

КВАДРУПОЛЬНАЯ АНТЕННА И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАРАТОРЕ L-2M

© 2022 г. А. И. Мещеряков^{a,*}, И. А. Гришина^a, И. Ю. Вафин^a

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

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

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 28.04.2022 г.

Принята к публикации 30.04.2022 г.

На стеллараторе L-2M сконструирована и изготовлена квадрупольная антенна для экспериментов по ионному циклотронному нагреву плазмы и генерации токов увлечения. С использованием измерителя мощности падающей и отраженной волн проведены первые измерения сопротивления излучения антенны в режиме омического нагрева. Получена зависимость сопротивления излучения антенны от средней плотности плазмы. Показано, что доля поглощенной мощности, приходящаяся на коаксиальные моды, составляет 25%. Созданная квадрупольная антенна может быть также использована для генерации токов увлечения. Предлагаемый метод основан на конверсии быстрых магнитозвуковых волн в медленные магнитозвуковые волны с их последующим поглощением электронами плазмы, сопровождаемым генерацией токов увлечения.

DOI: 10.31857/S0032816222050287

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных методов дополнительного нагрева плазмы в тороидальных магнитных ловушках является метод ВЧ-нагрева в диапазоне ионных циклотронных частот с помощью быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн. Этот метод используется на многих установках наряду с методами электронного циклотронного резонансного нагрева, нагрева в области нижнегибридных частот и нейтральной инжекции.

В настоящее время для возбуждения 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 продемонстрировали квадрупольные антенны, состоящие из четырех токовых витков. Это связано с тем, что такие антенны позволяют возбуждать БМЗ-волны с нужными тороидальными и полоидальными волновыми числами и значительно уменьшить амплитуду возбуждения паразитных поверхностных волн и цилиндрических мод с низкими продольными волновыми числами. При этом значительно снижается нагрев периферийных слоев плазмы и пристеночной области (scrape-off-layer) и, соот-

ветственно, уменьшается поступление примесей в плазму во время ионного циклотронного нагрева.

Эксперименты по ионному циклотронному резонансному (ИЦР) нагреву плазмы с помощью квадрупольных антенн проводились на многих токамаках, например: JET, ASDEX, D-III-D, KSTAR, EAST. Наиболее успешные эксперименты по ИЦР-нагреву, в которых в плазму вводилась максимальная мощность, были проведены на токамаке JET. Токамак JET является самым большим действующим токамаком в мире. В экспериментах на этой установке было получено 16 МВт термоядерной энергии синтеза [1]. В экспериментах по ИЦР-нагреву плазмы на токамаке JET использовались четыре четырехвитковые антенны и восемь ВЧ-генераторов. Кроме того, использовалась специальная система согласования отдельных витков антенны и генератора, включающая в себя гибридные 3dB-разделители. Такая система питания антенн позволяет избежать резких изменений нагрузки генераторов при возникновении ELM-событий. В эксперименте по ИЦР-нагреву D+H-плазмы в токамаке JET максимальная поглощаемая в плазме мощность составила 22 МВт [2]. В результате этого увеличились электронная температура от 2.5 до 8 кэВ, ионная температура плазмы от 2 до 7 кэВ, а энергосодержание плазмы от 1.5 до 6 МДж. Излучаемая в плазму мощность,

деленная на площадь антенн, в этих экспериментах достигла 1 МВт/м^2 . В настоящее время на токамаке JET проходит испытание антенна, предназначенная для работы на строящемся токамаке ITER [1], для нее излучаемая мощность, приведенная к единице площади антенны, составляет около 4 МВт/м^2 .

Система ИЦР-нагрева плазмы на токамаке ASDEX-Upgrade состоит из четырех ВЧ-генераторов мощностью 2 МВт каждый и четырех квадрупольных антенн. Каждая антенна имеет площадь 0.8 м^2 . В экспериментах по нагреву D+H-плазмы максимальная мощность, поглощаемая в плазме, достигала 7.2 МВт (90% мощности ВЧ-генераторов), а приведенная мощность, излучаемая антенной, составила 2.25 МВт/м^2 [3].

Токамак KSTAR функционирует с 2008 года и является одной из установок, обладающих полностью сверхпроводящими магнитными катушками. Система ионного циклотронного нагрева включает в себя антенну, состоящую из четырех токовых витков, расположенных внутри вакуумной камеры токамака [4]. Мощность, излучаемая одним витком антенны, составляет 1.5 МВт , а мощность всей системы ионного циклотронного нагрева — 6 МВт .

