

04;12

## **Первые эксперименты по ВЧ-нагреву плазмы в сферическом токамаке „Глобус-М“ на ионных циклотронных частотах**

© В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, Ф.В. Чернышев, Ю.В. Петров,  
Н.В. Сахаров, О.Н. Щербинин

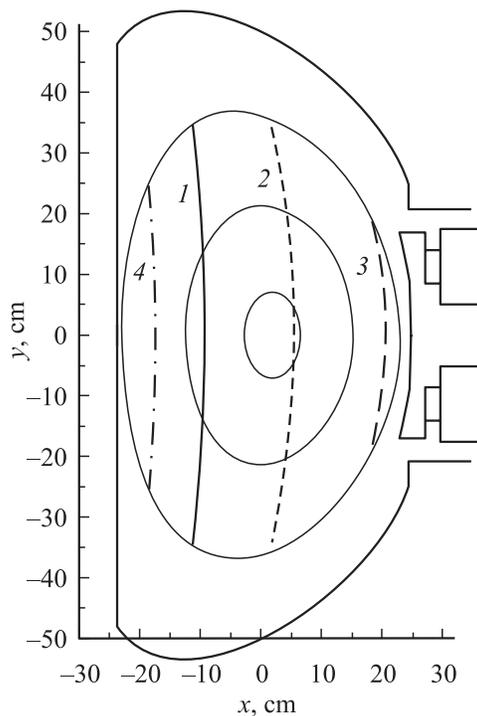
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: Vasily.Gusev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2004 г.

Приводятся результаты первых экспериментов по ВЧ-нагреву плазмы на сферическом токамаке „Глобус-М“ на ионных циклотронных частотах на смеси водорода и дейтерия. С помощью однопетлевой антенны была введена мощность 200 kW на частоте 9.1 MHz. Зарегистрировано увеличение ионной температуры от 170 до 300 eV. Характерные времена роста и спада ионной температуры соответствовали энергетическому времени жизни плазмы в установке.

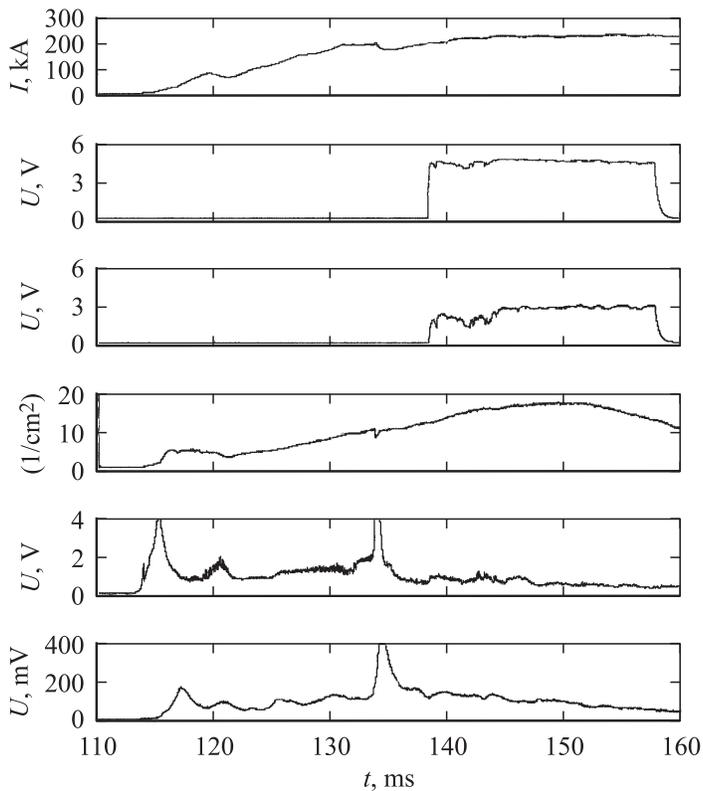
Подготовка экспериментов по ионному циклотронному нагреву плазмы на установке „Глобус-М“ ( $R_0 = 36$  см и  $a_0 = 24$  см) началась несколько лет тому назад [1]. Были рассмотрены два сценария экспериментов — ввод в плазму ВЧ-мощности на ионной частоте водородных ионов, существующих в дейтериевой плазме в виде малой примеси, и нагрев плазмы за счет затухания быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн по механизму магнитной накачки при частотах, в несколько раз превышающих ионную циклотронную. Проведенное моделирование [2,3] показало, что эффективности поглощения ВЧ-волн в плазме для обоих сценариев довольно близки. Однако эффективности нагрева могут оказаться разными из-за того, что ВЧ-мощность вкладывается в разные компоненты плазмы — в первом сценарии значительная часть энергии волн идет на нагрев ионов, а во втором происходит только нагрев электронов.

