

**Измерение поглощаемой СВЧ-мощности при ЭЦР-нагреве плазмы
в стеллараторе Л-2М***С. Е. Гребенщиков, Н. К. Харчев, Д. Г. Васильков*

Приведены результаты измерения поглощаемой плазмой мощности в стеллараторе Л-2М при электронном циклотронном резонансном (ЭЦР) нагреве плазмы на второй гармонике гирочастоты. Водородная плазма создавалась и нагревалась в вакуумной камере стелларатора при резонансном поглощении СВЧ-мощности в режиме импульсно-периодической работы гиротронов. Полная энергия плазменного тороидального плазменного шнура и величина поглощенной мощности измерялись с помощью диамагнитной диагностики. Проведен учет экранирующего влияния металлической вакуумной камеры на измерение диамагнитных сигналов. Установлено, что при центральном ЭЦР-нагреве в плазме поглощается до 90 % мощности инжектированного гиротронного пучка, что согласуется с существующими теоретическими оценками.

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, магнитное удержание, стелларатор, электронно-циклотронный нагрев, диагностика плазмы, диамагнитные измерения.

Ссылка: Гребенщиков С. Е., Харчев Н. К., Васильков Д. Г. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 5.
Reference: S. E. Grebenschikov, N. K. Kharchev, and D. G. Vasilkov, Prikl. Fiz., No. 2, 5 (2019).

Введение

Установки типа стелларатор рассматриваются в настоящее время как альтернативные токамакам варианты будущего термоядерного реактора. Идея тороидального магнитного термоядерного реактора с продольным током была предложена в СССР в 1951 году в работах И. Е. Тамма и А. Д. Сахарова [1]. Экспе-

риментально эта идея развивалась в Курчатовском институте на серии созданных там установок, получивших название ТОКАМАК. Ко времени III Международной конференции МАГАТЭ по физике плазмы и УТС в Новосибирске в 1968 году эти результаты [2] становятся столь успешными, что приводят в скором времени к развитию токамачных исследований во многих лабораториях мира.

В 1951 году американский ученый Л. Спитцер предложил другой вариант тороидального термоядерного реактора, в котором удержание плазмы обеспечивалось только внешними магнитными полями без необходимости возбуждения тороидальных токов. Установки подобного типа получили название СТЕЛЛАРАТОР. Сначала был предложен вариант в виде тора, свернутого в восьмерку, а затем стелларатор с мультипольными винтовыми проводниками [3]. Эксперименты на таких системах начались в лаборатории физики плазмы Принстонского университета США. К середине 60-х годов результаты, получен-

Гребенщиков Станислав Евгеньевич¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Харчев Николай Константинович¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Васильков Дмитрий Григорьевич^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. +7(499) 135-41-48.

E-mail: greben@fpl.gpi.ru

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 25 января 2019 г.

© Гребенщиков С. Е., Харчев Н. К., Васильков Д. Г., 2019

ные принстонскими физиками на стеллараторах, были крайне неудачными. По их данным, в стеллараторах всегда наблюдалась повышенная диффузия, определяемая формулой Бома [4].

Успехи на токамаках привели к закрытию стеллараторных исследований в Принстонской лаборатории, а крупнейший стелларатор С был переделан в токамак СТ. Неудачи первоначальных экспериментов на стеллараторах в США явились причиной отставания термоядерных стеллараторных исследований относительно токамаков.

В дальнейшем, благодаря успешным стеллараторным экспериментам на новых установках в СССР, ФРГ и Японии, было показано, что удержание плазмы в стеллараторах по своим параметрам близко к удержанию в токамаках. Существенным преимуществом стеллараторов по сравнению с токамаками является возможность их стационарной работы. Как показали эксперименты, стеллараторы имеют еще одно существенное преимущество по сравнению с токамаками, а именно, в них отсутствуют ограничения на максимальные значения плотности плазмы, существующие в токамаках (так называемый предел Гринвальда). Вместе с тем, как в токамаках, так и в стеллараторах, до сих пор не установлены физические механизмы, ответственные за наблюдаемые в экспериментах времена удержания плазмы. Поэтому дальнейшее продолжение экспериментальных исследований физики удержания плазмы в тороидальных системах представляет несомненный интерес.