Китайский токамак EAST также имеет полностью сверхпроводящую магнитную систему. Система ИЦР-нагрева на токамаке EAST специально предназначена для экспериментов с длинными разрядами с высоким β (β — отношение газодинамического давления к давлению магнитного поля). Система ИЦР-нагрева на токамаке EAST состоит из двух антенн, в каждой из которой имеется по четыре токовых витка [5]. Фаза напряжения, подаваемого на каждый токовый виток, может быть подобрана таким образом, чтобы оптимизировать спектр возбуждаемых волн. ВЧ-генераторы системы ИЦР-нагрева способны подавать мощность $P_{\text{ICRH}} = 12 \text{ МВт}$ на две антенны в импульсе длительностью $t = 1000 \text{ с}$.

ВЧ-методы также используются для генерации токов увлечения в тороидальных магнитных ловушках. Для обеспечения непрерывного цикла работы токамака-реактора проблема создания стационарного плазменного тока за счет генерации токов увлечения является ключевой. В настоящее время на действующих тороидальных установках ведется активный поиск наиболее эффективных методов создания токов увлечения.

На сегодняшний день наибольших успехов в создании токов увлечения на токамаках удалось добиться с помощью волн в нижнегибридном ($1-10 \text{ ГГц}$) диапазоне частот. Этот метод состоит в том, что с помощью волноводных гриллов в плазме возбуждается медленная волна, которая распространяется в центр плазменного шнура, где поглощается на электронах в области нижнеги-

бридного резонанса. Этот метод генерации токов увлечения является довольно эффективным, однако обладает принципиальным ограничением по плотности плазмы для каждой конкретной установки. Для волн в этом частотном диапазоне существует область непрозрачности на краю плазменного шнура, что препятствует проникновению медленной волны в центральные области плазмы. Для каждой установки ограничение метода по плотности плазмы определяется магнитным полем данной установки, а также спектром волн, возбуждаемых используемой антенной.

Наиболее успешными были эксперименты по нижнегибридной генерации токов увлечения на токамаке JT-60U [6]. На этом токамаке была достигнута наибольшая эффективность генерации токов увлечения ($3.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{А/Вт}$), а также получен наибольший для тороидальных магнитных ловушек ток увлечения 3.6 МА . Эти значения являются рекордными для экспериментов по генерации токов увлечения любыми методами.

В настоящее время на тороидальных установках исследуется еще один метод генерации токов увлечения — с использованием волн в диапазоне электронных циклотронных частот ($20-200 \text{ ГГц}$). В этих экспериментах генерация токов увлечения происходит в результате электронного циклотронного резонансного поглощения СВЧ-волны. Такие эксперименты проводились на токамаках T-10 [7] и DIII-D [8]. Поскольку механизм поглощения волны циклотронный, энергия волны увеличивает поперечную (по отношению к направлению магнитного поля) скорость электронов. В результате эффективность создания токов увлечения вдоль магнитного поля оказывается низкой. Например, в экспериментах на токамаке DIII-D [8] эффективность создания токов увлечения составила $0.19 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{А/Вт}$ при возрастании электронной температуры примерно до 7 кэВ . Таким образом, полученная в экспериментах на этих токамаках эффективность генерации токов увлечения волнами в диапазоне электронных циклотронных частот оказалась как минимум на порядок ниже, чем при использовании методов нижнегибридной генерации токов увлечения.

На токамаках также проводятся исследования генерации токов увлечения волнами в диапазоне ионных циклотронных частот. На токамаке DIII-D проведены эксперименты по генерации токов увлечения с помощью быстрых магнитозвуковых волн в диапазоне $60-83 \text{ МГц}$ [9]. За счет фазировки трех антенн в эксперименте добивались распространения БМЗ-волны вдоль плазменного тока или в обратном направлении. БМЗ-волна поглощалась на электронах за счет механизма затухания Ландау. В этом эксперименте эффективность создания токов увлечения составила $0.54 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{А/Вт}$. Видно, что по эффективно-

сти этот метод создания токов увлечения заметно уступает методу с использованием волн в нижне-гибридном частотном диапазоне.

В данной статье описана квадрупольная антенна, которую предполагается использовать в экспериментах по ионному циклотронному нагреву и генерации токов увлечения на стеллараторе Л-2М. Описан также диагностический комплекс, с помощью которого предполагается исследовать распространение и поглощение БМЗ-волн в плазме, а также изложены результаты, полученные в первых экспериментах.

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

Квадрупольная антенна для ИЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М состоит из четырех токовых витков, расположенных в двух соседних сечениях вакуумной камеры стелларатора. На рис. 1 представлены два токовых витка 1 и 2, находящиеся в одном сечении. Соседнее сечение, в котором расположены два идентичных токовых витка, отстоит от данного сечения на расстояние 22.5 см вдоль оси плазменного шнура. Ширина каждого токового витка составляет 7.5 см, а площадь поверхности – 2.5 дм². Поверхность каждого витка, обращенная к плазме, повторяет форму поверхности сепаратрисы и отстоит от нее на 1 см (рис. 1). 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 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 $S_{an} \approx 0.1 \text{ м}^2$) можно ожидать, что излучаемая мощность P_{ICRH} квадрупольной антенны в экспериментах по ИЦР-нагреву D+H-плазмы составит более 200 кВт.

