

УДК 533.951

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М С ПОМОЩЬЮ БЕРНШТЕЙНОВСКИХ ВОЛН

С. Е. Гребенщиков, Н. Ф. Ларионова, А. И. Мещеряков, И. С. Сбитникова

В экспериментах на стеллараторе Л-2М в предварительно созданную и нагретую плазму вводилась ВЧ мощность на частотах $\omega = \omega_{ci}$ и $\omega = 3\omega_{ci}/2$. Для возбуждения ионной бернштейновской волны использовалась экранированная антенна, расположенная вдоль тора. Ионный бернштейновский нагрев при $\omega = \omega_{ci}$ исследовался в двух режимах создания предварительной плазмы: при омическом и электронном циклотронном нагреве. В этих режимах различаются как структура магнитного поля, так и параметры плазмы. В обоих случаях зафиксирован нагрев ионной компоненты; эффективности нагрева оказались одинаковыми и равными $\eta = 1.5 \text{ эВ/кВт}$, хотя зависимости $\Delta T_i(t)$ отличались. Нагрев при $\omega = 3\omega_{ci}/2$ исследовался в омическом режиме; эффективность нагрева не отличалась от случая $\omega = \omega_{ci}$.

Среди методов нагрева плазмы, планируемых для использования в будущих термоядерных реакторах, методы нагрева в области частот вблизи ионного циклотронного резонанса (ИЦР) рассматриваются как весьма перспективные с точки зрения нагрева ионной компоненты плазмы. Ионный циклотронный нагрев отличает простота технического исполнения основных элементов системы нагрева (а следовательно, и ее дешевизна) и возможность передачи энергии непосредственно ионной компоненте плазмы. На установках токамак и стелларатор наиболее интенсивно исследуются ИЦР методы нагрева плазмы, основанные на возбуждении быстрых магнитозвуковых (БМЗВ) и

ионных бернштейновских (ИБВ) волн. Наиболее впечатляющие результаты экспериментов по ИЦР нагреву получены на токамаках, имеющих большие размеры плазмы, с использованием БМЗВ [1]. Однако этот метод имеет ряд недостатков с точки зрения его применения на термоядерных реакторах. Основным недостатком этого метода нагрева является необходимость размещения антенны вблизи плазмы, поскольку с уменьшением расстояния между антенной и плазмой возрастает сопротивление излучения антенны и, следовательно, поглощаемая плазмой мощность. В термоядерном реакторе расположенная вблизи плазмы антенна будет подвергаться сильному воздействию потоков частиц и излучения, выходящего из плазмы, что должно приводить к разрушению антенны и дополнительному потоку примесей в плазму.

Кроме того, используемые для возбуждения БМЗВ токовые антенны способны возбуждать и другие типы волн: медленные магнитозвуковые, поверхностные волны, коаксиальные моды, которые поглощаются на периферии плазмы в непосредственной близости от стенки камеры и самой антенны. В результате нагревается периферия и усиливается взаимодействие плазмы со стенкой, что приводит к росту концентрации примесей в плазме [2].

В настоящее время особое внимание исследователей привлекает ИЦР метод нагрева плазмы с помощью ИБВ, который, как представляется, может свести к минимуму вышеуказанные недостатки. Циклотронное поглощение ИБВ является эффективным даже на высоких гармониках $\omega = (5-8)\omega_{ci}$. В таком случае в установке с параметрами, близкими к термоядерным (магнитное поле $B = 5-6 \text{ Тл}$, циклотронная частота $f_{ci} = 75-90 \text{ МГц}$, частота нагрева $f = 400-700 \text{ МГц}$), излучение волн может осуществляться с помощью волноводного грила [3], который не выступает за стенку камеры. Кроме того, использование грила обеспечивает узкий диапазон по продольным волновым числам и позволяет избежать возбуждения нежелательных типов волн в плазме.

Возбуждение ИБВ происходит как посредством конверсии электронных плазменных волн (ЭПВ) на периферии плазменного столба, так и непосредственно продольной антенной. Далее ИБВ распространяются по направлению к центру плазменного шнура и поглощаются в области ионного циклотронного резонанса или его гармоник [4].

