

## РЕЖИМ УЛУЧШЕННОГО УДЕРЖАНИЯ В ТОКАМАКЕ Т-10, ВЫЗВАННЫЙ ИНЖЕКЦИЕЙ МЕДЛЕННОГО ВОДОРОДНОГО ПЕЛЛЕТА

*В.Г.Капралов, В.А.Рожанский, К.В.Хлопенков*

Типичной чертой режима улучшенного удержания ( $H$ -режима) в токамаке является образование областей с резким градиентом концентрации плазмы вблизи сепаратрисы или последней замкнутой магнитной поверхности (LCFS) [1]. В этих областях перенос частиц оказывается существенно подавленным за счет шира вращения, вызванного неоднородным радиальным электрическим полем [2]. Согласно теоретическим представлениям, развитым в [3,4], радиальное электрическое поле с большим широм, а следовательно режим с улучшенным удержанием, возникает в следующих случаях:

- 1) при наличии достаточного количества пролетных частиц вблизи LCFS,
- 2) при создании в пристеночной плазме сильного радиального электрического поля с помощью заряженного электрода,
- 3) при наличии вблизи LCFS достаточно резкого профиля концентрации и температуры.

Реализации  $H$ -режима в экспериментах с дополнительным нагревом и с заряженным электродом уже сравнительно хорошо изучены на многих токамаках [1]. Идея же перехода в  $H$ -режим при создании в пристеночной плазме резкого градиента концентрации при инжекции медленных пеллетов, основанная на теоретических представлениях [3,4], была целенаправленно реализована на токамаке ТУМАН-3 [5], что послужило причиной обработки данных с медленными пеллетами на Т-10, которые ранее не были подробно изучены. В настоящей работе сообщается о получении улучшенного удержания в токамаке Т-10 при инжекции медленного пеллета в водородную, нагретую с помощью электронного циклотронного резонанса (ЭЦРН) плазму. Полученный режим, в соответствии с [5], будем называть РСН (Pellet-Caused  $H$ -mode) режимом.

Токамак Т-10 является токамаком средних размеров с круговым сечением и металлической камерой без диверто-

### Параметры разрядов

Номер импульса	51173	49961
Магнитное поле, $B_T$	2.75 Тл	2.99 Тл
Радиус диафрагмы, $a_L$	30 см	28 см
Ток плазмы, $I_p$	195 кА	220 кА
Мощность ЭЦРН	1750 кВт	-
Длительность ЭЦРН	150 мс	-
Скорость пеллета, $v_p$	280 м/с	650 м/с
Материал пеллета	$D_2$	$H_2$

ра. Основные параметры плазмы для рассмотренных разрядов приведены в выводе. Твердородородный инжектор представлял собой на момент проведения экспериментов одноствольную легкогазовую пушку с поворотным центральным блоком и заливным криостатом. Конструкция инжектора позволяла получать твердородородные пеллеты размером  $\varnothing 1.35 \times 1.35$  мм со скоростями до 750 м/с при давлении ускоряющего газа 40–60 атм.

Инжектор был подсоединен через систему дифференциальной откачки и быстродействующий шиберный затвор к патрубку токамака E-10 под углом  $+30^\circ$  к экваториальной плоскости. Для пространственно-временной привязки наблюдаемых сигналов к положению пеллета инжектор был оборудован световым барьером на выходе ствола и коллимированными фотоприемниками, расположенными на верхнем вертикальном патрубке токамака. На выходе последних появлялся сигнал в момент пересечения светящимся облаком от пеллета соответствующей хорды наблюдения. Для регистрации интенсивности свечения облака на горизонтальном патрубке был установлен обзорный фотоприемник. Все фотоприемники обладали быстродействием не хуже 1 мкс.

В одном сечении с инжектором был расположен восьмиканальный интерферометр для измерения среднехордовой концентрации плазмы по каждой из хорд. Он позволял получить 8000 отсчетов среднехордовой концентрации электронов по каждому каналу за разряд.