В приближении цилиндрической плазмы решение волнового уравнения для компонент электрического вектора БМЗ-волны может быть получено в следующем виде:

$$E(r, \varphi, z) = E_0(r) \exp[-i(\omega t - m\varphi - k_{\parallel}z)],$$

где m – азимутальное волновое число, k_{\parallel} – продольное волновое число и $E_0(r)$ – радиальное распределение компонент электрического поля волны.

Рассмотрим спектры азимутальных и тороидальных мод, которые данная квадрупольная антенна может возбуждать в плазме стелларатора

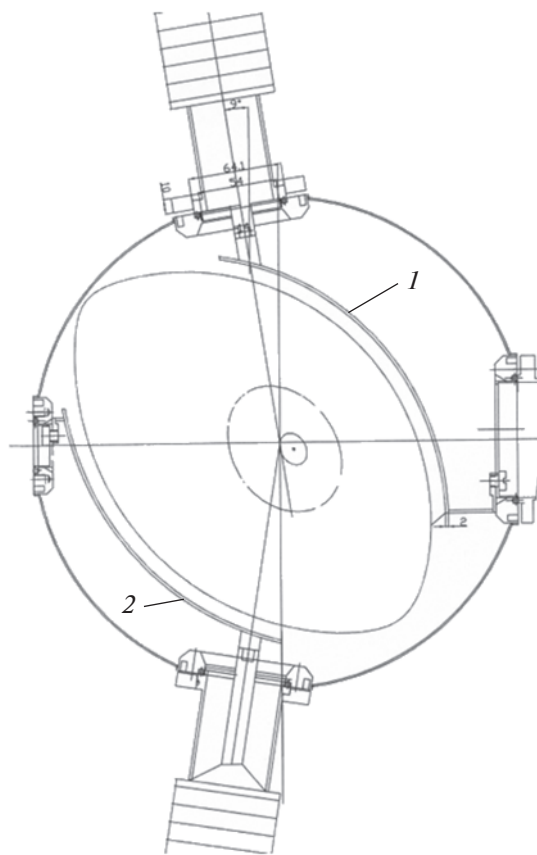


Рис. 1. Два (1, 2) из четырех токовых витков квадрупольной антенны, расположенные в одном поперечном сечении стелларатора Л-2М.

Л-2М. Эти спектры получены при разложении тока антенны в ряд Фурье по азимутальным и тороидальным модам. На рис. 2 представлены расчетные спектры азимутальных мод, полученные в условиях, когда витки антенны 1 и 2 (см. рис. 1) запитаны либо в противофазе ($0 - \pi$), либо синфазно ($0 - 0$). Согласно рис. 2, при запитывании витков в противофазе максимум амплитуды азимутальных мод приходится на $m = 1$. Ранее на стеллараторе Л-2М проводились исследования возбуждения и распространения БМЗ-волн в плазме стелларатора Л-2М [10]. При этом было установлено, что в экспериментальных условиях стелларатора Л-2М, когда плотность плазмы составляет $n_e = (1-3) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, 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 сечении.

Рассмотрим спектр тороидальных мод, которые можно возбудить с помощью описываемой квадрупольной антенны. На рис. 3 представлены расчетные спектры тороидальных мод, полученные в условиях, когда витки, расположенные в

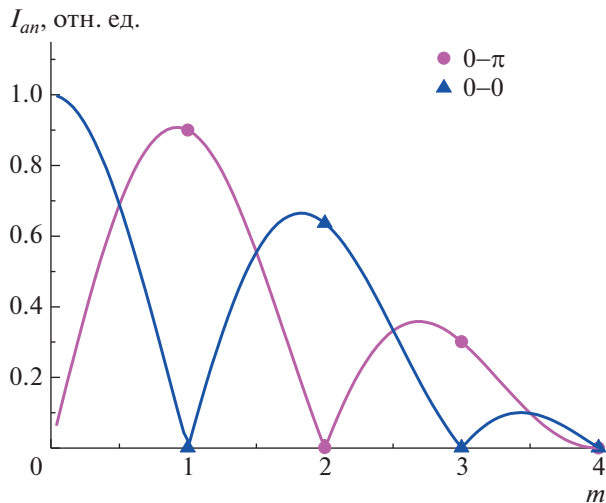


Рис. 2. Спектр азимутальных мод.