Эксперименты по ИБВ нагреву плазмы были проведены на токамаках ЛРРТ-II-U [5], PLT [6], Alcator-C [7], DIII-D [8]. В них использовалась токовая антенна с центральным токопроводом, расположенным в тороидальном направлении (этот тип антенны получил название Nagoya Type III). В этих экспериментах был обнаружен нагрев ионов как на целых, так и на дробных гармониках ионной циклотронной частоты ($\omega = 3/2\omega_{ci}$, $\omega =$

$5/2\omega_{ci}$), что находит объяснение только в рамках нелинейной теории. На всех установках во время нагрева наблюдалось существенное улучшение удержания частиц плазмы.

Однако нагрев в стеллараторе может иметь свои особенности благодаря существенному различию структуры магнитных полей токамака и стелларатора. Первые эксперименты с использованием тороидальной токовой антенны на стеллараторе были выполнены на установке CHS [9], где удалось создать плазму в области частот ионного циклотронного резонанса, но не был убедительно продемонстрирован ИБВ нагрев плазмы.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение и анализ особенностей ИБВ нагрева плазмы в стеллараторе. Работа проведена на стеллараторе Л-2М Института общей физики Российской академии наук.

Система нагрева. Для возбуждения ИБВ использовалась продольная антенна (Nagoya Type III) (рис. 1), закрытая электростатическим экраном. Такая антенна создает продольную (вдоль силовой линии магнитного поля) компоненту электрического поля, необходимую для возбуждения ИБВ. Следует заметить, что на периферии плазменного шнура вблизи антенны силовые линии магнитного поля направлены под углом к антенне (его максимальное значение достигает 15°). То есть кроме продольной компоненты электрического поля существует небольшая перпендикулярная компонента, которая может приводить к возбуждению БМЗВ.

С помощью фидера к антенне подводилась мощность от высокочастотного генератора. Генератор и остальные резонансные элементы системы (колебательный контур антенны и фидер) были настроены на частоту 20 МГц.

Поглощаемая в плазме мощность определялась по стандартной методике, основанной на измерении амплитуд падающей U_{in} и отраженной U_{ref} волн в подводящем фидере, а сопротивление антенны – из соотношения $P_{abs} = (1/2) I_{ant} R_a$. Сопротивление излучения антенны R_e вычисляется из двух измерений сопротивления антенны: $R_e = R_a - R_0$, где R_a – активное сопротивление антенны в присутствии плазмы, R_0 – активное сопротивление антенны в отсутствие плазмы. В серии последовательных измерений было найдено, что сопротивление излучения антенны составляло величину $R_e = 0.15 - 0.25 \text{ Ом}$, в то время как активная составляющая сопротивления антенны в отсутствие плазмы составляла $R_0 = 0.23 \text{ Ом}$.

Условия и результаты эксперимента. Стелларатор Л-2М представляет собой тороидальную магнитную ловушку с двухзаходным ($l = 2$) винтовым полем [10]. Большой радиус установки $R = 100 \text{ см}$, средний радиус плазмы $a = 11.5 \text{ см}$. Напряжен-

