

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ "УРАГАН"

А. Г. Дикий, В. М. Залкинд, Г. В. Зеленин,
В. Г. Коновалов, В. Д. Коцубанов, А. Н. Литвинов,
О. С. Павличенко, Н. Ф. Черепанкин, Н. П. Пономаренко,
В. А. Супруненко, В. Т. Толок, В. М. Тонконгра

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в последнее время, привели к существенному прогрессу в изучении процессов передачи плазмы в стеллараторе. В ряде модельных экспериментов с мало-плотной и холодной плазмой [1 – 3] было получено удовлетворительное согласие времени жизни частиц с расчетами, проведенными в работах [4, 5].

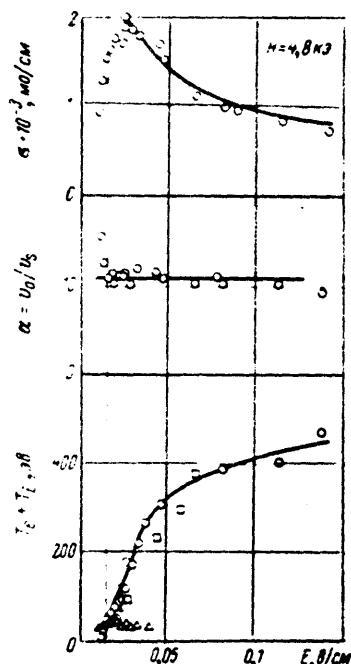


Рис. 4. Зависимость от напряженности электрического поля в плазме электропроводности плазмы, величины относительной скорости токового дрейфа и "диамагнитной" температуры (кружки). Для сравнения нанесены значения электронной температуры определенной по микроволновому излучению (квадраты), по рассеянию света (ромб) и по кулоновской электропроводности плазмы (треугольники)

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования удержания электронно-горячей бесстолкновительной плазмы в стеллараторе "Ураган" с крутой винтовой обмоткой [6]. Шир. 0,1, угол прокручивания силовой линии на наружной магнитной поверхности со средним радиусом 6,8 см 1,7 π.

1. Нагрев и аномальная электропроводность плазмы. Высокая электронная температура в описываемом эксперименте обеспечивалась турбулентным нагревом продольным током в режиме ионно-звуковой аномалии электропроводности плазмы [7, 8]. Эксперименты проводились в интервале значений продольного электрического поля $0,1 < E/E_0 < 1,0$ и магнитного поля $\omega_{He}/\omega_{0e} \approx 1$. Здесь $E_0 = 1,3 \cdot 10^{-12} n/T_e$, $\omega_{0e} =$

Электронная плазменная частота, ω_{He} – гирочастота электронов. В этих условиях скорость токового дрейфа электронов стабилизировалась на уровне $v_o = 10v_s = 10\sqrt{ZT_e/M_i}$ (см. рис. 1), и наблюдался интенсивный нагрев электронов до температуры порядка 0,5 кэв и выше. Электронная температура плазмы измерялась по томсоновскому рассеянию света лазера и по диамагнитному сигналу. При этом ионная температура, определенная по донцлеровскому уширению линии Не II, была порядка 10 – 20 эв и слабо зависела от параметров разряда, так что всегда $T_e \gg T_i$. Исследования микроволнового излучения на частоте ω_{oe} показали, что его спектр, уровень и временное поведение соответствует тепловому излучению. Это может, вероятно, свидетельствовать об отсутствии "убегающих электронов".

Таким образом, значения электронной температуры, полученные тремя независимыми методами, оказались в хорошем согласии между собой (см. рис. 1).

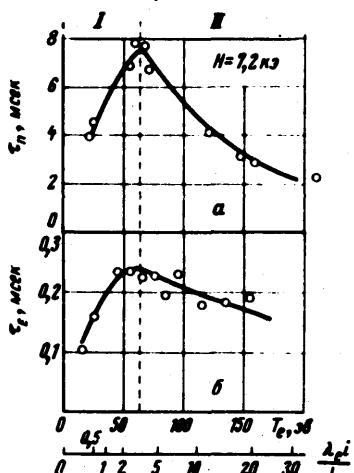


Рис. 2. Зависимость энергетического времени жизни плазмы и времени жизни частиц от величины электронной температуры плазмы. Здесь λ_e – длина свободного пробега электронов по кулоновским столкновениям, L – полная длина плазменного шнура, i – угол прокручивания силовой линии (плотность плазмы $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $a_o = 6,8 \text{ см}$, $i = 1,5 \pi$)

В интервале значений разрядного тока $I_{\text{раз}} < I_{\text{кр}}$ измеренные значения полной кинетической энергии плазмы удовлетворяют эмпирическому соотношению

$$n T_e \approx 4,5 \cdot 10^{12} I_{\text{раз}} \mathcal{H}_o \left(a_o^2 \frac{i}{2\pi} \right)^{1/2}.$$

Здесь и далее n – плотность плазмы – изменялась в пределах $0,2 - 0,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, T_e – электронная температура плазмы – изменилась от 50 до 500 эв, $I_{\text{раз}}$ – разрядный ток – менялся от 0,5 до 10 ка, a_o – радиус наружной магнитной поверхности – менялся от 8 до 5 см, i – угол прокручивания на наружной магнитной поверхности в радианах – менялся от 0,2 до $1,7\pi$, \mathcal{H}_o – продольное магнитное поле – менялось от 5 до 10 кэ. Величина a_o и i определялись экспериментально при настройке магнитной системы с помощью электронного пучка [9]. Величина критического тока $I_{\text{кр}}$ зависит от магнитного поля: $I_{\text{кр}} = 0,7 \mathcal{H}_o$ (при $a_o = 6,8 \text{ см}$, $i = 1,5 \pi$).