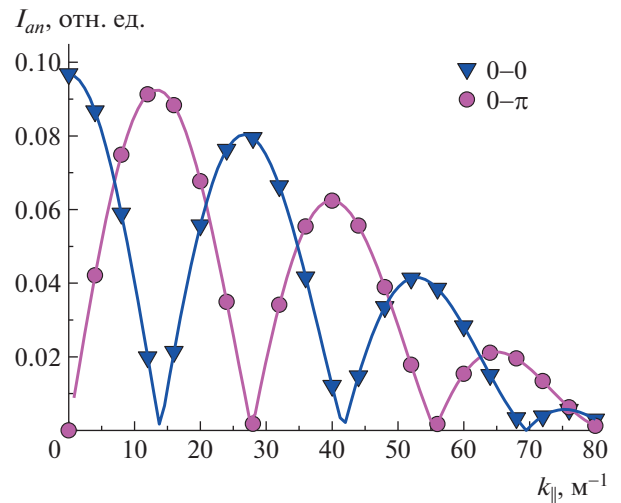


Рис. 3. Спектр тороидальных мод.

соседних сечениях плазмы, запитаны либо в противофазе ($0-\pi$), либо синфазно ($0-0$). Согласно рисунку, при запитывании в противофазе витков, находящихся в соседних сечениях, максимум амплитуды тороидальных мод приходится на $k_{||} = 14 \text{ м}^{-1}$. Ранее было экспериментально показано [10], что в рабочем диапазоне плотностей стелларатора Л-2М $1 \cdot 10^{19} \leq n_e \leq 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ возможно возбуждение тороидальных мод с $k_{||} = 5-15$. Таким образом, при запитывании в противофазе витков, находящихся в соседних сечениях, возникают условия для эффективного возбуждения БМЗ-волн.

Отметим, что антенна, состоящая из одного витка, способна возбуждать также поверхностные волны и коаксиальные моды. Продольные волновые числа этих волн близки к нулю. Поэтому, чтобы эти волны не возбуждались, необходимо обрезать спектр тороидальных мод в области $k_{||} \rightarrow 0$. Согласно рис. 3, это можно сделать, подав противофазное напряжение на витки антенны, расположенные в соседних тороидальных сечениях.

Таким образом, анализ спектров азимутальных и тороидальных мод позволяет утверждать, что для эффективного возбуждения БМЗ-волн в стеллараторе Л-2М с помощью квадрупольной антенны необходимо, чтобы каждые два соседних витка (как в тороидальном, так и в азимутальном направлениях) были запитаны в противофазе. Направления токов в витках квадрупольной антенны при питании, оптимальном для возбуждения БМЗ-волн, схематически показаны на рис. 4.

3. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ

В состав диагностического комплекса системы ИЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М входят измеритель амплитуд падающей и отраженной волн в ВЧ-фидере и система магнитных зондов.

Измеритель амплитуд падающей и отраженной волн представляет собой участок высокочастотного фидера, внутри которого расположены два проводника, образующие две дополнительные распределенные линии (рис. 5). Сигналы с выходов дополнительных линий пропорциональны амплитудам падающей U_{in} и отраженной U_{ref} волн. Отношение амплитуды падающей (отраженной) волны в дополнительной линии U_{in}^{ad} (U_{ref}^{ad}) к ам-

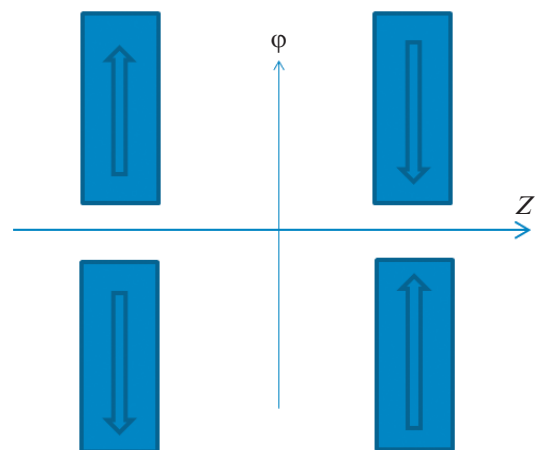


Рис. 4. Направления токов в витках квадрупольной антенны при питании, оптимальном для возбуждения БМЗ-волн.

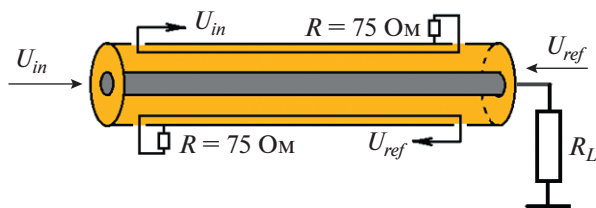


Рис. 5. Конструкция измерителя амплитуд падающей и отраженной волн.

