

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИНИЦИИРОВАНИЮ $H$ -РЕЖИМА УДЕРЖАНИЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТОКАМАКЕ "ТУМАН-3"

*Л.Г.Аскинази, В.Е.Голант, Е.Р.Итс, С.В.Крикунов, Б.М.Липин,  
С.В.Лебедев, К.А.Подушникова, В.В.Рождественский, Н.В.Сахаров,  
С.П.Ярошевич*

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР  
194021, Ленинград*

Поступила в редакцию 6 августа 1991 г.

В статье приведены результаты исследования влияния искусственно созданного радиального электрического поля на характеристики удержания плазмы в токамаке. Обнаружено, что радиальное поле может вызывать переход в  $H$ -режим удержания и обратно в режим обычного омического нагрева. Обнаружено значительное различие токов в цепи "электрод - плазма - стенка" при подаче напряжения разных полярностей.

В предыдущих экспериментах на токамаке "ТУМАН-3" был обнаружен спонтанный переход в режим улучшенного удержания энергии и частиц - "Омическая  $H$ -мода" <sup>1,2</sup>. Согласно имеющимся теоретическим представлениям <sup>3-7</sup> и экспериментальным наблюдениям <sup>8,9</sup> переход в  $H$ -режим сопровождается увеличением радиального электрического поля или его градиента в периферийной области плазмы. Целью данной серии экспериментов явилась проверка предположения о возможности инициирования  $H$ -режима при искусственном создании электрического поля на периферии. Радиальное поле создавалось с помощью изолированного электрода с молибденовым наконечником, вводимого на расстояние 3 - 4 см внутрь крайней замкнутой магнитной поверхности (КМП) с внешней стороны токамака. Максимальная площадь проекции наконечника на плоскость, перпендикулярную продольному магнитному полю, составляла 3 см<sup>2</sup>.

Опыты по приложению потенциала к электроду проводились в разрядах с типичными для ТУМАН'а-3 параметрами:  $B_t = 0,45$  Тл,  $I_p = 90$  кА,  $R/a = 0,53$  м/0,22 м,  $\bar{n}_e = (1 - 1,4) \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $T_{e0} = 0,3 - 0,4$  кэВ,  $T_{i0} = 0,1 - 0,14$  кэВ,  $Z_{eff} = 2$ . После наступления квазистационарной стадии разряда между электродом и стенками камеры прикладывалось напряжение (диафрагмы находились при потенциале камеры). Переход в  $H$ -режим происходил при подаче отрицательного напряжения выше 0,25 кВ ("-"  $H$ -режим), и положительного напряжения выше 0,5 кВ ("+"  $H$ -режим), рис.1. Однако эффект улучшения удержания выражен сильнее при инициировании  $H$ -режима с помощью отрицательного напряжения. В "-"  $H$ -режиме производная  $dN/dt$  больше, а свечение  $D_\alpha$ , пропорциональное источнику частиц, меньше. Оценка времен жизни частиц в "-"  $H$ -режиме, "+"  $H$ -режиме и режиме омического нагрева плазмы дает  $\tau_p^-/\tau_p^+/\tau_p^{0h} = 7,9$  мс/4,3 мс/2,5 мс. Более значительным при отрицательном поле оказывается и прирост интенсивности мягкого рентгеновского излучения, отражающего величину электронной температуры вблизи оси разряда, что качественно свидетельствует о большем увеличении  $\tau_E$  в этом случае. Отметим, что в экспериментах с дополнительным нагревом на Токамаке TEXTOR также наблюдался более сильный