2. Энергетическое время жизни. Энергетическое время жизни плазмы (без учета потерь на излучение) находилось из измерений полной энергии плазмы (по диамагнетизму) и вводимой мощности. Зависимость энергетического времени жизни от электронной температуры показана

на рис. 2, б. В области I τ_E растет с ростом температуры, в области II τ_E падает примерно пропорционально $T_e^{-1/2}$. В этой области измеренные значения времени жизни энергии в миллисекундах хорошо укладываются в эмпирическую формулу (см. рис. 3, а)

$$\tau_E \approx (3 \div 5) \cdot 10^{10} \frac{\mathcal{H}_o^2 (\sigma_o^2 i / 2\pi)^{1/2}}{n_e T_e^{1/2}} .$$

При этом абсолютная величина τ_E достигала значения $(5 - 6) \tau_B$.

3. Время жизни частиц. Время жизни частиц определялось из уравнения баланса заряженных частиц путем измерения электронной плотности и вклада ионизации атомов и однократных ионов гелия. Зависимость определенного таким образом τ_n приведена на рис. 2, а. Уменьшение τ_n в области II происходит пропорционально T_e^{-1} и независимо от электронной плотности. Все результаты измерения τ_n в области II могут быть представлены эмпирическим соотношением вида (см. рис. 3, б).

$$\tau_n \approx (0,2 \div 0,3) \frac{\mathcal{H}_o^2}{T_e} \left(\sigma_o^2 \frac{i}{2\pi} \right) .$$

Абсолютная величина τ_n лежит в диапазоне $(50 - 60) \tau_B$.

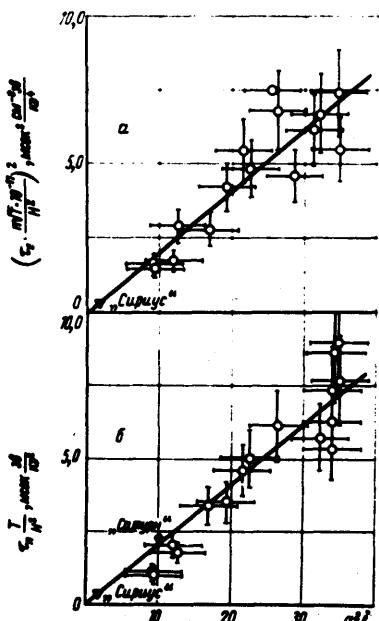


Рис. 3. Зависимость нормированного времени жизни частиц и энергии от параметра $(\sigma_o^2 i / 2\pi)$. Для сравнения приведены данные, полученные на установках "Сатурн" [11] и "Сириус" [12].

4. Заключение. Основным результатом данной работы является экспериментальное исследование функциональной зависимости времени удержания электронно-горячей бесстолкновительной плазмы от параметров разряда и напряженности магнитного поля. Обнаружено две области с различной функциональной зависимостью времени жизни от электронной температуры плазмы. Первая область ($T_e < 50$ эв) ве-

роятно, соответствует области Пфириша – Шлюттера [10], вторая область ($T_e > 50 \text{ эв}$) соответствует "плато" Галеева – Сагдеева [4].

В этой области было впервые экспериментально исследовано энергетическое время жизни бесстолкновительной электронно-горячей плазмы. Показано, что несмотря на то, что потери энергии здесь определяются, главным образом, электронной компонентой плазмы, энергетическое время жизни существенным образом отличается от времени удержания частиц как по абсолютной величине, так и по функциональной зависимости от параметров разряда

$$\frac{\tau_n}{\tau_E} = 10^{-11} \frac{n \sigma_0 (i / 2\pi)^{1/2}}{T_e^{1/2}} \approx 5 \div 10.$$

Результаты экспериментов по удержанию плазмы в стеллараторах "Сатурн" [11] и "Сириус" [12] находятся в хорошем согласии с эмпирическими соотношениями, полученными в данной работе.

В заключение авторы выражают свою глубокую благодарность Б.Б.Кадомцеву, К.Н.Степанову и С.С.Моисееву за интерес к работе и плодотворное участие в обсуждении эксперимента.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
16 июня 1971 г.

Литература

- [1] E.Berkel et al. Phys. Rev. Lett., 17, 906, 1966;
- [2] D.J.Lees et al. III European conference on controlled fusion and plasma Physics. Report №4.
- [3] М.С.Бережецкий и др. III конференция по исследованиям в области физики плазмы и управляемых термоядерных реакций. Доклад CN – 24/G 1.
- [4] А.А.Галеев, Р.З Сагдеев. ЖЭТФ, 53, 348, 1967.
- [5] Л.М.Коврижных. ЖЭТФ, 56, 877, 1969.
- [6] В.Н.Вишневецкий и др. ЖТФ, 40, 1615, 1970.
- [7] Е.К.Завойский, Л.И.Рудаков. АЭ, 23, 417, 1967.
- [8] В.А.Супруненко , Е.А.Сухомлин, В.Т.Толок. Препринт ХФТИ – 70 – 67, г. Харьков, 1970.
- [9] А.В.Георгиевский и др. УФЖ, 15, 680, 1971.
- [10] Von D. Pfirsch, A.Schluter. Preprint MPI (PA) 7/62 Max – Planck Institute fur Physik und Astrophysics, 1962.
- [11] В.С.Войщена и др. IV конференция по исследованиям в области физики плазмы и управляемых термоядерных реакций. Мэдисон 1971. Доклад CN – 28/H10.
- [12] П.Я.Бурченко и др. УФЖ, 15, 1842, 1970 ; АЭ, 28, 126, 1970.