

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ С БОЛЬШИМ β , СОЗДАВАЕМОЙ ВЧ МЕТОДОМ В ТОРСАТРОНЕ "УРАГАН-3"

*Н.И.Назаров, В.В.Плюснин, О.М.Швец, Е.Д.Волков,
Ю.В.Гутарев, А.Г.Дикий, В.М.Залкинд, В.Г.Коновалов,
Б.В.Кравчин, А.П.Литвинов, Ю.К.Миронов, О.С.Павличенко,
В.К.Пашнев, Н.Ф.Перепелкин, Г.Н.Полякова, И.С.Сушко,*

В торсатроне "Ураган-3" получены квазистационарные разряды и достигнуто значение га-зокинетического давления плазмы, при котором возникают релаксационные колебания параметров, связанные с нарушением равновесия плазмы.

1. Перспектива создания стационарного термоядерного реактора на основе стелларатора оп-ределяется в значительной мере максимально достижимой величиной параметра $\beta = \frac{8\pi n(T_e + T_i)}{B^2}$.

Теория предсказывает ограничение этого параметра в стеллараторах вследствие эффектов, связанных с равновесием и устойчивостью плазмы с большим β ¹. Поэтому важное значение имеют экспериментальные исследования поведения плазмы с большим β в стеллараторах.

В настоящей статье сообщается о наблюдении на торсатроне "Ураган-3" релаксационных колебаний параметров плазмы, создававшейся ВЧ методом², при значениях параметра β , близких к предельному с точки зрения равновесия плазмы.

2. Магнитная конфигурация торса трона с дивертором "Ураган-3" создается с помощью трехзаходной винтовой обмотки ($l = 3, m = 9$), навитой на тороидальную магнитную поверхность с большим радиусом $R = 100$ см и малым радиусом $a_b = 27$ см, и двух круглых катушек ($R = 150$ см, $\Delta Z_K = \pm 50$ см), компенсирующих вертикальную составляющую поля винтовой обмотки³. Вся магнитная система размещена в вакуумной камере объемом 70 м³.

Параметры магнитной конфигурации могут изменяться при изменении компенсирующего вертикального поля³. В большинстве описываемых экспериментов угол вращательного преобразования в области с замкнутыми поверхностями со средним радиусом $\bar{a} = 8,5$ см изменялся от $t(0) = 0,18$ до $t(a) = 0,4$.

Плазма создавалась при поглощении ВЧ мощности в области частоты, соответствующей возбуждению альфвеновской волны ($\omega \approx 0,8 \cdot \omega_{H_i}$). Использовались неэкранированные винтовые рамочные антенны из нержавеющей стали или такие же антенны, но с покрытием из нитрида титана, располагавшиеся на тороидальной поверхности с радиусом $r_a = 10 \div 12$ см и возбуждавшиеся на частоте 5,3 МГц двухступенчатым импульсом. Длительность первой ступени ($\Delta t = 2 \div 3$ мс) выбиралась достаточной для пробоя постоянно напускавшегося в вакуумную камеру водорода или дейтерия ($p = 1,3 \cdot 10^{-5}$ торр) и создания форплазмы с концентрацией электронов $\bar{n}_e = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³. Длительность второй ступени с удвоенным напряжением на ВЧ антенне могла достигать 50 мс. Экспериментам предшествовала длительная чистка поверхностей антенны и магнитной системы ВЧ разрядами при малой индукции магнитного поля².

3. В экспериментах с антенной без покрытия ($r_a = 10$ см) при работе с дейтерием ($B_0 = 0,9$ Тл) после быстрого в течение 2 мс нагрева плазмы ($n_e \leq 1 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $T_i(0) \leq 300$ эВ, $T_e(0) \leq 230$ эВ) наблюдалась прогрессирующая деградация сначала электронной, а затем ионной температур.

Разряды длительностью до 50 мс без деградации параметров плазмы удалось получить при нанесении на антенну покрытия из нитрида титана ($r_a = 12$ см). Измерения потока металлических примесей с антенны, выполненные на водородной плазме при поглощаемой мощности 200 кВт показали, что поток примесей (Ti) с антенны с покрытием снизился в 60÷70 раз по сравнению с режимом работы антенны из нержавеющей стали.

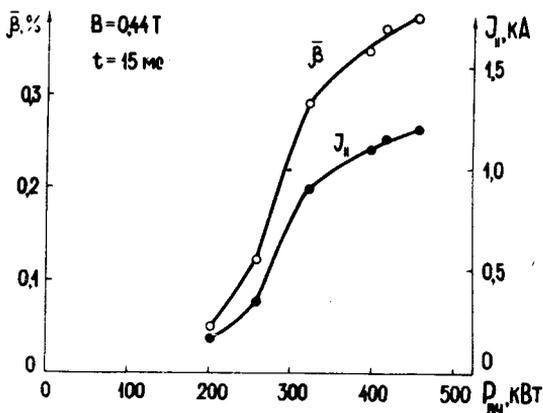


Рис. 1. Зависимость величины $\bar{\beta}$, регистрируемой седловидной магнитной обмоткой и продольного плазменного тока $J_{||}$ от ВЧ мощности на антенне

При повышении вводимой мощности в квазистационарных разрядах наблюдался рост энергосодержания плазмы, регистрируемого седловидной магнитной обмоткой², и продольного тока (рис. 1). Отличительной особенностью разрядов являлось наличие заметных флуктуаций сигналов с диагностических датчиков в диапазоне частот 1 ÷ 30 кГц (рис. 2, а).