Ниже приводятся результаты первых экспериментов по ВЧ-нагреву плазмы в режиме водородной добавки в дейтериевую плазму при тороидальном магнитном поле около 0.4 Т. Плотность плазмы на оси



**Рис. 1.** Поперечное сечение камеры „Глобуса-М“ и положение в нем резонансных поверхностей: 1 — основной резонанс для водорода и вторая гармоника для дейтерия, 2 — третья гармоника для дейтерия, 3 — вторая гармоника для водорода, 4 — ион-ионный гибридный резонанс при равных долях дейтерия и водорода в составе плазмы.

разряда при токе 250–300 кА могла достигать значений  $4\text{--}5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . На рис. 1 на фоне поперечного сечения камеры „Глобус-М“ показано расположение основных и более высоких циклотронных гармоник для ионов водорода и дейтерия в поперечном сечении плазменного шнура на частоте 9 МГц. Именно с положением этих гармоник связана локализация выделения энергии возбуждаемых волн (1 — основной резонанс для водорода и вторая гармоника для дейтерия, 2 — третья гармоника для дейтерия, 3 — вторая гармоника для водорода, 4 —

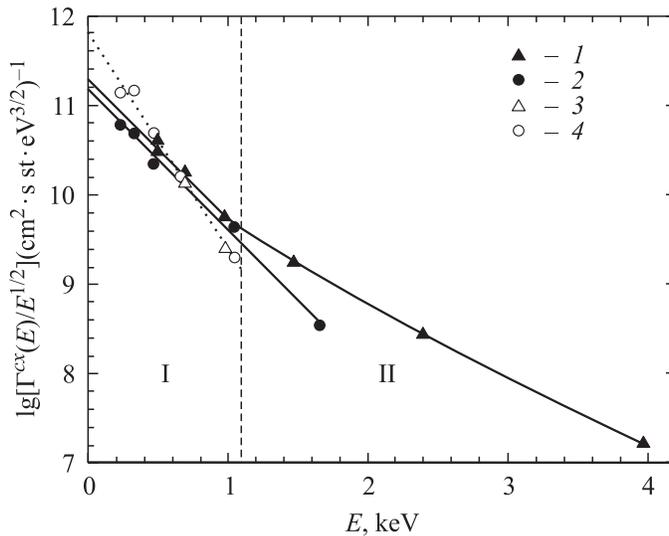


**Рис. 2.** Временной ход основных параметров плазмы в разряде № 6736. Сверху вниз: ток разряда, амплитуды падающей и отраженной волн, плотность плазмы, интегрированная по вертикальной хорде ( $nl/10^{14}$ ), интенсивности излучения спектральных линий  $D_\alpha$  и CIII.

ион-ионный гибридный резонанс при равных долях дейтерия и водорода в составе плазмы). При расчетах предполагалось, что вакуумное магнитное поле на оси равно 0.4 Т, парамагнитное поле на оси — 0.05 Т. Замкнутые кривые показывают положение поверхностей постоянного магнитного потока, что дает представление о топологии магнитного поля в токамаке. Видно, что в данном сценарии нагрева некоторые зоны выделения энергии неминуемо оказываются вблизи стенок камеры, что может снизить эффективность нагрева.