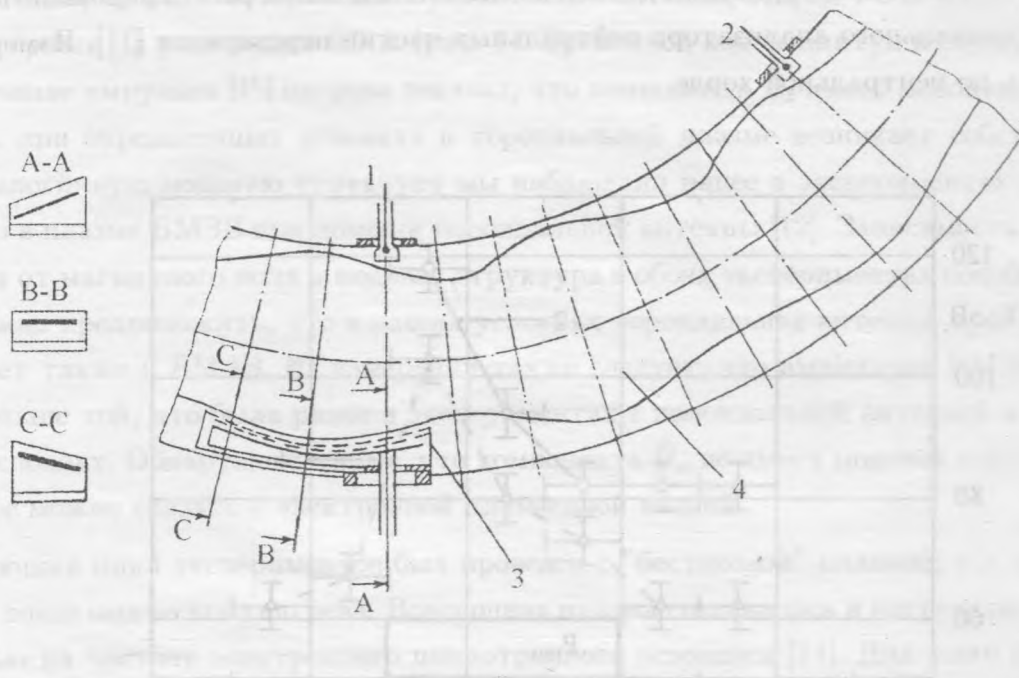


Рис. 1. Схема расположения магнитных зондов (1 и 2), антенные (3) и плазмы (4) в горизонтальном сечении тора. Слева - поперечное сечение антенны в трех плоскостях.

ность продольного магнитного поля менялась в данных экспериментах в пределах $B = 0.8 - 1.35 \text{ Тл}$. Угол вращательного преобразования равен $\iota(0) = 0.2$ - в центре плазмы и $\iota(a) = 0.8$ - на ее границе.

Первый цикл экспериментов по изучению распространения ИБВ и нагрева плазмы был выполнен в режиме омического нагрева. Водородная плазма создавалась методом омического нагрева при величине плазменного тока $I = 13 - 18 \text{ кА}$. Значение средней электронной плотности плазмы при импульсном напуске газа составляло $n_e = (0.6 - 1.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, температура электронов в центре плазменного шнура лежала в пределах $T_e = 200 - 350 \text{ эВ}$. Исходная температура ионов перед включением ВЧ импульса была $T_i = 50 - 80 \text{ эВ}$.

Основное внимание уделялось экспериментам в области магнитных полей, при которых на магнитной оси выполнялись следующие условия: $\omega = \omega_{ci} (B = 1.32 \text{ Тл})$ и $\omega = (3/2)\omega_{ci} (B = 0.88 \text{ Тл})$. Поглощаемая плазмой ВЧ мощность в этих условиях составляла $P = 25 \text{ кВт}$ при длительности импульса нагрева 3 мс. В течение импульса ВЧ нагрева средняя плотность плазмы возрастала на 30%; плазменный ток уменьшался на 1.2 кА, радиационные потери из плазмы возрастали на 50%.

Энергетические характеристики ионной компоненты плазмы регистрировались с помощью пятиканального анализатора нейтральных частиц перезарядки [11]. Измерения проводились по центральной хорде.

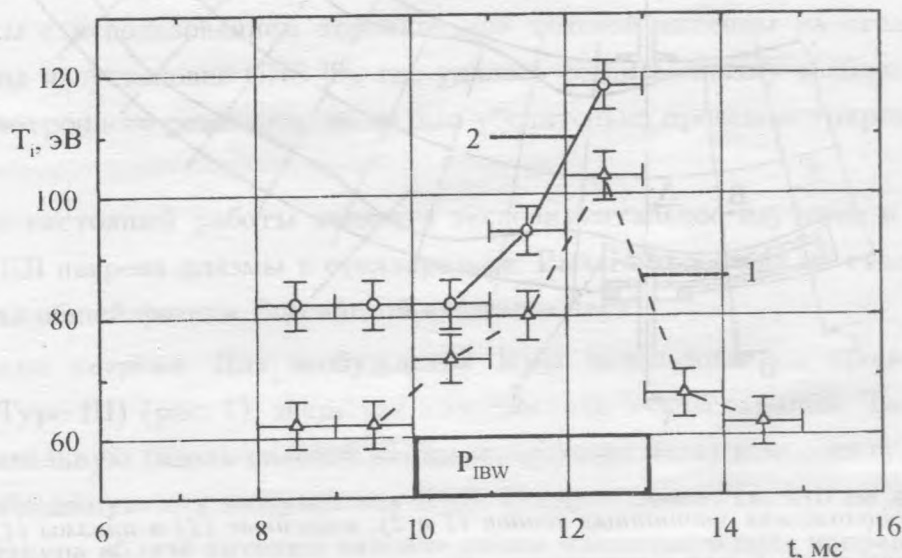


Рис. 2. Зависимость центральной ионной температуры $T_i(0)$ от времени в разрядах с дополнительным ИБВ нагревом, 1 - $B = 0.82$ Тл, 2 - $B = 1.29$ Тл.

