

УДК 533.9

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С КВАДРУПОЛЬНОЙ АНТЕННОЙ ДЛЯ ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2022 г. А. И. Мещеряков^а, *, И. А. Гришина^а, И. Ю. Вафин^а^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 25.06.2022 г.

Проведены первые эксперименты по тестированию квадрупольной антенны в режиме электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. Тестовые измерения сопротивления излучения антенны показали, что новая антенна возбуждает в плазме как быстрые, так и медленные магнитозвуковые волны. Измерено сопротивление излучения антенны и построены его зависимости от энергосодержания и плотности плазмы.

Ключевые слова: квадрупольная антенна, ионный циклотронный резонансный нагрев плазмы, стелларатор Л-2М, быстрые и медленные магнитозвуковые волны, коаксиальные моды

DOI: 10.31857/S0367292122600881

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее распространенных методов дополнительного нагрева плазмы в тороидальных магнитных ловушках является метод высокочастотного (ВЧ) нагрева с применением электромагнитных волн в диапазоне ионных циклотронных резонансных (ИЦР) частот для возбуждения в плазме быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн. Этот метод используется на многих установках наряду с СВЧ-методами электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы, СВЧ-методами нагрева в области нижнегибридных плазменных частот, а также методами инжекции в плазму пучков высокоэнергетических атомов водорода или дейтерия.

В настоящее время для возбуждения в плазме волн в диапазоне ионных циклотронных частот используют петлевые антенны, состоящие из одной или нескольких токовых полос, создающих азимутальные токи внутри вакуумной камеры тороидальной магнитной ловушки. Наилучшие результаты с точки зрения эффективности возбуждения БМЗ-волн и нагрева плазмы продемонстрировали квадрупольные антенны, состоящие из четырех токовых витков. Это связано с тем, что такие антенны позволяют возбуждать в плазме БМЗ-волны с нужными продольными и азимутальными волновыми числами, а также значительно уменьшить возбуждение паразитных поверхностных волн и коаксиальных мод с низкими

продольными волновыми числами. При этом значительно снижается нагрев периферийных слоев плазмы и пристеночной области (scrape-off-layer), и, соответственно, уменьшается поступление примесей в плазму во время ИЦР-нагрева плазмы. Эксперименты по ионному циклотронному нагреву плазмы с помощью квадрупольных антенн проводились на многих токамаках, например, на JET [1], ASDEX-Upgrade [2], KSTAR [3], и EAST [4].

В данной статье описаны первые эксперименты с новой квадрупольной антенной, проведенные в стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР-нагрева электронов плазмы.

2. КВАДРУПОЛЬНАЯ АНТЕННА ДЛЯ ИЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Квадрупольная антенна для ИЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М состоит из 4-х токовых витков, расположенных в двух соседних сечениях тороидальной вакуумной камеры стелларатора. На рис. 1 представлены два токовых витка 1 и 2, расположенные в одном сечении вакуумной камеры стелларатора. Соседнее сечение, в котором расположены два идентичных токовых витка 3 и 4, отстоит от данного сечения на расстояние 22.5 см вдоль оси тороидального плазменного шнура. Ширина каждого токового витка составляет 7.5 см, а площадь поверхности — 250 см².