При дальнейшем повышении ВЧ мощности при $\beta = \frac{8\pi n(T_e + T_i)}{B^2} \approx 0,3\%$ разряд перешел в новый режим (рис. 2, б), характеризовавшийся релаксационными колебаниями пилообразной формы измеряемых параметров плазмы. Для большинства измеряемых параметров колебания носят характер сбросов; наиболее резко это проявляется на свечении линий CV и OV, локализованных в центре шнура. О распространении волны возмущения из центральной зоны

на периферию свидетельствуют выбросы интенсивности свечения линий TiI вблизи поверхности антенны (рис. 3) и линии H_{β} в диверторных потоках.

Картина релаксационных колебаний менялась при варьировании параметров магнитной конфигурации, достигавшемся путем изменения величины вертикального магнитного поля B_{\perp} . Так, разряд становился более устойчивым при уменьшении величины B_{\perp} , сопровождавшемся сдвигом оси вакуумной магнитной конфигурации внутрь и увеличением шири. Таким способом при $B_{\perp}/B = 0,36\%$ были получены устойчивые разряды с $\bar{\beta} \approx 0,6\%$, всего в два раза меньшим, чем $\beta_c = \epsilon^2(a)/R$, при котором должны существенно проявляться эффекты нарушения равновесия плазмы.

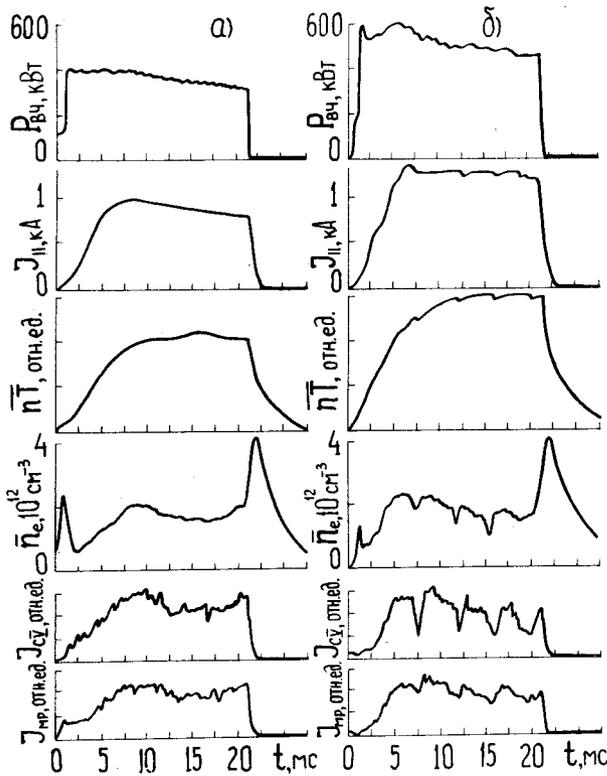


Рис. 2

Рис. 2. Временное поведение ВЧ мощности на антенне $P_{вч}$, продольного плазменного тока $J_{||}$, энергосодержания плазмы \bar{nT} , средней плотности плазмы \bar{n}_e , интенсивности свечения линии CV, $\lambda = 2271 \text{ \AA}$, J_{CV} , мягкого рентгеновского излучения J_{MP} при различной вводимой в плазму ВЧ-мощности

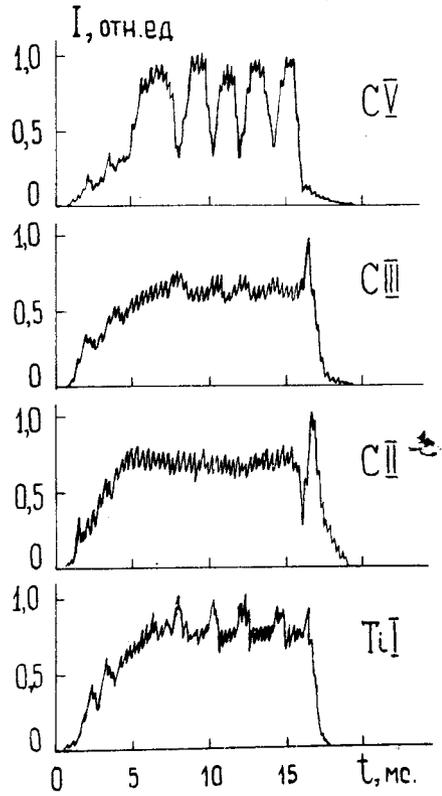


Рис. 3

Рис. 3. Временное поведение интенсивностей свечения примесных линий

Релаксационные колебания наблюдались на торсастроне "Гелиотрон-Е" ⁴ при нагреве плазмы с помощью инжекции нейтралов и являлись следствием МГД-неустойчивости плазмы, вызываемой градиентом давления. В "Урагане-3", кроме градиента давления, вынуждающей силой для возбуждения неустойчивости тиринг-моды может быть квазистационарный продольный ток. В условиях описанных экспериментов магнитная конфигурация "Урагана" содержит близко расположенные магнитные поверхности с $\epsilon = 1/5, 1/4, 1/3, 1/2$ и при развитии МГД-неустойчивости возможно образование островов вблизи этих поверхностей с последующим разрушением магнитной конфигурации и резким увеличением потерь частиц и тепла.

Литература

1. Волков Е.Д., Супруненко В.А., Шишкин А.А. Стелларатор, Киев, Наукова думка, 1983, стр. 180.
2. Bakaev V.V., Gutarev Yu.V., Diky A.G. et al. X Internat. Conf. on Controlled Fusion Research, London, 1984, CN-44/D-1-3.
3. Базаева А.В., Быков В.Е., Георгиевский А.В., Пелетминская В.Г. Сб.: Доклады 2-й Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Ленинград, 1982, т. 2, стр. 31.
4. Harris J.H., Motojima O. et al. Phys. Rev. Lett., 1984, 53, 2242.

Харьковский
физико-технический институт

Поступила в редакцию
14 ноября 1986 г.