

ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК-10

А.Б.Берлизов, Н.Л.Васин, В.П.Виноградов,
Е.П.Горбунов, Ю.Н.Днестровский, В.С.Заверяев,
А.Б.Извозчиков, С.Е.Лысенко, Г.Е.Ножкин,
М.П.Петров, Г.Н.Попков, К.А.Разумова,
В.С.Стрелков, Д.А.Щеглов

На установке Токамак-10 при магнитном поле 35 кэ, токе 0,4 Ма длительностью до 1 сек получена плазма с плотностью $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, температурой электронов $\sim 1 \text{ кэВ}$, ионов $\sim 0,7 \text{ кэВ}$, выходом нейтронов до $3 \cdot 10^9$ за разряд. Время удержания энергии $\sim 80 \text{ мсек}$, проводимость плазмы до $7 \cdot 10^{16} \text{ CGSE}$.

1. Установка Т-10 представляет собой токамак круглого сечения с медным кожухом и сплошным сильфонным лайнером. Большой радиус тора (R) – 150 см, малый радиус лайнера (a_d) – 39 см. Радиус отверстия диафрагмы (a) – 36,7 см. После пуска установки в середине 1975 года в процессе комплексной наладки были проведены измерения основных параметров плазмы. Эксперименты проводились при половинной мощности системы питания тороидального поля, что соответствует напряженности магнитного поля на оси системы (H_z) – 35 кэ (номинальное значение – 50 кэ). Максимальная амплитуда тока разряда достигала 500 кА, большая часть опытов проведена при токе до 400 кА, что соответствует значению коэффициента запаса устойчивости $q = \frac{H_z}{H_\phi} \frac{a}{R} \sim 4$ (H_ϕ – поле тока).

Математическое моделирование процессов термоизоляции и нагрева плазмы в установке Т-10 показало, что значение энергетического времени при токе 400 кА для ожидаемых значений концентрации плазмы и нейтральных атомов будет около 100 мсек [1]. Расчетное значение предельно достижимой температуры ионов на оси шнура оказалось меньше, чем следует из формулы Арцимовича [2]. Отклонение от этой формулы для Т-10 объясняется малой разностью температуры ионов и электронов при плотности выше $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1), а также эффектами, связанными с дополнительным охлаждением ионов в результате процессов перезарядки и наличия гофрировки тороидального поля.

Эксперименты проводились на водороде и дейтерии. Регистрировались электротехнические параметры разряда: ток, напряжение, смещение центра плазменного шнура относительно центра медного кожуха. Концентрация электронов измерялась микроволновым радиоинтерферометром на длинах волн 2,3 и 0,9 мм. Температура электронов в центре плазменного шнура (T_e) измерялась по спектру рассеянного света лазера, а температура ионов (T_i) по спектру быстрых атомов перезарядки в диапазоне энергий $(2 + 8) kT_i$. Кроме того, температура ионов в центре плазменного шнура в разрядах на дейтерии вычислялась по интенсивности выхода термоядерных реакций и измеренной

плотности плазмы. Проводились измерения интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

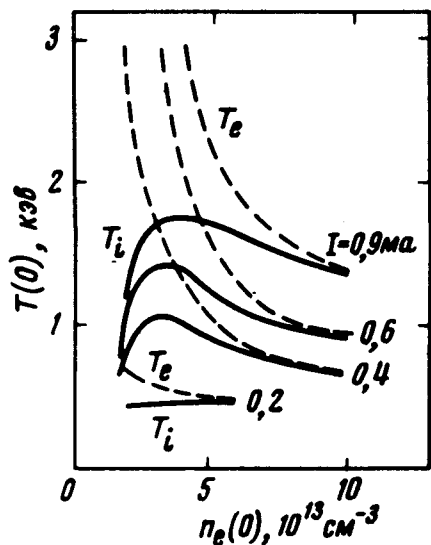


Рис. 1. Расчетные зависимости максимальной температуры электронов и ионов от концентрации электронов при различных токах для водорода

Следует отметить, что в разрядах, как на дейтерии, так и на водороде в момент срыва тока наблюдалось нейтронное излучение, по-видимому, связанное с (γ, n) реакцией на материале диафрагмы [3]. Это излучение было коррелировано во времени со вспышкой жесткого рентгена. На рис. 2 приведены осциллограммы тока и сигнала нейтронного счетчика для двух разрядов на дейтерии. В случае (а), где в результате резкого срыва тока в конце процесса ускоренные электроны выходят на диафрагму, имеется жесткое рентгеновское излучение и всплеск интенсивности нейтронов нетермоядерного происхождения. В случае (б) срыв тока отсутствует и нет пика нейтронного излучения в конце процесса. В этом случае весь нейтронный поток мы связывали с $(d-d)$ реакциями.

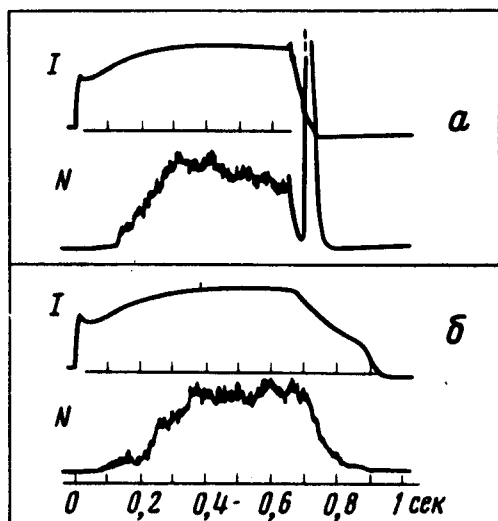


Рис. 2. Осциллограммы тока и нейтронного излучения: а — для разряда со срывом; б — для разряда без срыва тока

Сравнение температуры ионов по спектру атомов перезарядки (T_i) и нейтронному выходу (T_{iN}) проводилось при следующих предположениях: эффективный заряд $Z_{eff} = 1 + 3$, распределение концентрации по радиусу описывается выражением $n_e(0)(1 - (r/a_D)^2)$, распределения температуры ионов мы брали в виде $T_i(0)(1 - (r/a)^2)$ и $T_i(0)(1 - (r/a)^4)$, исходя из данных моделирования и экспериментов на других установках токамак.