На первом этапе экспериментов к антенне подводилась ВЧ-мощность низкого уровня (до 500 W), с длительностью ВЧ-импульса до 80 ms с целью тренировки антенны и нахождения оптимального согласования антенны с плазмой. Было достигнуто согласование, когда при высокой плотности плазмы амплитуда отраженной ВЧ-волны заметно уменьшалась и загрязнения плазмы примесями не происходило. Затем уровень вводимой мощности был увеличен до  $\sim 200$  W, а длительность импульса сокращена до 20 ms. В режиме мощных импульсов производилась дополнительная тренировка антенны до тех пор, пока интенсивность свечения спектральных линий примесных ионов не стабилизировалась. На рис. 2 для разряда № 6736 приведены зависимости от времени тока разряда, амплитуды падающей и отраженной волны, интеграла от плотности плазмы, измеренного по центральной вертикальной хорде, и интенсивности свечения спектральных линий  $D_\alpha$  и СШ. Частота генератора в этом импульсе была 9.1 MHz, уровень подводимой мощности — 220 kW, уровень отраженной мощности — 90 kW. Таким образом, коэффициент отражения по мощности был около 40%. Видно, что во время ВЧ-импульса происходил небольшой рост плотности плазмы (до среднего по хорде значения  $3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ), однако увеличения загрязнения плазмы не наблюдалось.

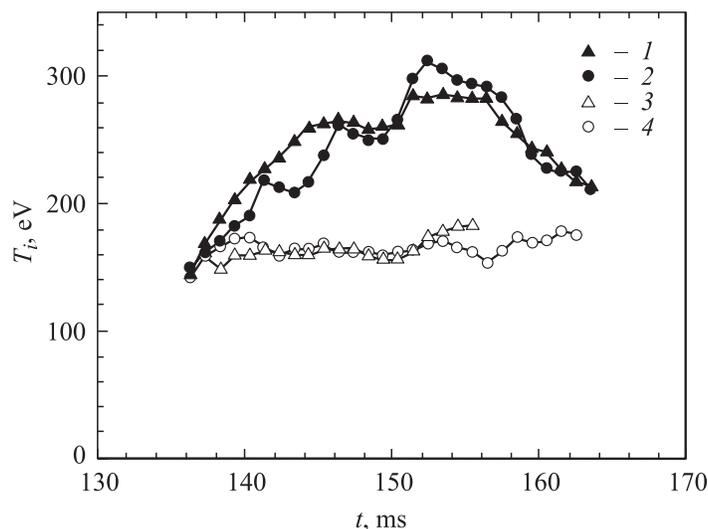
На рис. 3 приведены энергетические спектры атомов перезарядки водорода и дейтерия, полученные с помощью атомного анализатора АКОРД-12 [4,5]. Прибор был установлен в средней плоскости токамака в перпендикулярном направлении к оси камеры. Анализатор работал в так называемом „пассивном“ режиме, измеряя интегральные спектры, поступающие из плазмы вдоль линии видимости прибора. Сплошными треугольниками на рис. 3 показаны спектры водорода, а сплошными кружками — спектры дейтерия, измеренные на 16 ms после начала ВЧ-импульса (разряд № 6736). Здесь же (пустые треугольники и кружки) приведены спектры, характерные для условий, когда ВЧ-нагрев не включался (разряд № 6739). Из рисунка видно, что во время действия ВЧ-импульса только в спектре водорода появляется „хвост“ энергичных (1.1–4 keV) частиц. Это свидетельствует о том, что нагрев дейтерия идет преимущественно через ионы водорода. Отметим сразу, что количество частиц, содержащихся в хвосте водородного спектра, не превышает 5% от полного числа частиц в спектре. Для „тепловой“ области энергий  $\sim 0.25$ –1.1 keV все спектры хорошо аппроксимируются максвелловскими функциями распределения с одинаковой температурой для водорода и дейтерия, которая составляет для разряда с



**Рис. 3.** Спектры атомов перезарядки, измеренные с помощью анализатора АКОРД-12: 1, 2 — водород и дейтерий при ВЧ-нагреве (разряд № 6736); 3, 4 — водород и дейтерий без ВЧ-нагрева (разряд № 6739); I — „тепловая“ часть спектров, II — высокоэнергичный „хвост“.

ВЧ-нагревом  $\sim 300$  eV и для разряда без ВЧ-нагрева  $\sim 170$  eV. Прямого соответствия между количеством частиц в спектрах с ВЧ и без ВЧ не прослеживается (число частиц в спектре с ВЧ приблизительно в 2 раза ниже, чем в спектре без ВЧ). Это может быть связано с различной концентрацией пристеночных нейтральных атомов в этих двух разрядах.