Практически в том же сечении располагался также супергетеродинный восьмиканальный приемник излучения плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Период между двумя последовательными отсчетами данных об электронной температуре составлял 1 мс, что обеспечивало 1000 отсчетов на разряд.

В соседнем сечении токамака (поворот на  $90^\circ$  по тороидальному углу) были расположены три камеры обскуры

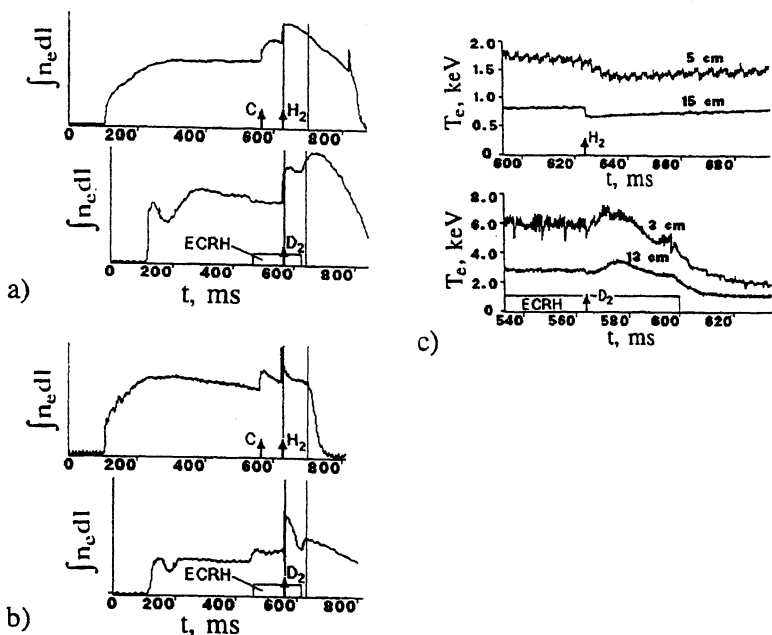
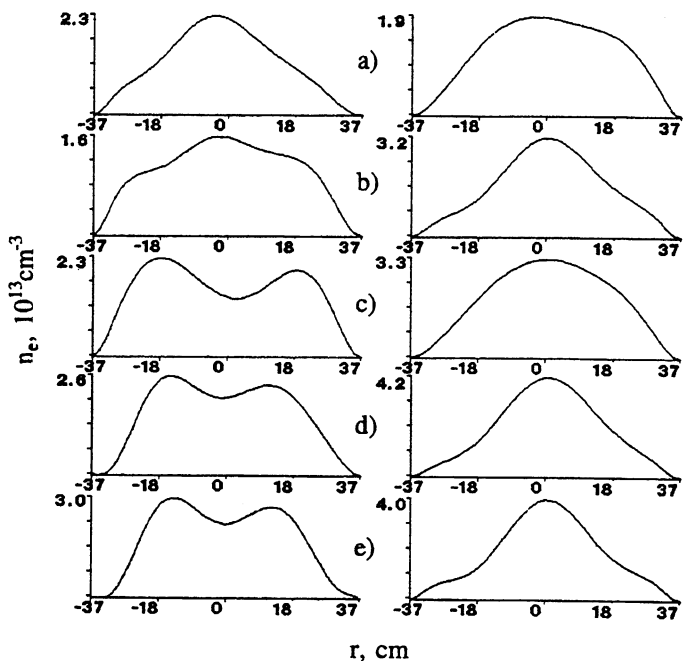


Рис. 1. Эволюция среднехордовой концентрации электронов по центральной (а) и периферийной (б) хордам и электронной температуры (с) на двух радиусах. Стрелками указаны моменты инъекции и материал пеллета. Верхние графики соответствуют импульсу #49961, нижние #51173.

для регистрации SXR излучения. Друг относительно друга они располагались с поворотом на  $120^\circ$  по азимутальному углу.

