

04

Исследование выключения тока в токамаке T-10 методом пеллет-инжекции

© В.М. Тимохин, Б.В. Кутеев, В.Ю. Сергеев

С.-Петербургский государственный технический университет
E-mail: timokhin@phtf.stu.neva.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2001 г.

С целью изучения процессов, происходящих при выключении разряда, в омическом режиме токамака T-10 производилась инжекция большого количества ($\sim 10^{19}$ атомов) тяжелой примеси KCl в виде пеллет. В экспериментах наблюдалось падение тока более чем в два раза со средней скоростью 12 MA/s, что соответствует значительному (более 75%) уменьшению магнитной энергии плазменного шнура. Обнаружены явления, свидетельствующие в пользу генерации убегających электронов во время спада тока.

Быстрый вывод тепловой и магнитной энергии из плазмы необходим и полезен как в аварийных, так и в стандартных режимах работы токамака-реактора [1]. Это определяет повышенный интерес к изучению теоретических [2,3] и экспериментальных [4–6] аспектов данной проблемы на современных установках. Результаты инжекции KCl пеллет, содержащих до $3 \cdot 10^{18}$ атомов, с целью выключения разряда токамака T-10 подробно описаны в [7].

В работе приводятся первые данные о поведении плазмы токамака T-10 в условиях инжекции на порядок большего количества тяжелой примеси KCl ($\sim 10^{19}$ атомов), приводящей к выводу значительной части тока разряда. Эксперименты проводились в омическом режиме на квазистационарной стадии разряда со следующими основными параметрами перед инжекцией: ток по плазме $I_p = 280$ kA, напряжение на обходе $U_l = 1.3$ V, магнитное поле $B_t = 2.1$ T, радиус диафрагмы $a_L = 0.3$ m, температура в центре плазменного шнура $T_e(0) \sim 1$ keV, средняя по объему электронная плотность $\bar{n}_e \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

Схема экспериментов подробно описана в [8]. Примесь инжектировалась в плазму сверху вниз в направлении центра плазменного шнура в виде нескольких (порядка 10) пеллет из KCl с размерами 0.1–0.3 mm и скоростями $V_p = 100$ –150 m/s. Пеллеты испарялись на периферии плазмы при значениях малого радиуса $a_L \leq 20$ cm.

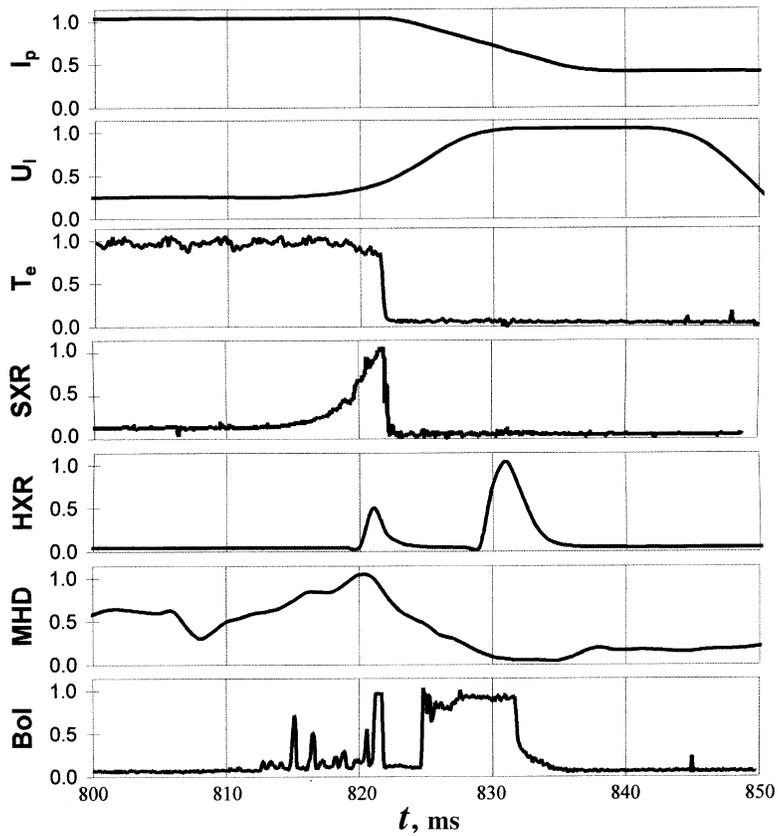


Рис. 1. Временная эволюция основных параметров плазмы при инъекции KCl в разряд 27528.