На рис. 2 приведены временные зависимости центральной ионной температуры $T_i(0)$ в двух разрядах, при значении магнитного поля $B = 0.82$ Тл ($\omega \approx (3/2)\omega_{ci}$) и $B = 1.29$ Тл ($\omega \approx \omega_{ci}$). Прирост ионной температуры в конце импульса достигает $\Delta T_i = 40$ эВ. Учитывая, что средняя плотность плазмы в этих разрядах составляла $n_e = 0.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, эффективность нагрева ионов, приведенную к плотности $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, можно оценить как $\eta_i = 1.6 \text{ эВ/кВт}$.

Следует отметить, что нагрев ионов наблюдался в диапазоне магнитных полей $B = 0.82 - 0.92$ Тл, т.е. в окрестности $\omega = (3/2)\omega_{ci}$. В диапазоне магнитных полей $B = 0.95 - 1.22$ Тл заметного эффекта нагрева не обнаружено. Экспериментально установлено, что вторая зона нагрева соответствует диапазону магнитных полей $B = 1.28 - 1.34$ Тл, т.е. в окрестности $\omega = \omega_{ci}$. Во всех случаях энергетические спектры ионов, измеренные до энергий $E_i = 5 - 7T_i$, соответствуют максвелловскому распределению.

В эксперименте проводились измерения компонент \tilde{B}_z и \tilde{B}_φ магнитного поля волны магнитными зондами. Первый магнитный зонд располагался на внутренней стороне в

сечении стелларатора, в котором была установлена антенна, второй – в сечении, отстоящем от первого на расстояние 0.9 м (рис. 1). Временной ход амплитуд возбуждаемых волн в течение импульса ВЧ нагрева показал, что компонента \tilde{B}_z имеет модовую структуру, т.е. при определенных условиях в тороидальной плазме возникает собственная мода. Аналогичную модовую структуру мы наблюдали ранее в экспериментах по возбуждению в плазме БМЗВ при помощи полоидальной антенны [12]. Зависимость длины затухания от магнитного поля и модовая структура в обоих экспериментах подобны, поэтому можно предположить, что в наших условиях тороидальная антенна, кроме ИБВ, возбуждает также и БМЗВ. Из измерений также следует, что амплитуда БМЗВ в 5 – 10 раз меньше той, что была ранее в экспериментах с полоидальной антенной в аналогичных условиях. Обнаружено также, что компонента \tilde{B}_φ не имеет модовой структуры, поэтому ее можно связать с электронной плазменной волной.

Следующий цикл экспериментов был проведен с "бестоковой" плазмой, т.е. при отсутствии токов омического нагрева. Водородная плазма создавалась и нагревалась СВЧ мощностью на частоте электронного циклотронного резонанса [14]. Для этого использовался гиротрон на частоте 75 ГГц (резонансного магнитного поля $B = 1.34 \text{ Тл}$). Нагрев плазмы осуществлялся на второй гармонике электронной циклотронной частоты, мощность излучения достигала 350 кВт.

В этих экспериментах получены более высокие параметры плазмы, чем в омическом режиме. Центральные электронная и ионная температуры равнялись соответственно $T_e(0) = 0.5 - 1.2 \text{ кэВ}$ и $T_i(0) = 80 - 140 \text{ эВ}$, средняя плотность плазмы менялась в диапазоне $n_e = 0.7 - 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, энергосодержание плазмы достигало $W = 500 \text{ Дж}$.

При введении мощности $P = 20 \text{ кВт}$ был зафиксирован нагрев ионов при плотности плазмы $n_e = 0.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В обсуждаемых ниже разрядах мощность гиротрона составляла $P_{\text{СВЧ}} = 100 \text{ кВт}$, температура электронов в центре плазмы $T_e(0) = 0.7 \text{ кэВ}$. На рис. 3 приведены зависимости центральной ионной температуры от времени в двух случаях: в ЭЦР разряде – кривая 1, и в разряде с введением ИЦР мощности – кривая 2. Значения температур получены при усреднении потоков нейтральных атомов в течение 1 мс. Из рис. 3 (кривая 2) видно, что происходит быстрый нагрев в течение не более чем 1 мс. Затем в течение ИЦР нагрева прирост ионной температуры падает. Средняя плотность плазмы в течение ВЧ импульса в этом разряде возрастала не более чем на 10%. Поэтому не представляется возможным связать падение ΔT_i с увеличением плотности. В этом случае вводимая мощность в течение ВЧ импульса падала на 30% (кривая 3 на рис. 3).