плитуде падающей (отраженной) волны в основном ВЧ-фидере $U_{in}(U_{ref})$ определяется следующим выражением [11]:

$$U_{in}^{ad}(U_{ref}^{ad})/U_{in}(U_{ref}) = [\ln(R_0/r)/\ln(R_0/r_0)] \sin(kl),$$

где r_0 , R_0 – радиусы центрального проводника и оплетки фидера соответственно; r – расстояние от центра фидера до дополнительного проводника; k – волновое число волны, распространяющейся в фидере; l – длина дополнительной линии.

В используемом измерителе амплитуд падающей и отраженной волн это отношение равно $U_{in}^{ad}/U_{in} = U_{ref}^{ad}/U_{ref} = 1.1 \cdot 10^{-2}$. Калибровка измерителя амплитуд падающей и отраженной волн показала, что ошибка измерения данного прибора составляет 10%.

Данный прибор позволяет проводить измерения ВЧ-мощности, поглощенной в плазме, а также сопротивления излучения антенны и тока в антенне. ВЧ-мощность P_{ab} , поглощаемая в нагрузке, может быть определена из измерений амплитуд падающей и отраженной волн: $P_{ab} = U_{in}^2/(2\rho) - U_{ref}^2/(2\rho)$, где ρ – волновое сопротивление фидера. Проводя измерения поглощаемой мощности с плазмой и без плазмы, можно по разности сигналов определить ВЧ-мощность, поглощенную в плазме P_{pl} .

Высокочастотный ток в антенне I_{an} также можно найти из измерений амплитуд падающей и отраженной волн: $I_{an} = U_{an}/\rho_{an}$. Здесь $U_{an} = U_{in} + U_{ref}$ (в данном случае волновое сопротивление нагрузки больше, чем волновое сопротивление фидера), а $\rho_{an} = L_{an}\omega$ – волновое сопротивление антенны.

При известных ВЧ-мощности, поглощаемой в плазме, и токе в антенне можно определить сопротивление излучения антенны, воспользовавшись следующим соотношением:

$$P_{pl} = (1/2)I_{an}^2 R_{load}.$$

В отсутствие плазмы $R_{load} = 0$. Сопротивление излучения антенны зависит как от конструкции антенны, так и от используемого метода нагрева, т.е. от типа возбуждаемых волн и параметров плазмы, влияющих на распространение и затуха-

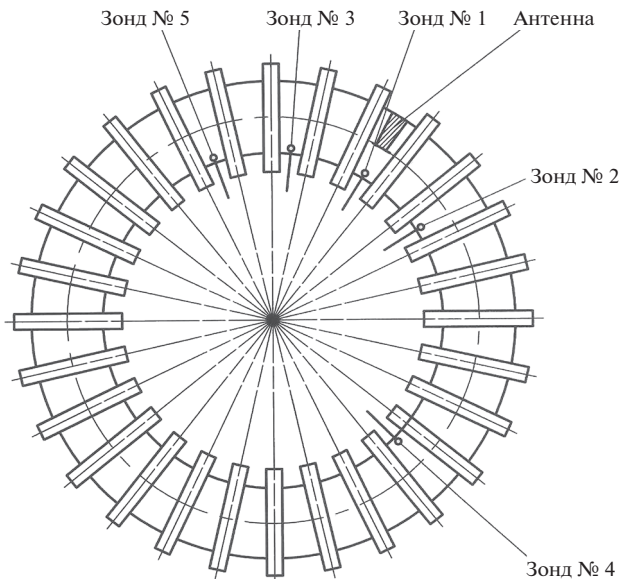


Рис. 6. Схема расположения магнитных зондов в камере стелларатора Л-2М.

ние этих волн. Исследуя зависимость сопротивления излучения антенны от параметров плазмы, можно определить оптимальные условия нагрева плазмы для используемого метода нагрева.

Вторым элементом диагностического комплекса системы ИЦР-нагрева является система магнитных зондов. Пять магнитных зондов размещены в пяти патрубках с внутренней стороны вакуумной камеры стелларатора (рис. 6). Каждый магнитный зонд представляет собой катушку диаметром 6 мм, состоящую из 12 витков. Зонды расположены в контейнерах с керамическим колпачком, отделяющим зонд от вакуумного объема камеры. Это позволяет менять поляризацию зонда, не нарушая вакуум в камере. Зонды измеряют компоненту магнитного поля БМЗ-волны в направлении ее распространения (B_z -компоненту) и в перпендикулярном направлении (B_ϕ -компоненту).