Временная эволюция сигналов основных диагностик для типичного разряда представлена на рис. 1. Все сигналы нормированы на максимальное значение параметра в интересующем нас временном интервале. Электронная температура на четверти малого радиуса $T_e(a_L/4)$ измерялась гетеродинным приемником второй гармоники излучения электронного циклотронного резонанса (ЭЦР); сигнал мягкого рентгеновского излучения (SXR) соответствовал излучению вдоль центральной хорды.

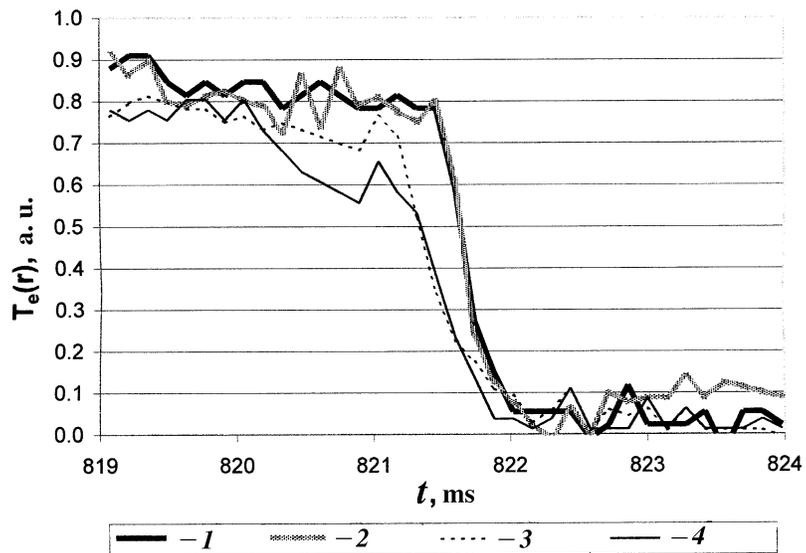


Рис. 2. Временная эволюция профиля электронной температуры при инжекции KCl в разряд 27528: 1 — $r = 4.6$ cm, 2 — $r = 10.7$ cm, 3 — $r = 15.9$ cm, 4 — $r = 18.7$ cm.

Также анализировались сигналы датчика жесткого рентгеновского излучения (HXR), МГД зондов (MHD) и одного из периферийных каналов линейки быстрых болометров (Vol).

Примесь начинает вводиться в плазму на 812.6 ms, что хорошо видно по сигналу болометра. Пики на сигнале соответствуют моментам испарения и ионизации отдельных пеллет. Параметры плазмы изменяются незначительно, примерно до 821 ms, когда в плазму попадает основная часть примеси. В этот момент (821.2 ms) сигнал болометра достигает значений, близких к максимальным, и держится на этом уровне 0.5 ms. Одновременно происходит резкий спад электронной температуры вместе со спадом сигналов датчиков мягкого рентгена. Температура падает практически до нуля и остается на этом уровне в течение всей дальнейшей эволюции. Таким образом, временной промежуток 813–821 ms соответствует стадии вывода тепловой энергии из плазмы (см. [7]).

Анализ эволюции профиля электронной температуры в период ее резкого спада (рис. 2) указывает на быстрое проникновение примеси в центральную область плазменного шнура, что следует из практически одновременного падения электронной температуры по всем каналам. Оценки показывают, что коэффициенты переноса при этом возрастают по сравнению с квазистационарными значениями ($D \sim 1 \text{ м}^2/\text{с}$) по крайней мере на порядок. Это подтверждает вывод работы [7] о зависимости величины возмущения коэффициентов переноса от количества инжектированной примеси.

После окончания фазы вывода тепловой энергии разряда начинается стадия спада тока [7]. Уменьшение тока происходит на фоне роста напряжения на обходе. Ток начинает спадать примерно на 822 ms и уменьшается в течение 15 ms со средней скоростью 12 MA/s до значений $\sim 100 \text{ кА}$ (рис. 1). Спад тока в 2.5 раза соответствует уменьшению энергии полоидального магнитного поля более чем на 75%.