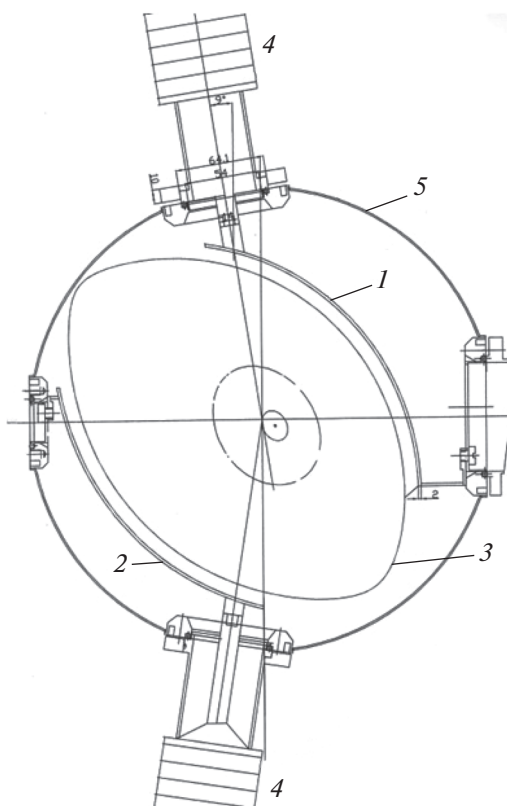


Рис. 1. Схема расположения антенны для ИЦР-нагрева плазмы в полоидальном сечении вакуумной камеры стелларатора Л-2М. Показаны два из четырех токовых витков квадрупольной антенны, расположенные в одном поперечном сечении вакуумной камеры стелларатора Л-2М. 1 и 2 – токовые витки квадрупольной антенны, расположенные в одном поперечном сечении вакуумной камеры; 3 – последняя замкнутая магнитная поверхность; 4 – высоковольтные вакуумные изоляторы; 5 – вакуумная камера.

Поверхность каждого витка, обращенная к плазме, повторяет форму поверхности сепаратрисы магнитной структуры стелларатора и отстоит от нее на 1 см. Токовые витки не защищены электростатическим экраном. Каждый виток питается от генератора отдельным ВЧ-фидером. Поэтому в зависимости от сдвига фаз напряжения, поданного на отдельные витки антенны, имеется возможность возбуждать БМЗ-волны с различными тороидальными волновыми числами и азимутальными модами. Вакуумные вводы собраны на основе высоковольтных керамических изоляторов, которые позволяют подавать на антенну ВЧ-напряжение до 15 кВ. При подаче такого напряжения на квадрупольную антенну (с учетом общей площади антенной системы около $S_{an} = 10^3 \text{ см}^2$) можно ожидать, что ВЧ-мощность, излучаемая квадрупольной антенной в экспериментах по ИЦР-нагреву водородно-дейтериевой (D + H) плазмы, составит около $P = 200 \text{ кВт}$.

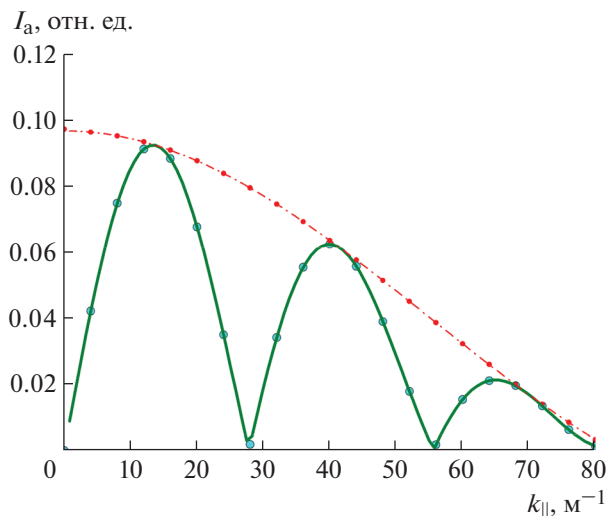


Рис. 2. Расчетные спектры тороидальных мод квадрупольной (сплошная линия) и одновитковой (пунктирная линия) ВЧ-антенн.

При подаче противофазного напряжения на витки квадрупольной антенны, находящиеся в одном сечении плазменного шнура, максимум амплитуды азимутальных мод приходится на азимутальное волновое число $m = 1$ [5]. При этом из проведенных ранее экспериментов [6] известно, что в экспериментальных условиях стелларатора Л-2М, когда плотность плазмы составляет $n_e = (1-3) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, в плазме возбуждается только одна азимутальная мода $m = 1$. Поэтому для эффективного возбуждения БМЗ-волн в плазме стелларатора Л-2М следует использовать только противофазное питание витков квадрупольной антенны, находящихся в одном поперечном сечении плазменного шнура.

