

04

©1995

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОМИЧЕСКОЙ H-МОДОЙ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

*М.В.Андрейко, Л.Г.Аскинази, В.Е.Голант,
В.А.Корнев, С.В.Лебедев, Л.С.Левин*

В 1993 г. была осуществлена модернизация токамака ТУМАН-3М [1], направленная на увеличение плазменного тока, магнитного поля и длительности разряда. Геометрические размеры камеры модернизированного токамака ТУМАН-3М остались прежними: большой радиус $R = 55$ см, малый $a = 25.5$ см, высота стационарных полоидальных кольцевых диафрагм 1.5 см. Камера изготовлена из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Часть камеры, находящаяся в области сильного тороидального магнитного поля, изготовлена из сваренных между собой сильфонов разных диаметров. Благодаря этому камера имеет большое электрическое сопротивление для токов, текущих в полоидальном направлении. Высокое электрическое сопротивление новой камеры и значительно бóльший запас механической прочности позволят получать разряды в тороидальном магнитном поле до 2 Тл при токах по плазме до 220 кА.

Значительной модернизации подверглась система электромагнитной диагностики параметров плазмы. Число различных датчиков было увеличено, и теперь в состав электромагнитной диагностики входят, помимо традиционных поясов Роговского, зондов Мирнова, диамагнитных петель и датчиков горизонтального и вертикального потоков, датчики формы внешней магнитной поверхности и градиентные датчики. Отличительной особенностью конструкции является то, что датчики потоков и напряжения на обходе выполнены из термостойкого кабеля и закреплены непосредственно на наружной поверхности вакуумной камеры. Все остальные датчики закреплены на внутренней поверхности катушек тороидального соленоида. Пояса Роговского и датчики диамагнитного сигнала закреплены на внутренней поверхности катушек тороидального соленоида, что позволяет стабилизировать на приемлемом уровне наводки от рассеянных полей.

Для сбора и хранения экспериментальных данных на токамаке ТУМАН-3М создан автоматизированный комплекс на основе IBM/PC/286-совместимой ПЭВМ. Выходные сигналы диагностик подаются на быстродействующие АЦП типа ФК4225, установленные в крейтах КАМАК. Связь между

магистральями крейтов и ПЭВМ осуществляется с помощью последовательных контроллеров крейтов. В стандартном режиме применяется частота тактирования АЦП 33 кГц, что при объеме ОЗУ 4 К позволяет записывать с достаточным для большинства диагностик временным разрешением эволюцию параметров плазмы в течение $\cong 120$ мс. Максимальная частота тактирования применяемых АЦП 1 мкс, что дает возможность исследовать достаточно быстрые процессы. В этом случае для увеличения времени записи применяются модульные запоминающие устройства емкостью 64 К. Максимальный объем информации, записываемой в одном импульсе, 1.5 Мбайт.

Первые эксперименты с новой разрядной камерой были проведены весной 1994 г. В этих экспериментах не применялось никаких покрытий внутренней поверхности камеры. Использовалась только стандартная для ТУМАН-3 процедура прогрева и чистки индукционным разрядом [1]. Был получен хорошо воспроизводящийся омический разряд в дейтерии длительностью ≤ 70 мс со следующими параметрами: тороидальное магнитное поле $B_T \leq 7$ кГс, ток по плазме $I_p \leq 100$ кА (максимальное достигнутое значение — 140 кА), среднечордовая плотность плазмы $\bar{n} \leq 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³. На рис. 1 приведены временные зависимости основных параметров плазмы. Напряжение на обходе плазменного шнура в квазистационарной фазе разряда составляло $\cong 3$ В, что свидетельствует о значительном содержании примесей в плазме. На 28-й мс происходил переход в *H*-моду, что проявлялось в спаде свечения линии D_α при одновременном росте плотности плазмы. Для инициирования перехода, как и до модернизации [2], применялся дополнительный импульсный напуск рабочего газа. Длительность инициирующего импульса составляла 3–5 мс, а количество вносимого при этом в плазму вещества было незначительно по сравнению с полным числом частиц в разряде. В результате улучшения удержания частиц после перехода в *H*-моду плотность плазмы увеличивалась до $\cong 3 \cdot 10^{19}$ м⁻³. Улучшенное удержание сохранялось в течение 25–30 мс, после чего происходил обратный переход и срыв. Причиной срыва, возможно, является накопление примесей в центральной части шнура в результате улучшения удержания частиц. Об этом свидетельствует начинающийся через 3–4 мс после перехода в *H*-моду постепенный рост напряжения на обходе разряда.