Сигнал магнитного зонда имеет вид синусоиды с частотой, равной частоте генератора. Фазовые соотношения сигналов зондов, расположенных в различных сечениях камеры, позволяют определить фазовую скорость распространения БМЗ-волны, а амплитудные – длину ее затухания. Сигналы зондов регистрируются с помощью АЦП (32-канальная быстродействующая система регистрации с объемом буферного запоминающего устройства 2 Гб, производитель – Институт ядерной физики им. Г.М. Будкера СО РАН, Новосибирск). Оцифровку сигнала можно выполнять с частотой $\nu_0 = 50, 25, 12.5$ мегаотсчетов в секунду. Разрешение по амплитуде составляет 12 бит. По сдвигу фаз $\Delta\phi$ сигналов двух зондов, разнесен-

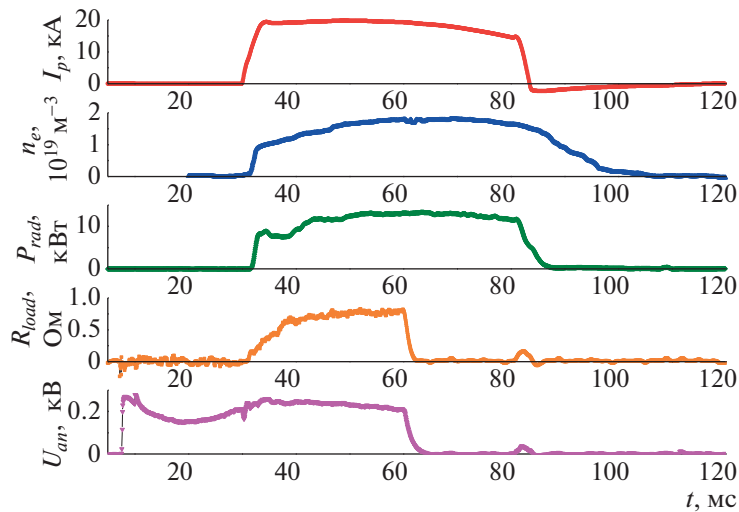


Рис. 7. Сопротивление излучения антенны R_{load} и параметры плазмы в режиме омического нагрева: I_p — ток омического нагрева, n_e — средняя по хорде электронная плотность плазмы, P_{rad} — интенсивность радиационных потерь, U_{an} — высокочастотное напряжение на антенне.

ных на расстояние Δl , можно определить фазовую скорость распространения волн вдоль тора V_ϕ и продольное волновое число $k_{||} = \omega/V_\phi$.

Данный диагностический комплекс позволит измерять фазовые скорости и спектральный состав возбуждаемых БМЗ-волн, а также определять условия, в которых эффекты нагрева и генерации токов увлечения будут максимальными.

4. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ

На стеллараторе Л-2М были проведены первые эксперименты по тестированию описанной выше квадрупольной антенны в режиме омического нагрева. На рис. 7 представлена эволюция основных параметров плазмы в этом эксперименте: тока омического нагрева $I_p(t)$, средней по хорде электронной плотности плазмы $n_e(t)$, интенсивности радиационных потерь $P_{rad}(t)$, сопротивления излучения антенны $R_{load}(t)$ и высокочастотного напряжения на антенне $U_{an}(t)$. Эксперименты проводились при мощности омического нагрева около 65 кВт и плотности плазмы $n_e \sim (1.5-2.0) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Сопротивление излучения антенны определялось с помощью измерителя амплитуд падающей и отраженной волн, согласно методике, описанной выше. В данном эксперименте мощность ВЧ-генератора не превышала 1 кВт. При помощи фидера она подавалась на один из четырех витков квадрупольной антенны. Импульс ВЧ-генератора заканчивался на 60 мс.

Рисунок 7 позволяет проследить динамику сопротивления излучения антенны в течение импульса плазмы. На начальном этапе (30–36 мс) происходит нагрев плазмы, и сопротивление излучения антенны быстро нарастает. Вклад в него вносят коаксиальные моды и БМЗ-волны. После излома на кривой $R_{load}(t)$ (с 36 мс) температура плазмы достигает стационарного значения, и дальнейший медленный рост сопротивления излучения антенны уже связан с дальнейшим ростом плотности плазмы.

По данным рис. 7 можно построить зависимость сопротивления излучения антенны от плотности плазмы, которая подтверждает сделанные выше утверждения о типах волн, дающих вклад в сопротивление излучения антенны. Эта зависимость приведена на рис. 8. Видно, что на начальном этапе создания и нагрева плазмы, когда плотность возрастает от $0.2 \cdot 10^{19}$ до $0.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, сопротивление излучения антенны остается примерно постоянным (~ 0.2 Ом). Этот уровень сопротивления излучения антенны соответствует вкладу коаксиальных мод. Коаксиальные моды существуют в области между стенкой вакуумной камеры и сепаратрисой (SOL, scrape-off-layer), где плотность плазмы в стеллараторе Л-2М составляет $2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ и не зависит от плотности плазмы внутри плазменного столба [12]. На следующем этапе омического разряда (при плотности, превышающей $0.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) плазма начинает прогреться, и появляются условия для поглощения БМЗ-волн, возбуждаемых антенной. Это вызывает быстрый рост сопротивления излучения антенны примерно до 0.65 Ом (см. рис. 8). После того как температура плазмы достигает

