

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИОННО-ЦИКЛОТРОННОМУ НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ТО-2

*Л.И.Артеменков, Н.А.Ахмеров, В.Ф.Богданов,  
К.Ю.Вуколов, Ю.В.Готт, Е.В.Гродзинский, А.А.Гуров  
И.А.Кован, С.Г.Мальцев, П.И.Мелихов, И.А.Монахов,  
П.А.Мухин, Л.Н.Папков, А.П.Попрядухин, С.М.Сотников,  
К.Х.Юсупов, В.А.Чуянов, Н.Н.Швиндт, Р.В.Шурыгин*

В работе сообщаются результаты экспериментов по нагреву водородной плазмы на основной циклотронной ионной частоте в токамаке ТО-2. Описаны условия, при которых наблюдаются сильное поглощение быстрой магнитозвуковой волны и объемный нагрев плазмы.

На установке ТО-2<sup>1</sup> обнаружен эффективный нагрев водородной плазмы на основной ионной циклотронной частоте. Эксперименты проводились в бездиверторном режиме, при котором сепаратриса находилась вблизи поверхности камеры и единственным элементом, ограничивающим плазму, являлась ВЧ-антенна открытого типа. Последняя устанавливалась в центральном сечении одного из тороидальных участков установки и представляла собой полосковую линию шириной 35 мм, охватывающую плазменный шнур со стороны слабого тороидального поля и защищенную от плазмы двумя боковыми диафрагмами с радиальными разрезами. Расстояние между диафрагмами составляло 90 мм, диаметр их отверстий – 270 мм. Излучающая поверхность антенны располагалась на расстоянии 15 мм от границы плазмы в тени диафрагм и занимала угол  $150^\circ$  в полоидальном направлении. Для нагрева плазмы использовался генератор с самовозбуждением на частоте 18,35 МГц мощностью до 0,5 МВт, работающий в режиме одиночных импульсов.

Опыты проводились в тороидальном магнитном поле 1,2 Тл, соответствующем расположению зоны циклотронного резонанса в центре плазменного шнура, в макроскопически устойчивых режимах разряда в водороде длительностью  $\cong 100$  мс при токе в плазме до 35 кА. Измерение ионной температуры осуществлялось одноканальным электростатическим анализатором нейтралов с твердой мишенью<sup>2</sup>, обеспечивающим достаточно высокую чувствительность в широком диапазоне энергий и возможность непрерывной регистрации в течение разрядного импульса. Анализ потока нейтралов производился в направлении большого радиуса тора (в экваториальной плоскости) в сечении, расположенном на противоположном, по отношению к антенне участке установки.

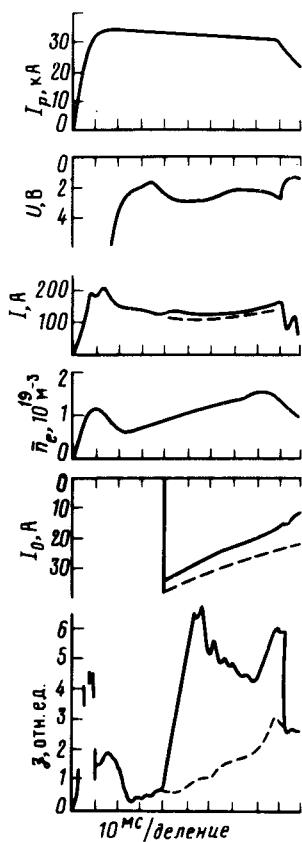


Рис.1.

На рис.1 сплошной линией показаны осциллограммы некоторых характеристик разряда при введении в плазму ВЧ мощности  $P_{ВЧ} \cong 25$  кВт, начиная с 40 мс разряда. Здесь сверху вниз: ток разряда  $I_p$ , напряжение разряда  $U$ , ток регулятора равновесия по большому радиусу  $I$ , средняя плотность плазмы  $\bar{n}_e$ , постоянная составляющая сеточного тока ВЧ генератора  $I_0$  с плазмой и в ее отсутствии (пунктир), интенсивность потока нейтралов перезарядки  $J$  при энергии 0,5 кэВ.

Как видно из осциллограмм, включение ВЧ генератора приводило к изменению тока регулятора  $I$ , свидетельствующему об увеличении давления плазмы, и сигнала анализатора  $J$ , связанному с увеличением температуры ионов (в отсутствие ВЧ импульса эти сигналы показаны пунктирной линией). Напряжение обхода  $U$  и плотность плазмы  $\bar{n}_e$  при этом не изменялись. Кроме того, ВЧ нагрев не сопровождался заметными изменениями интегральной по сечению интенсивности спектральных линий легких примесей, например СIII, CV и др. Контроль за вводимой мощностью осуществлялся по уменьшению сеточного тока генератора относительно тока холостого хода. Такой вид изменения тока  $I_0$  свидетельствовал, в частности, о непрерывном поступлении ВЧ мощности в плазму во времени и отсутствии модового характера нагрузки генератора.