Абсолютные измерения потока атомов перезарядки показали, что плотность нейтральных частиц в центре плазмы $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$.

Для получения высокой плотности плазмы в некоторых экспериментах на стационарной стадии разряда производилась дополнительная инжекция нейтрального газа. На рис. 3, где приведены осциллограммы тока, концентрации электронов, нейтронного выхода и ход температуры плазмы во времени, момент инжекции обозначен стрелкой. После инжекции наблюдается скачок концентрации электронов, а также спад температуры плазмы и интенсивности нейтронного потока. Вторичный рост интенсивности связан с увеличением плотности дейтронов и ростом их температуры. Указанный на рисунке разброс T_{iN} соответствует разным предположениям о характере распределения $T_i(r)$ и величине Z_{eff} (кривая (1) — $T_i(r) = T_i(0) \cdot (1 - r^2/a^2)$, $Z_{eff} = 3$, кривая (2) — $T_i(r) = T_i(0)(1 - r^4/a^4)$, $Z_{eff} = 1$).

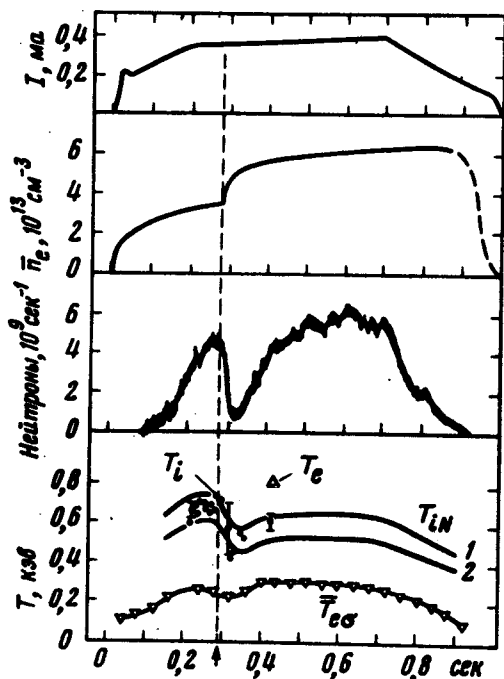


Рис. 3. Параметры плазмы в режиме с дополнительным напуском дейтерия

Легко получить, что в случае параболического распределения электронной температуры по сечению шнура, температура в центре шнура T_e связана с температурой $T_{e\sigma}$, вычисляемой из средней по сечению электропроводности соотношением:

$$T_e = 1,85 Z_{eff}^{2/3} \overline{T_{e\sigma}}$$

Для значений T_e и $\overline{T_{e\sigma}}$, приведенных на рис. 3, Z_{eff} оказался равным 1,8. Для различных разрядов значения Z_{eff} лежат в диапазоне 1 + 3,5.

В рамках предположения о параболическом распределении T_e , T_i и n_e и имеющихся данных о средней концентрации плазмы и температуре в центре можно оценить время удержания энергии τ_E . На рис. 4 приведена зависимость энергетического времени в установке Т-10 от величины $a^2 H \phi$; там же приведены данные для других установок. Разброс значений τ_E при данном $a^2 H \phi$ для Т-10 обусловлен предположениями о различных законах распределения параметров плазмы по сечению шнура и неопределенностью в учете индуктивной составляющей напряжения. Прямая линия соответствует эмпирической зависимости $\tau_E = 3,6 \cdot 10^{-8} a^2 H \phi$, полученной в [4].

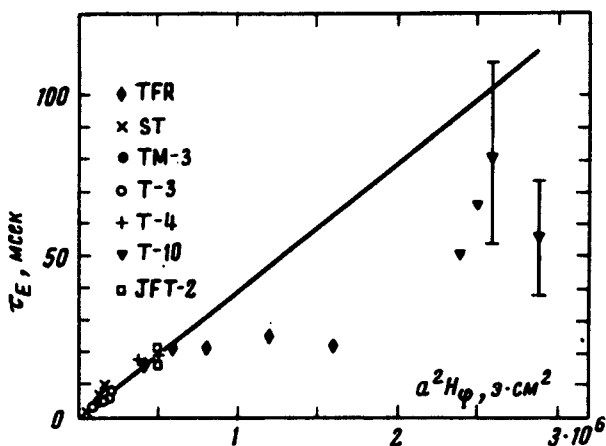


Рис. 4. Зависимость времени удержания энергии τ_E от параметра $a^2 H \phi$ для различных установок типа токамак

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность большому коллективу сотрудников, обеспечивших запуск установки и проведение экспериментов, академикам Е.П.Велихову и Б.Б.Кадомицеву за многочисленные дискуссии и помощь в работе.

Поступила в редакцию
20 марта 1976 г.

Литература

- [1] Ю.Н.Днестровский, С.Е.Лысенко. Препринт ИАЭ-2566, 1975.
- [2] Л.А.Арцимович, А.В.Глухов, М.П.Петров. Письма в ЖЭТФ, 11, 449, 1970.
- [3] TFR Group, VII Europ. Conf. Contr. Fus. Plasma Phys. Losanna, 1, 2, 1975.
- [4] Е.Р.Gorbunov, S.V.Mirnov, V.S.Strelkov. Nucl. Fusion, 10, 43, 1970.