стационарного значения, сопротивление излучения антенны возрастает практически линейно примерно до 0.8 Ом уже за счет роста плотности. Такая линейная зависимость сопротивления излучения антенны от плотности наблюдалась в более ранних экспериментах по ИЦР-нагреву на стеллараторе Л-2М [13]. Как видно, доля “паразитных” коаксиальных мод, возбуждаемых антенной, составляет примерно 25%.

Таким образом, тестовые измерения сопротивления антенны с малой мощностью показали, что максимальное сопротивление излучения созданной антенны, установленной на стеллараторе Л-2М, составляет порядка 0.8 Ом. Такой уровень сопротивления излучения антенны позволяет ожидать, что при подаче на нее рабочего напряжения около 12 кВ и использовании всех четырех витков антенны мощность, поглощаемая в плазме, составит 250 кВт. При этом возбуждение коаксиальных мод квадрупольной антенной будет значительно меньше по сравнению с одно-витковой антенной, использованной в данном тестовом эксперименте.

5. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАДРУПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М

Созданная на стеллараторе Л-2М квадрупольная антенна может быть также использована для генерации токов увлечения. Предлагаемый метод основан на конверсии БМЗ-волн в медленные магнитозвуковые (ММЗ) волны с их последующим поглощением электронами плазмы, сопровождаемым генерацией токов увлечения.

Ранее на стеллараторе Л-2М проводились эксперименты по ионному циклотронному нагреву дейтериевой плазмы с добавкой водорода БМЗ-волной, создаваемой при помощи петлевой антенны [14]. Эксперименты показали, что в рабочем диапазоне параметров стелларатора Л-2М в дейтериевой плазме с добавкой водорода происходит возбуждение БМЗ-волны, распространяющейся в одном тороидальном направлении. Далее происходит ее линейная трансформация в ММЗ-волну с сохранением продольного волнового числа. В дальнейшем ММЗ-волна замедляется в области ион-ионного гибридного резонанса. Ее фазовая скорость уменьшается, в результате чего появляется возможность ее поглощения электронами за счет механизма затухания Ландау. Механизм Ландау затухания ММЗ-волны на электронах обеспечивает генерацию токов увлечения за счет передачи импульса от волны к электронам в направлении распространения волны. Таким образом, в дейтериевой плазме с добавкой водорода на стеллараторе Л-2М можно создать условия для генерации токов увлечения при помощи волн в ион-

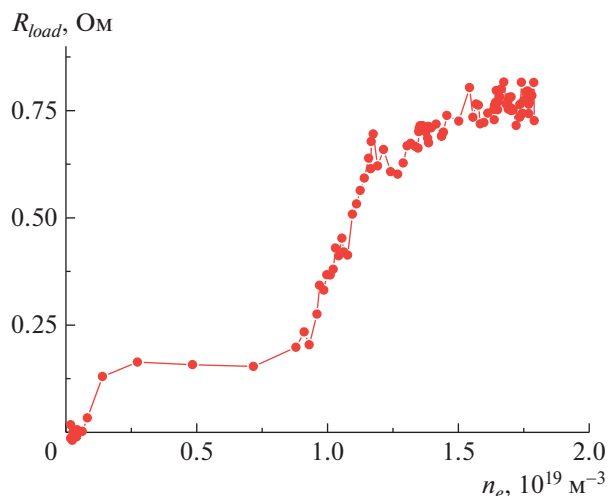


Рис. 8. Зависимость сопротивления излучения антенны от средней плотности.

ном циклотронном диапазоне частот. Использование квадрупольной антенны в этих экспериментах предпочтительно, поскольку она позволит более эффективно возбуждать в плазме БМЗ-волну. Ожидается, что эффективность предлагаемого метода генерации токов увлечения окажется того же порядка, что и эффективность метода генерации токов увлечения волнами нижегибридного диапазона частот.

Особенностью стелларатора является возможность его работы в бестоковом режиме (режим электронного циклотронного резонансного нагрева плазмы). В бестоковом режиме работы стелларатора Л-2М с помощью пояса Роговского можно будет измерять токи увлечения малой величины (вплоть до 100 А). Проведение таких экспериментов на стеллараторе Л-2М позволит провести детальное исследование этого нового метода генерации токов увлечения.