При повторном просмотре базы данных по инъекции пеллетов в T-10 был обнаружен импульс #51173 от 14 июля 1990 г., который отличался от обычных разрядов токамака осуществлением инъекции дейтериевого пеллета со скоростью 280 м/с в ЭПРН плазму с центральной электронной температурой перед инъекцией более 6 кэВ. Для того, чтобы показать основные отличия в эволюции параметров разряда в импульсе #51173, часть данных сопоставляется с результатами инъекции в плазму с омическим нагревом (импульс #49961).

На рис. 1 приводится изменение во времени среднехордовой концентрации и электронной температуры после инъекции, а на рис. 2 представлены профили электронной концентрации после абелизации. Из представленных графиков видно, что в случае с медленной инъекцией в ЭПРН плазму эволюция среднехордовой концентрации электронов по центральной и крайней хордам существенно отличаются от подобных сигналов после инъекции в омически нагреваемую



**Рис. 2.** Эволюция профилей электронной концентрации в импульсах #51173 (слева) и #49961 (справа): *a* — омиическая фаза разрядов, *b* — за 1 мс до инжекции, *c* — через 4 мс после инжекции, *d* — через 30 мс после инжекции, *e* — через 70 мс после инжекции.

плазму. Основное отличие связано с отсутствием экспоненциального или близкого к нему спада среднечордовой концентрации в центре. Сравнение профилей электронной концентрации показывает, что после инжекции в ЭЦРН плазму формируется П-образный профиль концентрации с небольшим прогибом в центре. Из сопоставления графиков эволюции электронной температуры видно, что после инжекции в ЭЦРН плазму начинается быстрый прогрев, в результате которого температура уже через 10 мс после инжекции превышает температуру до инжекции.

Ранее для импульса #51173 были установлены также следующие отличительные черты [6,7]: большая скорость растекания плотности от испарившегося пеллета в тороидальном направлении и отсутствие на сигналах SXR обычного спада интенсивности после инжекции (вместо них присутствуют кратковременные вспышки интенсивности SXR излучения во время испарения пеллета и симметризации профиля плотности).

Следует также отметить увеличенный и более продолжительный, чем в обычном разряде, пик на сигнале напряжения обхода, что согласуется с результатами работы [5].

Инжекция также инициирует горизонтальное смещение шнура, по амплитуде достигающее 2 см в направлении внешней стороны тора. К сожалению, в базе данных не сохранилась информация о сигнале интенсивности излучения плазмы на линии  $H_\alpha$ .

Как уже было отмечено, одним из основных признаков режима улучшенного удержания является формирование профилей концентрации с резким градиентом в районе последней замкнутой поверхности. Результаты реконструкции профилей концентрации показывают, что такая форма профиля возникает практически сразу после инъекции и существует 33 мс до момента выключения ЭПРН и далее в течение еще 40 мс.

Предположительно разрушение РСН моды вызывается смещением области с большим широм от края плазменного шнура сразу после инъекции к 23 см по радиусу через 70 мс после инъекции.

Подсчет интеграла энергии в разряде с РСН модой дает ее увеличение в 1.53 раза, тогда как для обычного импульса запасенная энергия не изменяется в пределах погрешности вычислений. При этом общее число частиц в импульсе с РСН модой увеличивается в 1.81 раза, а в сопоставляемом обычном разряде в 1.42 раза.

На рис. 3 показаны отношения электронного давления плазмы и концентрации через 7 мс после инъекции к доинжекционным значениям для импульса #51173 и #49961. Из приведенных графиков видно, что основным различием между импульсами является расположение максимума относительного увеличения концентрации и электронного давления (периферия для РСН моды и 20 см для обычного разряда).

Сравнение параметров разряда #51173 ( $\log P_{\text{tot}} = 0.1$  и  $\log(20n_e V_T R^{2.5}) = 0.3$ ) с базой данных ITER [8] показывает, что в данном разряде мощность дополнительного нагрева превышала пороговую (около 800 кВт), необходимую, согласно [8], для перехода в  $H$ -режим.