С 825 по 832 ms сигнал болометра примерно постоянен и близок к максимальному значению. В этот период происходит переизлучение энергии магнитного поля тока примесью, что видно по постоянному его убыванию. Обращает на себя внимание низкий (всего в два-три раза выше квазистационарного) сигнал болометра в начале стадии спада тока (с 822 по 825 ms). Можно предположить, что энергия тока при этом перекачивается в убегающие электроны (возможно, по механизму лавинного размножения при близких столкновениях [9]) с последующим ее переизлучением в диапазонах, недоступных для регистрации имеющимися рентгеновскими датчиками ($< 1 \text{ MeV}$). Характерна в этом смысле вспышка жесткого рентгена на 830–835 ms. Мы связываем ее с достижением на этом временном интервале популяцией убегающих электронов энергий, регистрируемых датчиком жесткого рентгена (1–3 MeV). Отметим также более раннюю вспышку жесткого рентгеновского излучения на 820–822 ms (непосредственно перед резким падением электронной температуры), вероятно, связанную с потерей популяции убегающих электронов, существовавших в разряде до инжекции примеси. Эти потери могут происходить вследствие резкого изменения условий в плазме или возрастания ее МГД активности. В пользу последнего свидетельствует неплохое соответствие момента первой вспышки НХР максимуму МГД активности плазмы. В момент второй вспышки МГД сигнал минимален, механизм потерь убегающих электронов, по-видимому, другой.

Плавный спад сигнала болометра после 832-й ms при продолжающемся выводе тока можно объяснить уменьшением энергосодержания плазмы, диффузионным уходом излучающей примеси на стенки, а также продолжающейся генерацией убегающих электронов.

На 840 ms падение тока прекращается на уровне 100 kA и разряд выходит к новому квазистационарному состоянию с минимальным энергосодержанием. Прекращение спада тока, возможно, связано с диффузионным уходом примеси из плазмы. В пользу этого свидетельствует спад напряжения обхода при постоянном токе в финальной стадии эволюции. Также не исключен вариант, при котором основная часть оставшегося тока по плазме в конце разряда переносится убегающими электронами. Отметим, что насыщение сигнала напряжения обхода с 835 по 840 ms, очевидно, определяется переполнением регистров аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Максимальный регистрируемый сигнал на выходе сглаживающего фильтра с постоянной времени 30 ms соответствует напряжению на обходе на уровне 6 V.

Проведенные эксперименты с инжекцией в плазму большого количества тяжелой примеси KCl продемонстрировали, помимо полного вывода тепловой составляющей энергии плазмы, вывод более чем 75% энергии полоидального магнитного поля. Обнаруженные две вспышки жесткого рентгеновского излучения в процессе гашения указывают на интенсивную генерацию убегающих электронов в процессе гашения разряда. Отмечено быстрое проникновение примеси в центральные области плазменного шнура.

Авторы выражают признательность коллективу T-10 за помощь в экспериментах и предоставленную возможность работать с базой данных.

Работа поддержана грантами: Министерства науки "Поддержка аспирантов" № 375, INTAS 95-0575, 97-11004, RFBR 99-02-1764.

Список литературы

- [1] *Physics and plasma operation studies*. ITER Report S CA4 RE2.
- [2] Kuteev B.V., Sergeev V.Yu., Sudo S. // *Nuclear Fusion*. 1995. V. 10. P. 1167.
- [3] Putvinski S., Fujisawa N., Post D. et al. // *J. Nucl. Mat.* 1997. V. 241-243. P. 316.
- [4] Pautasso G., Buchl K., Fuchs J.C. et al. // *Nuclear Fusion*. 1996. V. 36. P. 1291.
- [5] Yoshini R., Tokuda S., Kawano Y. // *Nuclear Fusion*. 1999. V. 39. P. 151.

- [6] *Jardin S.C., Schmidt G.L., Fredrickson E.F. et al. // Nuclear Fusion. 2000. V. 40. P. 923.*
- [7] *Тимохин В.М., Сергеев В.Ю., Кутеев Б.В. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 3. С. 1.*
- [8] *Egorov S.M., Kuteev B.V., Miroshnikov I.V. et al. // Nuclear Fusion. 1992. V. 32. P. 2025.*
- [9] *Соколов Ю.А. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. С. 244.*