структура магнитных поверхностей.

На основании полученной линейной зависимости времени жизни плазмы от угла вращательного преобразования нельзя однозначно утверждать об отсутствии зависимости от шира или от характера движения локализованных частиц. Действительно, и шир, и относительная величина винтового поля (которая определяет движение

локализованных частиц) пропорциональны углу вращательного преобразования.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить М.С. Рабиновича, И.С. Шпигеля, Л.М. Коврижных, И. С. Данилкина, С.Е. Гребенщикова за полезные дискуссии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Попов С.Н., Попрядухин А.П. ЖТФ, 36, в.6 (1966).
2. "Стеллараторы Физического института им.П.Н.Лебедева АН СССР" Препринт ФИАН № 57 (1969).
3. Андрюхина Э.Д., Федянин О.И., Хольнов Ю.В. "Структура магнитного поля двухзаходного стелларатора TOP-1". Препринт ФИАН № 118 (1969).
4. Ивановский М.А., Попов С.Н. "Исследование структуры магнитного поля стелларатора TOP-2". Препринт ФИАН № 124 (1969).
5. Бережецкий М.С., Гребенщиков С.Е., Зверев Н.М., Шпигель И.С. "Труды Физического института им.П.Н.Лебедева АН СССР" XXXII, 20 (1966).
6. Комин А.В., Красницкая Л.С., Минаев В.П. "Магнитные поверхности тороидального винтового поля вблизи сепаратриссы" Препринт № 225 ИЯФ СО АН СССР (1968).
7. Бережецкий М.С., Гребенщиков С.Е., Косый И.А., Нечаев Ю.И., Рабинович М.С., Сбитникова И.С., Шпигель И.С. Proc. of Int.Conf. on Contr.Nucl.Fus. Res.(1968), D-5.
8. Коврижных Л.М. ЖЭТФ, 56, 3, 877 (1969).