В данной работе показано, что инъекция медленного пеллета в ЭПРН плазму токамака  $T-10$  вызывает переход разряда в режим улучшенного удержания. При этом резко увеличивается градиент концентрации на периферии плазменного шнура и формируется П-образный профиль плотности, который продолжает существовать и после выключения ЭПРН. Энергосодержание плазмы увеличивается примерно в 1.5 раза.

Данное явление можно объяснить, применяя теорию  $L-H$  перехода, согласно которой резкое увеличение градиента концентрации в районе последней замкнутой магнит-

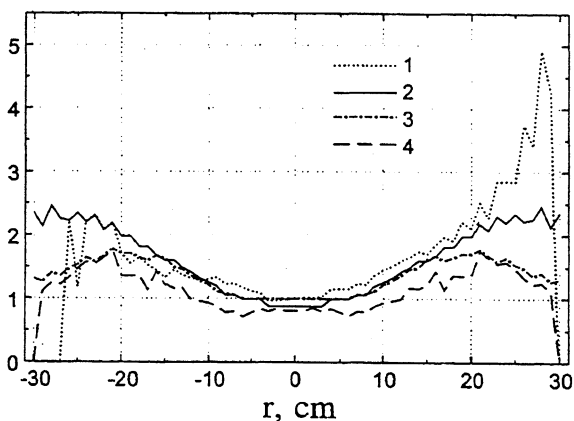


Рис. 3. Профили отношений электронного давления плазмы (1 — импульс #51173, 3 — импульс #49961) и электронной концентрации (2 — #51173, 4 — #49961) через 7 мс после инъекции к доинжекционным значениям.

ной поверхности приводит к возникновению сильного электрического поля в этой области и соответственно большого шира, что подавляет неустойчивости и увеличивает время жизни частиц и тепла в разряде.

Сделанные выводы позволяют указать на целесообразность проведения экспериментов с инъекцией водородных пеллетов по нецентральной хорде или тангенциально к плазменному шнуру с целью определения порогов возникновения РСН моды при различных мощностях дополнительного нагрева, а также изучения внутреннего дрейфа области с сильным электрическим полем и большим широм.

Авторы выражают благодарность коллективу токамака T-10 за помощь в работе и предоставленные данные, в особенности авторы признательны за поддержку, оказанную А.А. Багдасаровым, Н.Л. Васиным, М.А. Паршиным и П.В. Резниченко. В работе было использовано программное обеспечение, предоставленное М.Л. Свойской, М.А. Соколовым, В.В. Темкиным. Полезные обсуждения состоялись с Н.Н. Ивановым и Б.В. Кутеевым.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ № 93-02-16905.

## Список литературы

- [1] *R.J. Groebner*. Phys. Fluids. B. 5, 2343 (1993).
- [2] *H. Biglari, P. Diamond and P. Terry*. Phys. Fluids. B. 2, 1 (1990).
- [3] *В.А. Рожанский, М. Тендлер*. Письма в ЖЭТФ. 53, 80 (1991).
- [4] *V. Rohansky and M. Tandler*. Phys. Fluids. B. 4, 1877 (1992).
- [5] *L.G. Askinazi, V.E. Golant, S.V. Lebedev et al.* Phys. Fluids. B. 5, 2420 (1993).
- [6] *V.G. Karalov, B.V.Kuteev, M.A. Parshin et al.* 18th EPS Conf. on CFPP. Berlin, 3-7 June, 1991, I-345.
- [7] *V.G. Kapralov, B.V.Kuteev, M.A. Parshin et al.* 18th EPS Conf. on CFPP. Berlin, 3-7 June, 1991, I-337.
- [8] *F. Ryter* and H-Mode Database Working Group. Draft. 21th EPS Conf. on CFPP. Montpellier, 1994.

Поступило в Редакцию  
11 января 1995 г.

---