Теперь рассмотрим спектр тороидальных мод, которые можно возбудить с помощью описываемой квадрупольной антенны. На рис. 2 представлен расчетный спектр тороидальных мод (сплошная линия) для условий, когда витки 1 и 3, расположенные в соседних сечениях плазмы, запитаны в противофазе (разность фаз ВЧ-тока в витках 1 и 3 равна π). На этом же рисунке пунктирной линией показан спектр тороидальных мод, возбуждаемых одним витком квадрупольной антенны. Эти спектры получены разложением токов отдельных витков квадрупольной антенны в ряд Фурье по тороидальным модам. Из рисунка видно, что в случае подачи на витки, находящиеся в соседних сечениях плазмы, питания с разностью фаз π , максимум амплитуды возбуждаемых тороидальных мод приходится на продольное волновое число $k_{||} = 14 \text{ м}^{-1}$.

Отметим также, что антенна, состоящая из одного витка, способна возбуждать и коаксиальные

моды. Продольные волновые числа возбуждаемых коаксиальных волн имеют значения $k_{\parallel} < 1 \text{ м}^{-1}$ и, соответственно, их фазовые скорости близки к скорости света. Поэтому, чтобы эти волны не возбуждались, необходимо обрезать спектр тороидальных мод в области $k_{\parallel} < 1 \text{ м}^{-1}$. Как видно из рис. 2, при использовании квадрупольной антенны с противофазным питанием витков, расположенных в соседних тороидальных сечениях, амплитуда возбужденных коаксиальных мод с $k_{\parallel} < 1 \text{ м}^{-1}$ будет на порядок меньше, по сравнению с одновитковой антенной.

Таким образом, анализ спектров азимутальных и тороидальных мод позволяет утверждать, что для эффективного возбуждения БМЗ-волн в плазме стелларатора Л-2М с помощью квадрупольной антенны, необходимо чтобы каждые два соседних витка (расположенные как в одном сечении, так и в соседних) были запитаны в противофазе.

Созданная квадрупольная антенна будет использована в экспериментах по ИЦР-нагреву ионной компоненты плазмы в стеллараторе Л-2М. Будут использоваться несколько схем нагрева ионов. Во-первых, схема нагрева дейтериевой плазмы с малой добавкой водорода, когда дисперсия волны определяется основными ионами плазмы – ионами дейтерия. При этом БМЗ-волна поглощается непосредственно ионами водорода [7]. Вторая возможная схема нагрева заключается в осуществлении, так называемого, режима конверсии мод в (D + H)-плазме, когда добавка водорода влияет на дисперсию БМЗ-волны, и в области ион-ионного резонанса происходит конверсия БМЗ-волны в медленную магнитозвуковую (ММЗ) волну [8]. Медленная магнитозвуковая волна может поглощаться как электронами плазмы за счет механизма затухания Ландау, так и ионами водорода в области ионного циклотронного резонанса. В данной статье описаны эксперименты с использованием третьей возможной схемы нагрева ионной компоненты плазмы – нагрев ионов водорода на частоте ионного циклотронного резонанса. Эта схема нагрева была ранее впервые реализована на стеллараторе Л-2М [9]. Эффективность нагрева ионной компоненты плазмы в этих экспериментах была не меньше, чем в упомянутых выше схемах.

В обсуждаемых ниже тестовых экспериментах вводимая в плазму ВЧ-мощность составляла менее 1 кВт. В перспективе планируется увеличить вводимую мощность до 200 кВт и проводить исследования нагрева ионной компоненты плазмы и генерации токов увлечения волнами в диапазоне ионных циклотронных частот.

3. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ

В водородной плазме стелларатора Л-2М в режиме ЭЦР-нагрева были проведены первые эксперименты по тестированию описанной выше квадрупольной антенны. Стелларатор Л-2М представляет собой классический двухзаходный стелларатор ($l = 2, N = 7$) с большим радиусом тора $R = 1 \text{ м}$, радиусом плазмы $a = 0.115 \text{ м}$, и тороидальным магнитным полем $B_0 = 1.34 \text{ Т}$. Плазма создается и нагревается с помощью СВЧ-излучения гиротрона на второй гармонике электронного циклотронного резонанса ($f = 75 \text{ ГГц}$). Мощности ЭЦР-нагрева может варьироваться в диапазоне $100 < P_{\text{ЭЦР}} < 600 \text{ кВт}$. Рабочий диапазон плотности плазмы $1 \times 10^{19} < n_e < 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Сопротивление излучения антенны измерялось с использованием измерителя амплитуд падающей и отраженной волн [5].