Использование новой электромагнитной диагностики плазмы и системы сбора и обработки данных значительно повысило надежность измерения тепловой энергии плазмы по диамагнитному эффекту. На рис. 2 приведены временные зависимости концентраций плазмы \bar{n}_e , свечения линии D_α , тепловой энергии плазмы W и времени удержания энергии τ_E в разряде с двумя последовательными переходами в

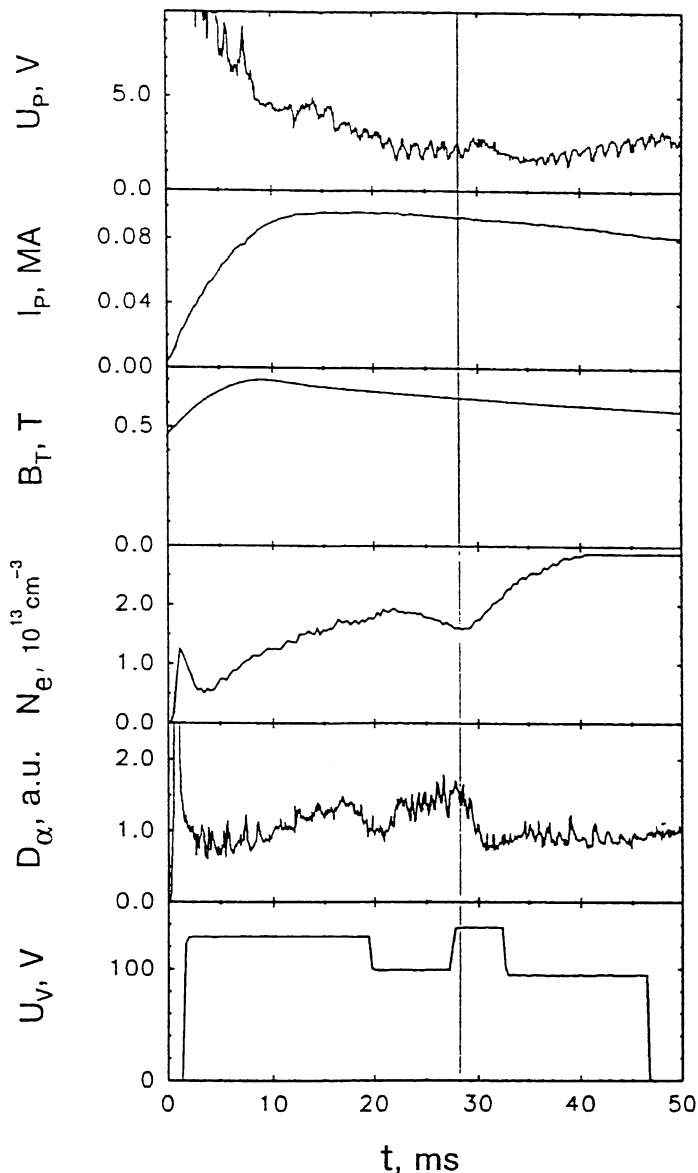


Рис. 1. Временные зависимости параметров плазмы в токамаке ТУМАН-3М: напряжение на обходе U_p , ток по плазме I_p , тороидальное поле B_T , среднечордовая электронная плотность N_e , свечение линии D_α и напряжение на клапане газонапуска U_v . Переход в H-моду — в момент времени $t = 28$ мс.