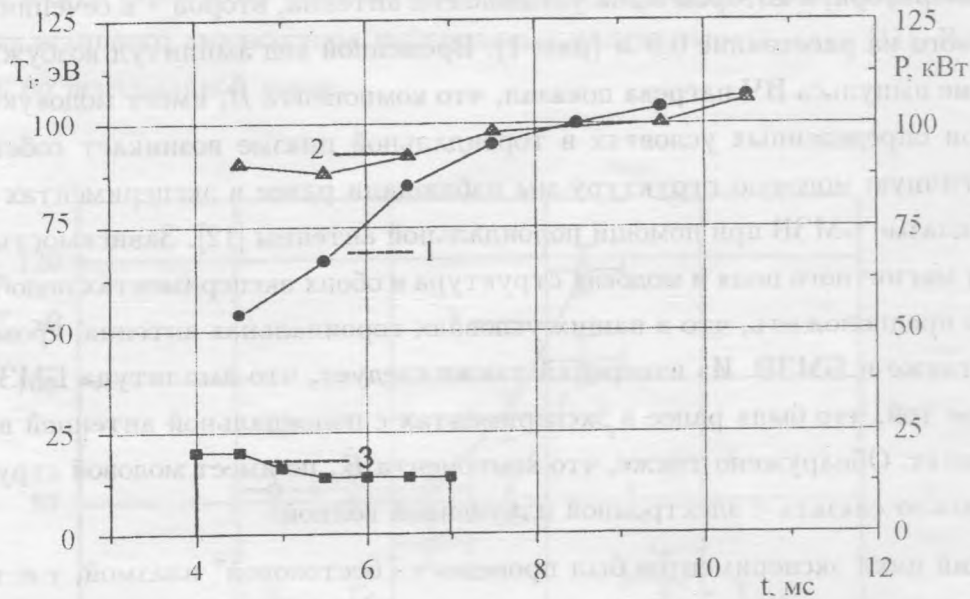


Рис. 3. Временные зависимости ионной температуры и ВЧ мощности. 1 - $T_i(0)$ в ЭПР разряде, 2 - в ЭПР разряде с дополнительным ИВВ нагревом, 3 - мощность $P_{ИВВ}$.

Для данного эксперимента можно оценить максимальное значение эффективности нагрева, приведенное к плотности $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Оно составляет $\eta_i = 1.4 \text{ эВ/кВт}$.

Расчет дисперсионной кривой. Для того, чтобы оценить возможность распространения ИВВ в плазме стелларатора, были выполнены расчеты дисперсионной кривой. Дисперсионное уравнение потенциальных волн вообще и ионных бернштейновских волн в частности в однородной плазме ($k_z \parallel B_0$) имеет вид [14]

$$k_{\perp}^2 \epsilon_{xx} + 2k_{\perp} k_z \epsilon_{xz} + k_z^2 \epsilon_{zz} = 0,$$

где k_{\perp}, k_z - компоненты волнового вектора, а $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{zz}$ - компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Здесь использовался тензор горячей плазмы [14] с параметрами плазмы, соответствующими экспериментальным. Профили электронной и ионной температуры брались в виде $T_e = T_{e0}(1 - x^2)^2 + T_{ke}$ и $T_i = T_{i0}(1 - x^2) + T_{ki}$, где $x = r/a_p$ - приведенный радиус плазмы, T_{e0} и T_{i0} - центральная электронная и ионная температуры, $T_{ke} = 5 \text{ эВ}$, $T_{ki} = 2 \text{ эВ}$ - пьедестал, который тянется от камеры до сепаратрисы. Профиль плотности плазмы, особенно на периферии, сильно влияет на решение дисперсионного уравнения, поэтому в расчетах он максимально приближен к измеренному:

простая парабола в центральной части до сепаратрисы $n_e = n_{e0}(1 - x^2)$, экспоненциальный спад на расстоянии 1 см от сепаратрисы и далее постоянная плотность до стенки камеры на уровне $n_{ek} = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Продольное волновое число задается длиной антенны ($k_z = 5 \text{ м}^{-1}$) и остается таким для каждого радиуса плазмы. В результате решения дисперсионного уравнения вычислялся квадрат поперечного показателя преломления k_{\perp}^2 для каждого радиуса плазмы. На рис. 4а представлен квадрат действительной части поперечного показателя преломления в зависимости от радиуса плазмы для $\omega = (3/2)\omega_{ci}$ (магнитное поле $B = 0.82 \text{ Тл}$). Всюду внутри камеры от антенны до центра плазмы $\text{Re}k_{\perp}^2 > 0$, то есть волна может распространяться от антенны до центра плазмы. Вне сепаратрисы в области низкой плотности плазмы распространяются электронные плазменные (косые ленгмюровские) волны. Вблизи радиуса $r = 12 \text{ см}$ показатель преломления резко возрастает, здесь происходит конверсия электронной плазменной волны в ионную бернштейновскую волну. Внутри сепаратрисы, где плотность плазмы становится достаточно высокой, распространяются ИБВ. Аналогичная зависимость наблюдается и для $\omega = \omega_{ci}$ ($B = 1.29 \text{ Тл}$), но с большими показателями преломления для ИБВ (рис. 4б).

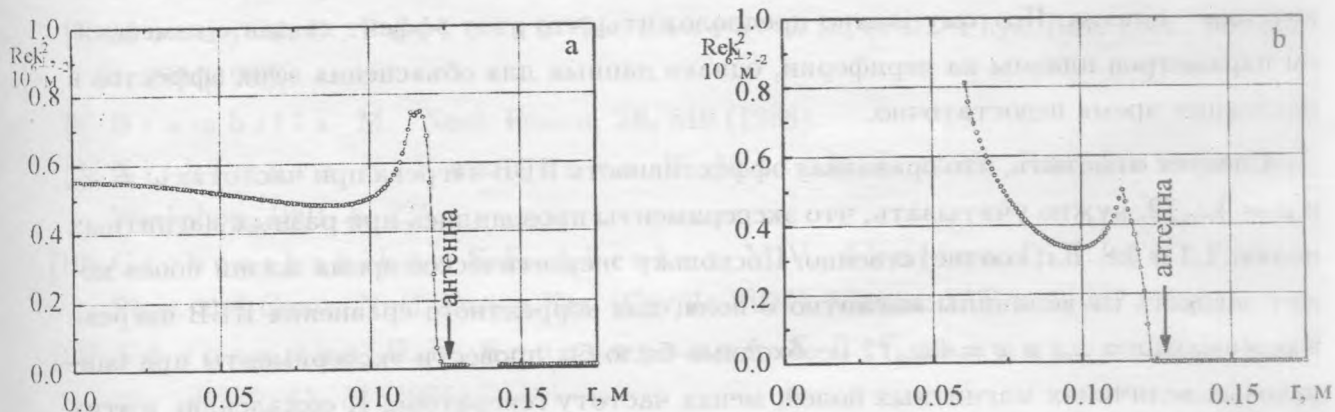


Рис. 4. Радиальная зависимость квадрата действительной части поперечной компоненты волнового вектора ИБВ для двух значений магнитного поля: а) $B = 0.88 \text{ Тл}$, $\omega = \omega_{ci}$ и б) $B = 1.32 \text{ Тл}$, $\omega = 3\omega_{ci}/2$.

Поскольку в этих экспериментах обнаружено существование БМЗВ, а в наших предыдущих экспериментах получен эффективный нагрев водородной плазмы на первой гармонике ИЦР [15], то возникают сомнения, не дает ли БМЗВ вклад в нагрев и в настоящем эксперименте. Можно привести несколько аргументов в пользу именно ИБВ

нагрева плазмы в данном эксперименте. Во-первых, для проведения эксперимента была установлена продольная антенна, которая, как известно [4 – 8], способна возбуждать ИБВ. Во-вторых, выполненные нами расчеты показали, что в плазме с нашими параметрами могут распространяться ИБВ во всей плазме от сепаратрисы до центра, а также возможен процесс конверсии ЭПВ в ИБВ, который способен дать большую эффективность возбуждения ИБВ по сравнению с непосредственным возбуждением антенной [4]. В-третьих, нагрев на дробной гармонике $\omega = 3\omega_{ci}/2$ возможен только за счет циклотронного поглощения ИБВ.

