

"ВСПЫШЕЧНАЯ" ДИНАМИКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В НЕЙТРАЛЬНОМ ТОКОВОМ СЛОЕ

*А.Т.Алтынцев, В.И.Красов, Н.В.Лебедев,
В.Л.Паперный, В.Г.Симонов*

Экспериментально обнаружено, что нагрев и ускорение электронов в нейтральном токовом слое плазмы тета-пинча эффективно происходят на начальной стадии существования слоя, когда температура и эффективность ускорения быстро растут, одновременно достигают максимума, затем резко падают.

В работах [1, 2] показано, что диссипация энергии в нейтральном токовом слое плазмы тета-пинча сопровождается появлением энергичных электронов ($\epsilon > 2 \text{ кэВ}$), что указывает на существование в слое механизма ускорения и нагрева частиц. В настоящей работе представлены результаты измерения температуры тепловой части электронного распределения ($\epsilon \lesssim 1 \text{ кэВ}$), а также *динамики* процесса энерговыделения в слое.

1. Эксперимент проводился на установке "УН-Феникс". Начальная плазма (водород, $n_0 = 10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} = T_{i0} \approx 1 \div 5 \text{ эВ}$) помещалась в квазистационарное магнитное поле $H_0 = 10^2 \div 10^3 \text{ Э}$, ориентированное вдоль объема (диаметр 16 см, длина 150 см). Плазма подвергалась быстрому сжатию цилиндрическим магнитным поршнем шириной 30 см, амплитудой $H = 1300 \text{ Э}$, периодом $\approx 1,5 \text{ мксек}$, магнитное поле которого антипараллельно H_0 . При этом на границе плазменного шнура в момент времени $t = 0$ возникал нейтральный токовый слой толщиной в установившемся состоянии $\sim 10 \text{ с} / \omega_{pe}$ ($\omega_{pe}^2 = 4\pi n_0 e^2 / m_e$), сходящийся к центру объема. Макроскопическая структура слоя и скорость его движения измерялись магнитными зондами. Динамика изменения основных параметров процесса энерговыделения: температуры тепловой части электронного распределения и эффективности ускорения надтепловых электронов, изучалась путем анализа тормозного рентгеновского излучения электронов токового слоя на помещенной в плазму мишени. Параметры плазмы при этом подбирались такими, что введение мишени слабо возмущало магнитную структуру слоя, а максимальный потенциал слоя относительно мишени, оцененный по формуле $\phi \leq m_i u^2 / 2e$ (m_i — масса иона, u — скорость движения слоя) не превышал $\sim 100 \text{ В}$.

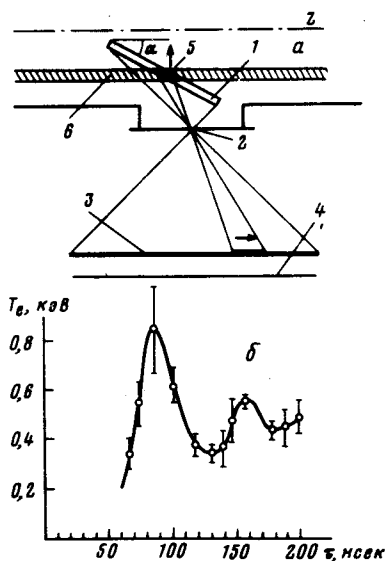


Рис.1. *a* — Схема регистрации рентгеновского изображения мишени. Стрелками показано радиальное движение излучающей области слоя и соответствующее движение ее изображения по поверхности детектора; *b* — динамика изменения температуры электронов в слое, $n_0 = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $H_0 = 450 \text{ Э}$.

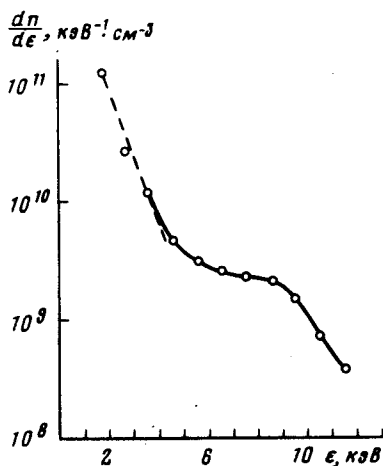


Рис.2. Энергетическое распределение электронов в нейтральном токовом слое. Пунктиром отмечена тепловая часть распределения с $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$