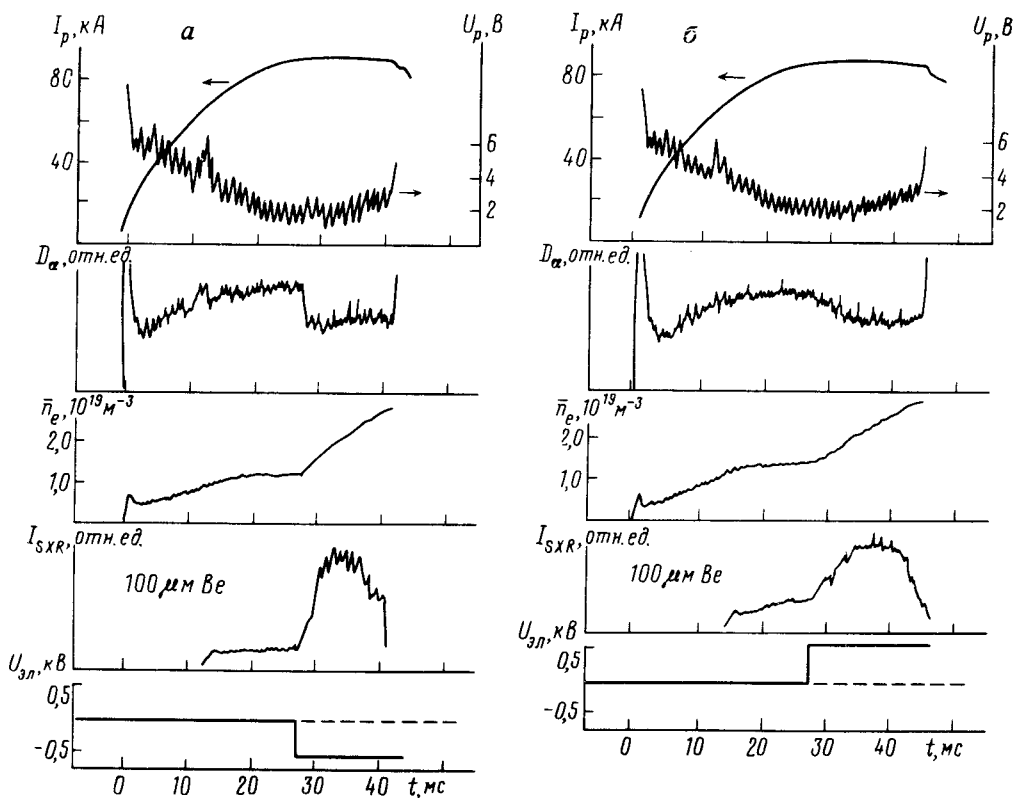


Рис. 1. Осциллограммы плазменного тока, напряжения на обходе, интенсивности свечения  $D_{\alpha}$ , средней плотности и интенсивности мягкого рентгеновского излучения в разрядах с  $H$ -модой, инициированной приложением отрицательного ( $a$ ) и положительного ( $b$ ) потенциала на электрод

рост  $\tau_p$  в "-"  $H$ -режиме, однако, в отличие от наших результатов, удержание энергии было выше в "+"  $H$ -режиме <sup>10</sup>.

Феноменология  $H$ -режима при отрицательной полярности приложенного напряжения совпадает со спонтанной "Омической  $H$ -модой" <sup>1</sup>. Это обстоятельство позволяет предположить, что естественный знак поля в "Омической  $H$ -моды" - отрицательный. Подтверждением справедливости такого предположения является эксперимент с подачей положительного потенциала на электрод в условиях "Омической  $H$ -моды", рис.2. После включения напряжения рост плотности и интенсивности мягкого рентгена прекращался, а свечение  $D_{\alpha}$  восстанавливалось до уровня исходного омического нагрева - происходило отключение режима улучшенного удержания. Такая эволюция параметров плазмы соответствует представлениям о наличии сильного радиального электрического поля на периферии в  $H$ -режиме и сравнительно малого поля в режиме с обычным удержанием. Причем при спонтанном возникновении режима улучшенного удержания ("Омическая  $H$ -мода") образующееся радиальное поле имеет отрицательный знак.

Для сопоставления с теоретическими моделями  $L-H$  перехода и прояснения механизмов переноса представляет интерес измерение радиальной проводимости плазмы на периферии. Такое измерение можно осуществить с помощью электрода, если он не ограничивает поперечное сечение плазмы, а его площадь достаточна для сбора тока, протекающего между магнитной поверхностью, на которой он расположен, и КМП. В нашем случае электрод был невелик и вводился внутрь КМП на такую глубину, чтобы без подачи напряжения