6. ВЫВОДЫ

Создана квадрупольная антенна, которую предполагается использовать в экспериментах по ионному циклотронному нагреву и генерации токов увлечения на стеллараторе Л-2М. Рассчитаны спектры азимутальных и тороидальных мод, которые данная квадрупольная антенна может возбуждать в плазме стелларатора Л-2М. На основе анализа спектров азимутальных и тороидальных мод показано, что для эффективного возбуждения БМЗ-волн в стеллараторе Л-2М с помощью квадрупольной антенны необходимо, чтобы каждые два соседних витка (как в тороидальном, так и в азимутальном направлении) были запитаны в противофазе.

Создан диагностический комплекс, состоящий из измерителя амплитуд падающей и отраженной волн и набора магнитных зондов. Измеритель амплитуд позволяет исследовать зависимость сопротивления излучения антенны от параметров плазмы и определить оптимальные условия для нагрева плазмы и генерации токов увлечения. Набор магнитных зондов позволит измерять фазовые скорости, а также тороидальные и азимутальные волновые числа возбуждаемых БМЗ-волн.

Проведены первые тестовые эксперименты с антенной в режиме омического нагрева. Получена зависимость сопротивления излучения антенны от средней плотности плазмы в одном выбранном импульсе. На основании этой зависимости определена доля сопротивления излучения антенны, приходящаяся на коаксиальные моды (25%). Полученная величина сопротивления излучения антенны позволяет ожидать, что с помощью квадрупольной антенны можно будет ввести в плазму мощность до 250 кВт. При этом возбуждение коаксиальных мод данной антенной будет значительно меньше, по сравнению с одновитковой антенной, использованной в данном тестовом эксперименте.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме “Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях” (FFWG-2019-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keilhacker M.*, Report JET-P(98)70. Abington, 1999. <https://scipub.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2014/11/JETP98070.pdf>
2. JET Joint Undertaking Progress Report EUR14434 EN (EUR-JET-PR9). Abington, 1992. <http://aei.pitt.edu/58111/1/JET.J.U.1991.V.1.pdf>
3. *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., Würsching E.* // Fusion Eng. Des. 2005. V. 74. P. 319. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.268>
4. *Park B.H., Yoon S.W., Na Y.S., Park J.M., Kim J.Y.* // Proc. of the 33rd EPS Conference on Plasma Physics (Rome, 2006) ECA. 2006. V. 30I. P-2.180. P. 2. https://www.researchgate.net/publication/238490814_Study_on_ICRH_and_FWCD_for_KSTAR_baseline_operation_period.
5. *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 Conference Proceedings. 2020. V. 2254. Iss. 1. P. 030004. <https://doi.org/10.1063/5.0013587>
6. *Naito O.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1993. V. 35. P. B215. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/35/SB/017>
7. *Alikaev V.V., Bagdasarov A.A., Borshegovskij A.A., Chistyakov V.V., Dremmin M.M., Gorelov Yu.A., Gorshkov A.V., Esipchuk Yu.V., Evdokimov D.B., Kislov A.Ya., Kislov D.A., Krupin V.A., Kuznetsova L.K., Lysenko S.E., Notkin G.E. et al.* // Nucl. Fusion. 1995. V. 35. P. 369. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/35/4/I01>
8. *Petty C.C., Prater R., Lohr J., Luce T.C., Fox W.R., Harvey R.W., Kinsey J.E., Lao L.L., Makowski M.A.* // Nucl. Fusion. 2002. V. 42. P. 1366. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/42/12/303>
9. *Petty C.C., Baity F.W., de Grassie J.S., Forest C.B., Luce T.C., Mau T.K., Murakami M., Pinsker R.I., Politzer P.A., Porkolab M., Prater R.* // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 1421. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/10/305>
10. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Морозов А.Е., Голиков А.А., Нечаев Ю.И.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 3. С. 231.
11. *Кузнецов В.Д.* // Радиотехника. 1957. № 10. С. 36.
12. *Berezhetskii M.S., Budaev V.P., Ivanov R.S., Rakowez A.A., Popov S.N., Kholnov Yu.V., Andryukhina E.D., Dyabilin K.S., Fedyanin O.I.* // J. Nucl. Matter. 1989. V. 162–164. P. 831. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(89\)90371-1](https://doi.org/10.1016/0022-3115(89)90371-1)
13. *Мещеряков А.И., Морозов А.Е., Голиков А.А., Вафин И.Ю., Бережецкий М.С., Нечаев Ю.И.* // Прикладная физика. 2007/ № 6. С. 51. <https://arplphys.orion-ir.ru/appl-07/07-6/PF-07-6-51.pdf>
14. *Гребеничков С.Е., Мещеряков А.И., Сбитникова И.С., Суходольский В.Н., Худолеев А.В.* // Труды ИОФАН. 1991. Т. 31. С. 130.