Чтобы установить соответствие между температурой, определенной по „пассивным“ спектрам перезарядки, и действительной температурой ионов плазмы, было проведено численное моделирование потоков атомов, выходящих из плазмы „Глобуса-М“ по методике, описанной в [6,7]. Моделирование показало, что в плотной плазме ( $n_0 \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) возникает заметное ослабление потоков атомов, выходящих из центральных областей. В результате этого температура, полученная по данным перезарядки, может оказаться заниженной. Для простого случая, когда температура и концентрация плазмы могут быть аппроксимированы параболическими радиальными распределениями, перезарядка дает тем-



**Рис. 4.** Временной ход ионной температуры, определенной по спектрам перезарядки. 1, 2 — водород и дейтерий при ВЧ-нагреве (разряд № 6736); 3, 4 — водород и дейтерий без ВЧ-нагрева (разряд № 6739).

пературу на  $\sim 20\%$  ниже центральной температуры ионов. При другом, например, более плоском, распределении параметров, наблюдаемом в сферических токамаках, расхождение может быть еще сильнее.

На рис. 4 показан временной ход ионной температуры (без поправок, учитывающих фактор поглощения), определенной по спектрам перезарядки в разрядах с ВЧ и без ВЧ (обозначения точек те же самые, что и на рис. 3). Характерные времена роста ионной температуры и ее спада после окончания ВЧ-импульса соответствуют энергетическому времени жизни ионов. Динамика ионной температуры для водорода и дейтерия практически одинакова, что говорит о хорошем энергообмене между обеими ионными компонентами.

Следует обратить внимание на то, что нагрев происходит при весьма высокой относительной концентрации ионов водорода ( $\approx 50\%$ ), измеренной тем же самым атомным анализатором. Этот факт не укладывается в рамки привычных представлений о поглощении ионных циклотронных волн в плазме, развитых для крупных термоядерных

установок с большим аспектным отношением. В таких установках в объеме плазмы выполняются резонансные условия только для одной из гармоник, а ширина области непрозрачности для ионных циклотронных волн при высокой концентрации водорода становится очень большой из-за слабого градиента магнитного поля. Другой важной особенностью нагрева плазмы в данном эксперименте является сравнительно невысокая предельная энергия (4 keV) „хвоста“ быстрых частиц, зарегистрированная в водородных спектрах перезарядки. Этот, в целом положительный, эффект может быть связан с низкой частотой ВЧ-волн и потерями ионов с незахваченных орбит в сферических токамаках. Ограничение вклада ВЧ-мощности в высокоэнергичную часть функции распределения ионов, по нашему мнению, позволит избежать многих нежелательных явлений, связанных с возникновением в плазме популяции высокоэнергичных ионов (раскачка неустойчивостей, взаимодействие со стенками и т.д.).

Полученные в эксперименте результаты представляются важными для углубления фундаментальных знаний о физике взаимодействия ВЧ-волн с плазмой. Также применение данного метода открывает более широкие возможности для дополнительного нагрева плазмы в сферических токамаках.

Выполнение этой работы поддерживалось грантом РФФИ № 01–02–17924.

## Список литературы

- [1] Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69(9). С. 58.
- [2] Ирзак М.А., Трегубова Е.Н., Щербинин О.Н. // Физика плазмы. 1999. Т. 25(8). С. 659; Irzak M.A., Tregubova E.N., Shcherbinin O.N. // Plasma Physics Reports. 1999. V. 25(8). P. 659.
- [3] Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Трегубова Е.Н., Щербинин О.Н. // ЖТФ. 2003. Т. 73(8). С. 126; Dyachenko V.V., Irzak M.A., Tregubova E.N., Shcherbinin O.N. // Technical Physics. 2003. V. 48(8). P. 1061.
- [4] Извозчиков А.Б., Петров М.П., Петров С.Я. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62(2). С. 157; Izvozchikov A.B., Petrov M.P., Petrov S.Ya. et al. // Technical Physics. 1992. V. 37(2). 1992. P. 201.
- [5] <http://www.ioffe.rssi.ru/ACPL/npd/npa00.htm>
- [6] Dnestrovskij Yu.N., Lysenko S.E., Kislyakov A.I. // Nuclear Fusion. 1979. V. 19. P. 293.
- [7] Извозчиков А.Б. Дис. на соис. учен. степ. канд. физ.-матем. наук. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, 1980.