Эволюция во времени основных параметров плазмы в этом эксперименте представлена на рис. 3. (сверху вниз): средняя по хорде электронная плотность $n_e(t)$, мощность радиационных потерь $P_{\text{rad}}(t)$, интенсивность излучения линии атомарного водорода $H_{\alpha}(t)$, энергосодержание плазмы $W(t)$ и его производная $dW(t)/dt$, сопротивление излучения антенны $R_{\text{load}}(t)$, мощность ЭЦР-нагрева $P_{\text{ЭЦР}}(t)$. Эксперименты проводились при мощности ЭЦР-нагрева $P_{\text{ЭЦР}} \sim 200 \text{ кВт}$ и плотности плазмы $n_e \sim 1.7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на квазистационарной стадии разряда. При этом частота ВЧ-генератора составляла 20 МГц, что соответствует циклотронному резонансу иона водорода в магнитном поле стелларатора в центре плазменного шнура. Мощность ВЧ-генератора составляла около 1 кВт. При помощи фидера она подавалась на один из четырех витков квадрупольной антенны. Такие измерения в режиме ЭЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М проводились впервые.

Как видно из рис. 3, временная эволюция сопротивления излучения антенны в течение импульса плазмы является довольно сложной. Она коррелирует с изменениями свойств плазмы, происходящими по мере того, как она проходит через различные фазы удержания плазмы при ЭЦР-нагреве, выявленные в предыдущих исследованиях на стеллараторе Л-2М [10]. На рис. 3 фазы ЭЦР-нагрева показаны цифрами и разделены вертикальными линиями. Динамику сопротивления излучения антенны в различных фазах удержания плазмы удобно также проследить на его зависимости от энергосодержания плазмы (рис. 4), построенной по данным импульса, представленного на рис. 3. На этом рисунке черными квадратами обозначены данные, относящиеся к фазе 1,

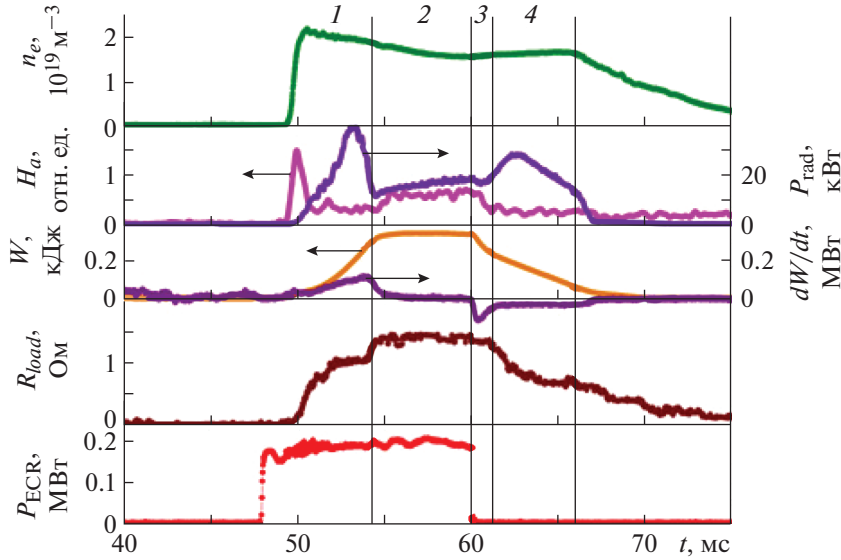


Рис. 3. Эволюция во времени параметров плазмы и сопротивления излучения антенны в режиме ЭЦР-нагрева. Импульс #22407. Сверху вниз показаны: средняя по хорде электронная плотность $n_e(t)$, интенсивности радиационных потерь $P_{rad}(t)$ и излучения линии водорода $H_\alpha(t)$, энергосодержание плазмы $W(t)$ и его производная $dW(t)/dt$, сопротивление излучения антенны $R_{load}(t)$, мощность ЭЦР-нагрева $P_{ECRH}(t)$.