Результат обработки аналогичных осциллограмм при несколько большем уровне вводимой мощности  $P_{ВЧ}$  показана на рис.2. Центральная температура ионов  $T_i$ , определявшаяся по наклону энергетического спектра в интервале энергий от 0,3 до 1,5 кэВ, была получена за несколько разрядных импульсов при надежной повторяемости разряда. В указанном энергетическом интервале функция распределения ионов с ВЧ и без ВЧ импульса не обнаруживает каких-либо искажений и является максвелловской. Для приведенного режима эффективность нагрева ионов составляет 2 эВ/кВт при плотности плазмы  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. На том же рисунке показано увеличение давления плазмы  $\Delta n\bar{T}$ , определенное по изменению тока регуляторов равновесия. Это изменение можно объяснить только увеличением суммарной темпе-

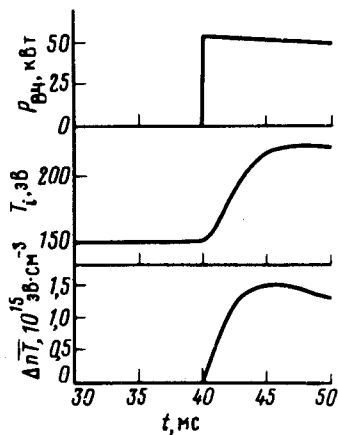


Рис.2.

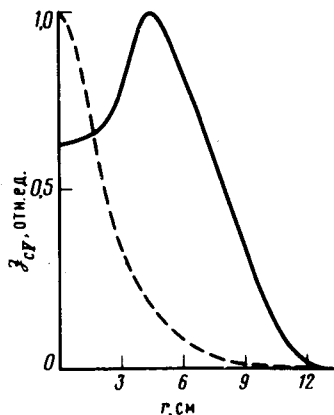


Рис.3.

ратуры плазмы, поскольку, как отмечалось выше, ввод ВЧ мощности не приводил к изменению её плотности. Приращение  $\Delta(T_i + T_e) \cong 150$  эВ почти вдвое превышает приращение температуры ионов, что указывает на нагрев электронов плазмы.

В настоящих экспериментах непосредственные измерения электронной температуры еще не проводились. Однако в пользу увеличения центральной температуры электронов свидетельствует значительное уменьшение интенсивности линии CV в приосевой области шнура в процессе ВЧ нагрева. Этот эффект иллюстрирует рис.3, на котором представлены абелизированные кривые распределения интенсивности линии CV (2271 Å) по малому радиусу на 45 мс разряда с ВЧ импульсом (сплошная линия) и без него (пунктирная линия).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об эффективном объемном нагреве водородной плазмы на основной ионной циклотронной частоте без заметного влияния на удержание и чистоту плазмы.

Возникает естественный вопрос, почему до последнего времени нагрев плазмы с одним сортом ионов на частоте  $\omega = \omega_{ci}$  в токамаке не был обнаружен, хотя эксперименты в этом диапазоне частот проводятся с начала 70-ых годов. Ответ по нашему мнению заключается в том, что ни в одном из известных нам экспериментов не было необходимого сочетания двух условий: во-первых, совмещения частоты колебаний с циклотронной частотой ионов изи оси шнура, и, во-вторых, расположения излучающей антенны со стороны слабого тороидального магнитного поля вне циклотронной зоны. При этих условиях в объеме плазмы может возбуждаться только быстрая магнитозвуковая волна (БМЗ-волна), которая свободно проходит через циклотронную зону и после многих прохождений образует дискретные собственные моды. При расположении антенны с внутренней стороны тора БМЗ-волна также возбуждается, однако при одновременном возбуждении достаточно широкого спектра медленных волн (М-волн), которые поглощаются на периферии плазмы, не достигая зоны циклотронного резонанса. Из-за различной поляризации указанных волн их взаимная трансформация не эффективна, поэтому сопротивление излучения антенны (или вводимая в плазму мощность) определяется, в основном, либо БМЗ-волнами при внешнем возбуждении, либо М-волнами при внутреннем.

Впреки установившемуся мнению о слабом поглощении БМЗ-волны на основной циклотронной частоте ионов, как показали опыты на ТО-2, оно оказалось весьма сильным. Согласно зондовым измерениям добротность собственных мод не превышала 50 и не зависела от продольного волнового числа  $K_z$ . Этим объясняется отсутствие колебаний в нагрузке генератора. Можно предположить, что наблюдаемое сильное циклотронное поглощение связано с увеличением левосторонне поляризованного поля БМЗ-волны за счет неоднородности магнитного поля и реальных дрейфовых траекторий ионов в токамаке. Учет вращательного преобразования на поглощение БМЗ-волны на частоте  $\omega = \omega_{ci}$  для сильно-пролетных ионов исследовался в работе <sup>4</sup>. Однако вывод этой работы, указывающий на поверхностное выделение мощности для мод с азимутальным числом  $m \neq -1$ , противоречит нашим экспериментам.

В заключение отметим, что нагрев ионов в водородной плазме на частоте  $\omega = \omega_{ci}$  был обнаружен ранее на стеллараторе Л-2 <sup>3</sup> при участии одного из авторов настоящей работы. Однако сложная геометрия магнитного поля этой установки не позволяет пока сделать вывод о непосредственном циклотронном поглощении БМЗ-волны.

Авторы благодарны Э.А.Азизову, И.Н.Головину, В.Ф.Демичеву и В.С.Стрелкову за поддержку в постановке и проведении работы.

#### Литература

1. Артеменков Л.И. и др. Физика плазмы, 1983, 9, 121.
2. Gott Yu. V., Motlich A. G. Nucl. Instr. and Method, 1978, 155, 443.

3. *Batyk V.A. et al.* 11-th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Aachen, 5 – 9 Sept., 1983, Part I, C-14.
4. *Cattanei G., Croci R.* Nucl. Fusion, 1977, 17, 239.



Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
10 декабря 1983 г.

---