2. Температура электронов в слое и динамика ее измерения определялись следующим образом. С помощью камеры-обскуры (см. рис.1, а) регистрировалось рентгеновское изображение мишени 1, представляющей собой полосу танталовой фольги шириной 5 мм, длиной 80 мм, помещенной в плазменный объем под углом $\alpha = 60^\circ$ к его оси. Изображение формировалось на поверхности детектора с помощью двух отверстий 2 (на рис.1, а показано одно из них, второе расположено за плоскостью рисунка) диаметром 1 мм, закрытых поглотителями. Использование в качестве детектора 3 микроканальной пластины (МКП) с помещенным за ней люминесцентным экраном 4, позволило применить в качестве поглотителей прозрачные полистирольные пленки толщиной 1 и 2 мкм, поскольку МКП нечувствительна к излучению плазмы в оптическом диапазоне. Температура электронов в слое (в предположении их максвелловского распределения) определялась по отношению уровней сигналов на фотограммах двух изображений мишени, сформированных тормозным рентгеновским излучением, прошедшим через поглотители. Как показали оценки, при указанных поглотителях основной вклад в интенсивность излучения вносили тепловые электроны с энергией $\lesssim 1$ кэВ, что подтверждалось уменьшением уровня сигнала ниже порога регистрации при использовании в качестве поглотителя полистирольной пленки толщиной 24 мкм. Источником излучения в каждый момент времени являлась локальная область мишени 5, которую в этот момент пересекал нейтральный слой 6. При радиальном движении токового слоя эта область перемещалась по мишени, образуя на изображении "временную развертку" слоя, дающую информацию о динамике изменения температуры. Специальные измерения с мишенью, ориентированной вдоль оси объема показали, что на длине проекции мишени на ось z (≈ 40 мм) слой практически однороден.

Результаты описанных выше измерений приведены на рис.1, б, из которого видно, что температура электронов в слое T_e быстро (т.е. за время, малое по сравнению с временем существования слоя) растет, через ~ 100 нсек достигает максимального значения, затем резко падает.

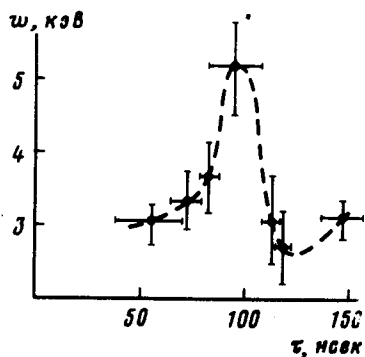


Рис.3. Динамика изменения эффективности механизма ускорения электронов в слое

3. В области высоких энергий ($\epsilon > 2$ кэВ), для анализа которой необходимо использовать более толстые поглотители, чувствительность описанного метода оказалась недостаточной. Поэтому динамика изменения

этой части электронного распределения была получена с помощью имеющего большую апертуру (диаметр входного отверстия 12 мм) шестиканального анализатора рентгеновского излучения, также выполненного на основе МКП [3]. Локальность измерений обеспечивалась малыми размерами ($5 \times 5 \text{ мм}^2$) мишени. Поток излучения из мишени в момент ее прохождения токовым слоем анализировался по энергиям методом поглотителей, в качестве которых использовались пленки полистирола толщиной 24, 48 мкм и алюминия, толщиной 7, 14, 21, 28 мкм. Вид спектра излучающих электронов, приведенный на рис.2, восстанавливался по токовым сигналам с выхода МКП [3]. Из рисунка видно наличие немасвелловского "хвоста" ускоренных частиц в диапазоне энергий $4 \div 12 \text{ кэВ}$. Эффективность ускорительного механизма можно характеризовать параметром $w = (\epsilon_2 - \epsilon_1) \lg^{-1} \left[\frac{dn}{d\epsilon}(\epsilon_2) / \frac{dn}{d\epsilon}(\epsilon_1) \right]$ ($\epsilon_1 = 4 \text{ кэВ}$, $\epsilon_2 = 12 \text{ кэВ}$), определяемым средним наклоном в логарифмическом масштабе спектра ускоренных частиц (в частности, для максвелловского вида спектра w совпадает с температурой).

На рис.3 приведена зависимость w от времени существования слоя τ с момента его возникновения на границе плазмы до прихода на мишень. При фиксированном положении мишени (на расстоянии $\Delta r = 3 \text{ см}$ от границы плазмы) различные значения $\tau = \Delta r / u$ получены путем изменения начальной концентрации плазмы, определяющей скорость движения слоя u . Из рисунка видно, что динамика изменения эффективности ускорения электронов близка к динамике нагрева тепловой части распределения.

4. Таким образом, экспериментально показано, что процесс энерговыделения в нейтральном токовом слое тета-пинча наиболее эффективно происходит на начальной стадии существования слоя. На этой стадии основные параметры процесса: температура тепловой части электронного распределения и эффективность ускорения надтепловых электронов, изменяются "вспышечным" образом (т.е. быстро одновременно достигают максимальных значений с последующим резким спадом) и могут существенно превышать средние за все время процесса энерговыделения в слое значения. Обнаруженная "вспышечная" динамика этого процесса наблюдалась в широком диапазоне начальных параметров (плотности плазмы и магнитного поля). Отметим, что подобные исследования, проводимые в нейтральном токовом слое в лабораторной плазме со сравнительно легко изменяемыми и контролируемыми параметрами, могут способствовать выяснению механизма энерговыделения в некоторых астрофизических явлениях, например, в солнечных вспышках.

Сибирский институт земного
магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
7 апреля 1981 г.

Литература

[1] М.В.Бабыкин, А.И.Жужунашвили, С.С.Соболев. ЖЭТФ, 60, 345, 1971.

[2] А.Т.Алтынцев, В.И.Красов. Физика плазмы, 5, 906, 1979.

[3] А.Т.Алтынцев, В.И.Красов, И.Б.Максютов, В.Л.Паперный. Приборы
и техника эксперимента, №6, 159, 1978.