красными кружками – к фазе 2, зелеными треугольниками – к фазе 3 и синими звездами – к фазе 4. В фазе 1 плазма постепенно прогревается от центра к периферии. Периферия плазмы при этом остается холодной, и взаимодействие плазмы со стенкой отсутствует (detachment regime).

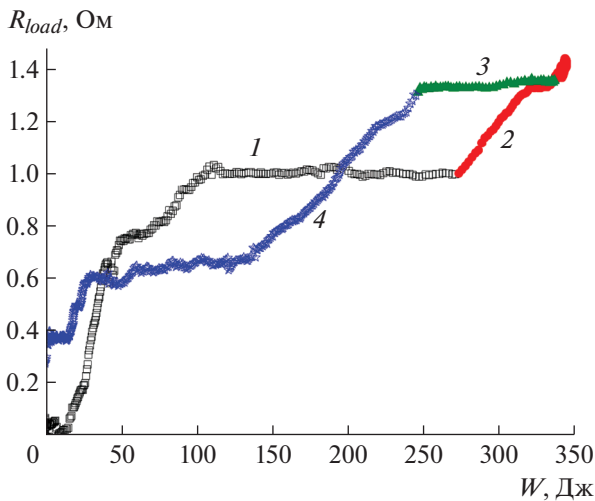


Рис. 4. Зависимость сопротивления излучения антенны от энергосодержания плазмы, построенная по данным импульса #22407, представленного на рис. 3. На рисунке черными квадратами обозначены данные, относящиеся к фазе 1 ЭЦР-нагрева плазмы, красными кружками – к фазе 2, зелеными треугольниками – к фазе 3 и синими звездами – к фазе 4.

Радиационный механизм является основным механизмом потерь энергии. В фазе 1 по мере роста энергосодержания плазмы происходит увеличение сопротивления излучения антенны (рис. 4). Сначала оно нарастает быстро, а затем его рост замедляется, и к концу фазы 1 оно выходит на стационар ($R_{load} \sim 1$ Ом). В этой фазе величина сопротивления излучения антенны определяется нагрузкой, возникающей благодаря возбуждению БМЗ-волн и коаксиальных мод [11].

Фаза 2 ЭЦР-нагрева начинается, когда периферия плазмы прогревается и начинается интенсивное взаимодействие плазмы со стенкой, при этом открывается дополнительный канал потерь, связанный с теплопроводностью и диффузией. Из рис. 3 и 4 видно, что при переходе от фазы 1 к фазе 2 сопротивление излучения антенны резко возрастает на 30% ($\Delta R_{load} = 0.4$ Ом), а затем остается постоянным в течение всей фазы 2. Это возрастание сопротивления излучения антенны связано с поглощением в центральной области плазмы медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн с большими продольными волновыми числами $k_{||} = 40-60$ м⁻¹, которые возбуждаются непосредственно антенной. Рисунок 2 (пунктирная линия) показывает, что одновитковая антенна способна возбуждать ММЗ-волны с $k_{||} = 40-60$ м⁻¹ достаточно большой амплитуды (всего лишь в два раза меньше, чем амплитуда БМЗ-волн с $k_{||} = 10-15$ м⁻¹).

Направление распространения ММЗ-волн зависит от электронной температуры плазмы в области, так называемого, альфвеновского резонанса [12]

$$\varepsilon_1 - n_{\parallel}^2 = 0,$$

где ε_1 — компонента тензора диэлектрической проницаемости в направлении, перпендикулярном магнитному полю, k_{\parallel} — продольное волновое число, $n_{\parallel} = k_{\parallel}c/\omega$ — продольный показатель преломления волны (при распространении волны вдоль магнитного поля), c — скорость света, ω — круговая частота ММЗ-волны. В данном эксперименте резонансные условия выполнялись на периферии плазмы, на радиусе $r = 0.95a_p$ [13]. Если в этой области также выполняется условие:

$$\frac{\omega}{\sqrt{2}k_{\parallel}V_{Te}} < 1, \quad (1)$$

где V_{Te} — тепловая скорость электронов, то ММЗ волна распространяется к центру плазмы и поглощается электронами в области ион-ионного гибридного резонанса или ионами в области ионного циклотронного резонанса. Для ММЗ волн с $k_{\parallel} = 40\text{--}60 \text{ м}^{-1}$ условие (1) выполняется уже при электронной температуре $T_e = 10\text{--}15 \text{ эВ}$. На квазистационарной стадии ЭЦР-нагрева плазмы электроны в области $r \approx 0.95a_p$ заведомо обладают