Сравнение ИБВ нагрева на частоте $\omega = \omega_{ci}$ в двух режимах создания и нагрева плазмы – омическом и ЭЦР – показало (рис. 2 и рис. 3), что при одинаковых максимальных значениях ΔT_i временной характер нагрева существенно различается. В этих двух режимах различаются углы вращательного преобразования ι и их профили, особенно в центральной области плазмы. В омическом режиме $\iota(0)$ близка к единице, в ЭЦР $\iota(0) \sim 0.2$. Электронная температура при ЭЦР нагреве в центре в три раза выше, чем в омическом режиме, а в области сепаратрисы – выше в 2 раза [16]. В омическом разряде ВЧ мощность постоянна во время ИБВ нагрева, в ЭЦР разряде она уменьшается к концу ВЧ импульса (кривая 3 на рис. 3), что указывает на уменьшение связи антенна – плазма. Поэтому можно предположить, что этот эффект связан с изменением параметров плазмы на периферии, однако данных для объяснения этих эффектов в настоящее время недостаточно.

Следует отметить, что сравнивая эффективность ИБВ нагрева при частотах $\omega = \omega_{ci}$ и $\omega = 3\omega_{ci}/2$, нужно учитывать, что эксперименты проводились при разных магнитных полях, 1.3 и 0.8 Тл, соответственно. Поскольку энергетическое время жизни ионов может зависеть от величины магнитного поля, для корректного сравнения ИБВ нагрева в режимах $\omega = \omega_{ci}$ и $\omega = 3\omega_{ci}/2$ необходимо было бы провести эксперименты при одинаковых величинах магнитных полей, меняя частоту генератора. К сожалению, в этих экспериментах у нас не было такой возможности.

Заключение. В описанных выше экспериментах по нагреву плазмы ионной бернштейновской волной был зафиксирован нагрев ионов на частоте вблизи $\omega = 3\omega_{ci}/2$. Величина вводимой мощности не превышала $P = 30 \text{ кВт}$. При этом спектры ионов во время ИЦР нагрева всегда оставались максвелловскими. Эффективность нагрева ионов составила величину $\eta = 1.5 \text{ эВ/кВт}$ при плотности плазмы $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Нагрев ионов на частоте $\omega = 3\omega_{ci}/2$ указывает на то, что происходит возбуждение ИБВ в плазме. Обнаружено также, что используемая нами в экспериментах антенна

(Нагоя тип III) кроме ИБВ возбуждает также и БМЗВ. Поэтому, хотя эффективность нагрева на частоте $\omega = \omega_{ci}$ была примерно такой же как на $\omega = 3\omega_{ci}/2$, разделить влияние ИБВ и БМЗВ в данном случае затруднительно.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 96-02-18089а).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Schmidt J., Bateman G., Buchell C., et al. Proc. 11th Int. Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. (Kyoto, 1986), Vienna: IAEA, **3**, 259 (1987).
- [2] Лонгинов А. В., Степанов К. Н. Тр. Всесоюзн. совещ. по высокочастотному нагреву плазмы. Горький, 1982, с. 105.
- [3] Grambilla M., Cardinali A. Nucl. Fusion, **32**, 465 (1992).
- [4] Оно М. Phys. Fluids, **В 5(2)**, 241 (1993).
- [5] Оно М., Watari T., Ando R., et al. Phys. Rev. Lett., **54**, no.21, 2339 (1985).
- [6] Оно М., Beiersdorffer P., Bell R., et al. Phys. Rev. Lett., **60**, no. 4, 294 (1988).
- [7] Moody J. D., Porkolab M., Fiore C. L., et al. Phys. Rev. Lett., **60**, no. 4, 298 (1988).
- [8] Grambilla M. Nucl. Fusion, **28**, 549 (1988).
- [9] Nishimura K., Kumazawa R., Mutoh T., et al. Proc. 8th Stellarator Workshop, 1991, p. 235.
- [10] Grebenshchikov S. E., Abrakov V. V., Akulina D. K., et al. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. (Ceville, 1994). Vienna: IAEA, **2**, 327 (1995).
- [11] Афросимов В. В., Березовский Е. Л., Гладковский Е. П. и др. ЖТФ, **45**, 56 (1975).
- [12] Батюк В. А., Воронов Г. С., Гиппиус Е. Ф. и др. Физика плазмы, **13**, 259 (1987).
- [13] Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., et al. Nucl. Fusion, **37**, 233 (1977).
- [14] Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. Высшая школа, М., 1978.
- [15] Хольнов Ю. В. Труды ИОФАН, **31**, 117 (1991).

Поступила в редакцию 22 октября 1998 г.