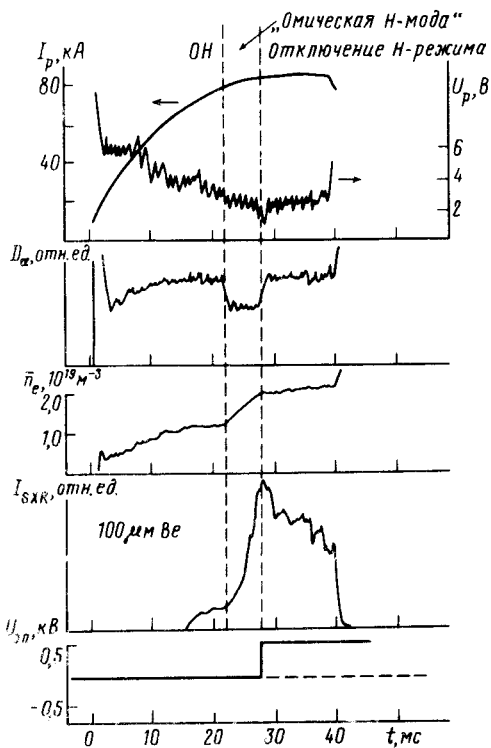


Рис.2

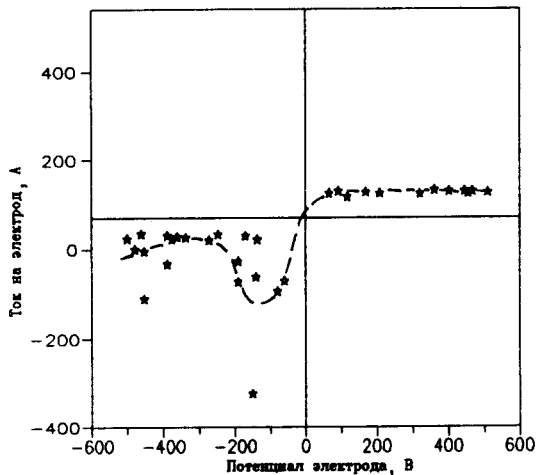


Рис. 3

Рис. 2. Осциллограммы плазменного тока, напряжения на обходе, интенсивности свечения  $D_{\alpha}$ , средней плотности и интенсивности мягкого рентгеновского излучения в разряде с отключением "Омической  $H$ -моды" при подаче положительного потенциала на электрод

Рис.3. Вольт-амперная характеристика цепи "электрод - плазма - стенка"

параметры плазмы ( $n_e(r)$ ,  $T_e(r)$ ,  $Z_{eff}$ ) не возмущались. При этом величина ионного тока насыщения должна быть

$$I_{i,нас} = en_i \cdot 0,6 \sqrt{T_e/m_i} \cdot 2S = 30 - 50 \text{ A},$$

здесь  $S$  - площадь поперечного сечения проводящей части электрода.  $I_{i,нас}$  составляет 20% заряда, переносимого ионной компонентой диффузионного потока  $eN/\tau_p$ . На рис.3 представлен результат измерения вольт-амперной характеристики для описанной ранее геометрии опыта. Здесь по оси абсцисс отложено приложенное к электроду напряжение (отличающееся от разности потенциалов, приложенной к плазме, на величину падения напряжения в приэлектродном слое). Особенностью характеристики являются большие токи при отрицательных полярностях, что отличается от данных, полученных на ССТ<sup>11</sup>. Ток на электрод в данном случае превышает ионный ток насыщения. Плотность радиального тока не удается объяснить в рамках неоклассической теории без привлечения предположения об аномальной вязкости и инерции<sup>3,7</sup>. Еще одной особенностью характеристики является выраженный спад тока при росте отрицательного напряжения. По-видимому, такой спад тока отражает различие свойств периферии в режимах с обычным и улучшенным удержанием. При этом обычному удержанию соответствует малое радиальное поле и большой ток, а  $H$ -режиму - большое радиальное поле и малый ток.

Таким образом наши эксперименты позволяют сделать следующие выводы: (1) радиальное поле, создаваемое на периферии внешним источником, приводит к переходу в  $H$ -режим независимо от полярности, (2) при спонтанном переходе в режим улучшенного удержания формируется отрицательное электрическое поле вблизи КМП, (3) приложение потенциала неблагоприятной (положительной) полярности отключает "Омическую  $H$ -моду", (4) при отрицательной полярности ток в системе "электрод - плазма - стенка" выше, чем при положительной, и уменьшается при переходе в  $H$ -режим.

- 
1. Askinasi L.G. et al. Proc. 17th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plas. Heating, Amsterdam, 1990, 14B, 411.
  2. Аскинази Л.Г., Акатова Т.Ю., Голант В.Е. и др. Письма в ЖЭТФ, 1990, 52, 786.
  3. Tendler M., Rozhansky V.A. Proc. 17th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plas. Heating, Amsterdam, 1990, 14B, 744.
  4. Shaing K.G., Crume E.C. Phys. Rev. Lett., 1989, 63, 2369.
  5. Biglary H. et al. Phys. Fluids, 1990, B2, 1.
  6. Itoh S.I., Itoh K. J. Phys. Soc. Japan, 1990, 59, 3815.
  7. Рожанский В.А., Тендлер М.Б. Письма в ЖЭТФ, 1991, 53, 786.
  8. Taylor R.J. et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 63, 2365.
  9. Matsumoto H. et al. Proc. 17th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plas. Heating, Amsterdam, 1990, 14B, 279.
  10. Van Nieuwenhove R. et al. Proc. 18th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plas. Physics, Berlin, 1991, 15C, 405.
  11. Weynants R.R., Taylor R.J. Nuclear Fusion, 1990, 30, 945.