такой температурой. В случае если $\frac{\omega}{\sqrt{2}k_{\parallel}V_{Te}} > 1$ (это условие выполняется в фазе 1), волна распространяется в направлении к краю плазменного столба, где расположена антенна. В этом случае нагрузка антенны, возникающая за счет возбуждения ММЗ-волны, значительно меньше, чем в случае распространения ММЗ-волны к центру плазмы. Иными словами, увеличение электронной температуры на периферии плазмы при переходе из фазы 1 в фазу 2 приводит к изменению направления распространения ММЗ-волны и, тем самым, к увеличению сопротивления излучения антенны.

Фаза 3 наступает после выключения ЭЦР-нагрева. Она характеризуется падением энергосодержания плазмы при постоянной средней плотности (рис. 3). При этом тепловые потоки из плазмы за счет теплопроводности значительно превышают радиационные потери, что препятствует остыванию периферийных областей плазмы. Поэтому в фазе 3 по-прежнему выполняются условия для поглощения БМЗ и ММЗ-волн, и сопротивление излучения антенны остается на том же уровне, что и в фазе 2.

Переход из фазы 3 в фазу 4 обусловлен тем, что энергосодержание плазмы продолжает падать, потоки тепла за счет теплопроводности уменьшаются, электронная температура на периферии па-

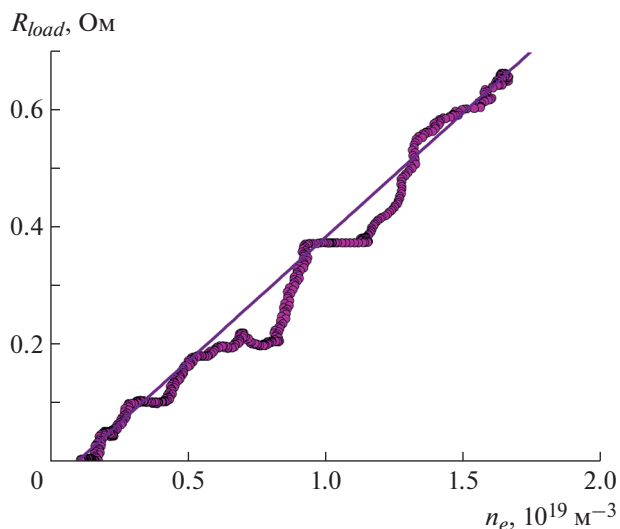


Рис. 5. Зависимость сопротивления излучения антенны от средней плотности плазмы для временного интервала с 66 по 75 мс, построенная по данным рис. 3. Прямая линия — линейная аппроксимация экспериментальных данных. Импульс #22407.

дает, и край плазмы остывает. Как видно из рис. 3 и 4, в фазе 4 сопротивление излучения антенны начинает падать, в первую очередь, за счет падения нагрузки, создаваемой ММЗ-волнами, поскольку условия для распространения ММЗ-волн в центр плазмы перестают выполняться. Начиная с 66-й мс, сопротивление излучения антенны начинает падать пропорционально средней плотности плазмы. На рис. 5 показана эта зависимость для интервала времени с 66 по 75 мс, построенная по данным рис. 3. Подобная зависимость сопротивления излучения для БМЗ-волн от плотности плазмы наблюдалась ранее на стеллараторе Л-2М в режиме омического нагрева [14]. Поэтому можно утверждать, что после 66-й мс определяющий вклад в сопротивление излучения антенны дает БМЗ-волна.