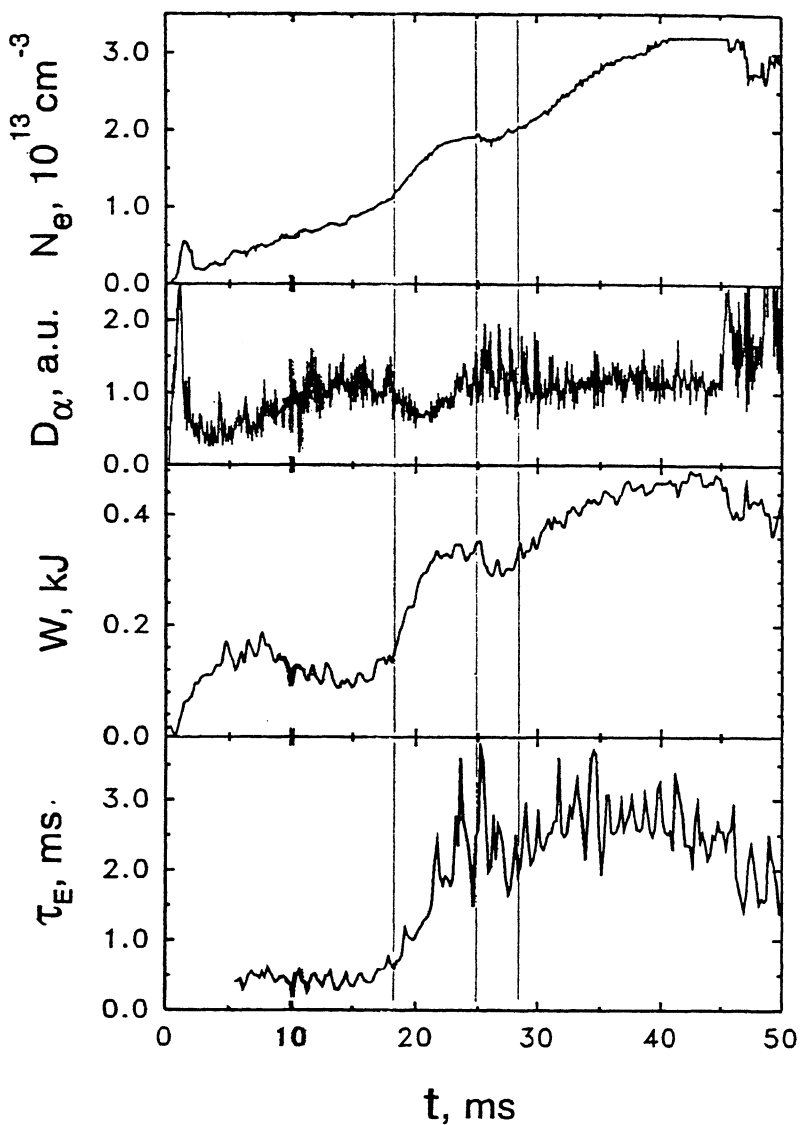


Рис. 2. Среднехордовая электронная плотность N_e , свечение линии D_α , тепловая энергия плазмы W , измеренная по диамагнитному эффекту, и время удержания энергии τ_E в разряде с двумя переходами в H-моду (при $t = 18$ и 28 мс).

H-моду. Первый переход произошел спонтанно на 18-й мс, через 7 мс плазма вернулась в состояние с обыкновенным удержанием, а на 28-й мс второй переход в *H*-моду инициировался импульсом газонапуска. Время удержания энергии вычислялось по формуле $\tau_E W / (U_p I_p - dW/dt)$, которая, разумеется, применима лишь на стационарной фазе тока по плазме. Поскольку эксперимент проводился в камере с неборированными стенками, время удержания энергии оказалось не слишком большим — $\cong 0.5$ мс в режиме омического нагрева и $\cong 2.5$ мс в *H*-моду.

Результаты первых экспериментов в модернизированном токамаке ТУМАН-3М свидетельствуют о хорошем качестве изготовления вакуумной камеры, дающем возможность получать воспроизводящиеся разряды с *H*-модой при токе ≤ 140 кА даже без применения специальных методов подготовки поверхности камеры. Использование борирования стенок разрядной камеры [3] позволяет надеяться на увеличение плазменного тока до проектного значения 200–220 кА. Основанием для этого служат эксперименты, проводившиеся ранее на токамаке ТУМАН-3 [4]. Испытание системы сбора данных показало достаточную ее надежность и возможность применения ее для исследования быстрых процессов, происходящих при *L–H* переходе.

В начатом осенью 1994 г. экспериментальном цикле предполагается исследовать скейлинг пороговой мощности нагрева при *L–H* переходе [5] и возможность инициирования *L–H* перехода с помощью инжекции макрочастиц на периферию плазмы [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда Сороса (грант № R2T000) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 93-02-16909 и 93-02-03342).

Список литературы

- [1] Воробьев Г.М., Голант В.Е., Лебедев С.В. и др. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 105–120.
- [2] Andrejko M.V., Askinazi L.G., Golant V.E. et al. // Proc. 14th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. Wurzburg, 1992. P. 485–494.
- [3] Azizov E.A., Buzhinskij O.J., Chernobaj A.P. et al. // Proc. 1992 Conf. on Plasma Phys. V. 16c. Pt I. P. 47–50.
- [4] Andrejko M.V., Askinazi L.G., Golant V.E. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 1994. V. 36. P. A165–A170.
- [5] Ryter F., Gruber O., Buchl K. // Proc. 20th EPS Conf. on contr. Fusion and Plasma Phys. Lisboa, 1993. V. 17c. Pt I. P. 23–26.