6. ВЫВОДЫ

Проведены первые эксперименты с антенной в режиме ЭЦР-нагрева водородной плазмы на стеллараторе Л-2М. В данном эксперименте мощность ВЧ-генератора не превышала 1 кВт. Тестовые измерения сопротивления излучения антенны показали, что новая антенна, установленная на стеллараторе Л-2М, способна возбуждать как БМЗ-волны, так и ММЗ-волны, а также коаксиальные моды, распространяющиеся вне плазменного шнура. Измерено сопротивление излучения антенны, и построена его зависимость от энергосодержания плазмы. Анализ этой зависимости позволяет установить, ту часть излучае-

мой антенной мощности, которая расходуется на возбуждение ММЗ-волн, возбуждаемых непосредственно антенной ($R_{load}^{SMS} = 0.4 \text{ Ом}$), а также БМЗ-волн и коаксиальных мод ($R_{load}^{FMS+CM} = 1.0 \text{ Ом}$). В данном тестовом эксперименте напряжение подавалось только на один из витков квадрупольной антенны. Ожидается, что при использовании всех витков квадрупольной антенны, доля мощности, приходящаяся на возбуждение коаксиальных мод, будет значительно меньше.

Проведенные эксперименты показали, что динамика сопротивления излучения антенны в течение импульса находится в согласии с имеющейся на сегодняшний день физической картиной удержания плазмы в течение четырех фаз нагрева и остывания плазмы в стеллараторе Л-2М.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. JET Joint Undertaking Progress Report EUR14434 EN (EUR-JET-PR9) (JET Joint Undertaking, Abington, 1992).
<http://aei.pitt.edu/58111/1/JET.J.U.1991.V.1.pdf>.
2. Faugel H., Angene P., Becker W., Braun F., Bobkov V.I., Eckert B., Fischer F., Hartmann D.A., Heilmaier G., Kneidl J., Noterdaeme J.-M., Siegl G., and Würsching E. // Fusion Eng. Des. 2005. V. 74. P. 319.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.268>
3. Park B.H., Yoon S.W., Na Y.S., Park J.M. and Kim J.Y. // Proc.33rd EPS Conf. Plasma Physics, Rome. 2006. ECA V. 30I. P-2.180. Study on ICRH and FWCD for KSTAR Baseline Operation Period.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.499.3918&rep=rep1&type=pdf>.
4. Zhang X.J., Qin C.M., Liu L.N., Zhao Y.P., Mao Y.Z., Yang H., Lv B., Chang J.F., Huang J., Wang L., Yuan S., Deng X., Chen G., Cheng Y., Ju S.Q. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2254. 030004.
<https://doi.org/10.1063/5.0013587>
5. Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю. // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 5. (в печати).
6. Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Морозов А.Е., Голуков А.А., Нечаев Ю.И. // Физика плазмы. 2008. V. 34. P. 231.
7. Van Eester D., Lerche E., Jacquet P., Bobkov V., Czarnicka A., Colas L., Crombé K., Dumont R., Ericsson G., Eriksson J., Giroud C., Goniche M., Graham M., Kiptily V., Ongena J. et al. // Proc. 41st EPS Conf. Plasma Physics, Berlin, 2014, ECA 38F. P1. 002.
<http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P1.002.pdf>.
8. Batiuk V.A., Grebenshchikov S.E., Kovan I.A., Meshcheryakov A.I. et al. // Proc. 3rd Varenna-Grenoble International Symposium, Grenoble. 1982. V. 1. P. 273.
<https://ru.zlibcdn2.com/book/2314248/ab1125>.
9. Батюк В.А., Воронов Г.С., Гиппиус Е.Ф., Гребеницков С.Е., Донская Н.П., Дябилин К.С., Илюхин Б.И., Кован И.А., Коврижных Л.М., Мещеряков А.И., Мороз П.Е., Сбитникова И.С., Суходольский В.Н., Шнигель И.С. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. С. 259.
10. Meshcheryakov A.I., Vafin I.Yu., and Grishina I.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. 1094. 012010.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012010>
11. Messiaen A., Ongena J., Dumortier P., Durodié F., Louche F., Ragona R., and Vernier M. // Fusion Eng. Des. 2016. V. 112. P. 12.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.06.035>
12. Голант В.Е., Федоров В.И. Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 141.
13. Мороз П.Е. Препринт ИОФ РАН. 1986. № 170.
14. Мещеряков А.И., Бережецкий М.С., Морозов А.Е., Нечаев Ю.И. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 53.