Целью данной работы являлось измерение поглощаемой плазмой мощности в стеллараторе Л-2М при электронном циклотронном резонансном (ЭЦР) нагреве плазмы на второй гармонике гирочастоты.

Экспериментальные условия и описание установки

Стелларатор Л-2М является модернизацией [5] созданной в 1975 году установки Л-2. Стеллараторное магнитное поле обеспечивается системой из 28 катушек продольного поля и двухзаходной ($l = 2$) винтовой обмоткой с семью шагами на длине тора. Большой радиус

магнитной системы стелларатора $R_0 = 100$ см, средний радиус граничной магнитной поверхности $r_0 = 11,5$ см. Средний угол преобразования поворота магнитных силовых линий на магнитной оси в Л-2М $\iota(0) = 0,18$, а на граничной магнитной поверхности $\iota(r_0) = 0,78$. Большая величина радиального градиента преобразования поворота $\theta(r) = (r \, d\iota/dr)/\iota$ (так называемый магнитный шир), достигающая на границе плазмы значений $\theta(r_0) = 3,5$, обеспечивает магнитогидродинамическую устойчивость плазмы.

В последние годы на стеллараторе Л-2М проводятся исследования по нагреву плазмы в режиме ЭЦР на второй гармонике гирочастоты. Новый этап исследований связан с созданием современного мощного гиротронного комплекса МИГ-3 [6] с двумя новыми отечественными гиротронами, обладающими рекуперацией энергии электронного пучка. Первый гиротрон с мощностью до 0,8 МВт работает на частоте 75 ГГц, что соответствует резонансному магнитному полю на оси камеры стелларатора при $B_0 = 1,34$ Тл. Второй гиротрон с мощностью до 0,7 МВт имеет возможность перестройки частоты на 71,5 ГГц, 74,8 ГГц и 78,2 ГГц. Сфокусированные линейно-поляризованные СВЧ-пучки вводятся в камеру стелларатора с внешней стороны тора с помощью двух квазиоптических трактов. Тороидальный угол между направлениями инжекции гиротронных пучков составляет величину $25,7^\circ$. В настоящее время максимальная мощность введенных в вакуумную камеру СВЧ-пучков в экспериментах по ЭЦР-нагреву составила 1 МВт, что соответствует рекордной для тороидальных систем удельной мощности нагрева $p = P_0/V_{pl} = 4$ МВт/м³, где V_{pl} – полный объем плазменного шнура. Инжектированное в камеру излучение приводит к ионизации водородного газа и последующему нагреву образованной плазмы.

При анализе ЭЦР-нагрева и удержания плазмы в магнитном поле стелларатора важнейшим является вопрос: какая доля мощности СВЧ-излучения, введенного в вакуумную камеру установки, поглощается плазмой. Кинетическое моделирование ЭЦР-нагрева плазмы для магнитной конфигурации стелларатора Л-2М [7] предсказывает, что при измеряемых в эксперименте параметрах плазмы

(средняя плотность $n_e \approx 1,5 \div 2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и электронная температура $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$) 87–92 % введенного пучка поглощается на первом проходе через плазменный шнур. На границе плазмы происходит расщепление излучения на обыкновенную и необыкновенную моды. Последняя хорошо поглощается в области резонанса на второй гармонике гирочастоты. Величина магнитного поля выбрана таким образом, чтобы условия резонанса и, соответственно, поглощение СВЧ-мощности происходило в центре магнитной системы стелларатора. В то же время обыкновенная мода поглощается весьма слабо. Доля энергии, содержащаяся в обыкновенной моде, согласно теоретическим оценкам, составляет в случае Л-2М примерно 10 % от полной энергии СВЧ-пучка. Этим объясняется неполное поглощение пучка за один проход через плазму. Излучение, связанное с обыкновенной модой, свободно пройдя через плазменный шнур, попадает на металлическую стенку вакуумной камеры и отражается от нее назад. При этом часть мощности при отражении может переходить в необыкновенную моду, которая уже поглотится в плазме при пересечении областей с резонансным значением магнитного поля 1,34 Тл. При сложной структуре модуля магнитного поля $|B| = \text{const}$ в стеллараторе Л-2М поглощение возникающей при отражении от стенки необыкновенной моды будет происходить, скорее всего, в периферийной области плазменного шнура. Структура кривых $|B| = \text{const}$ в поперечном сечении камеры в месте инъекции СВЧ-пучка приведена на рис. 1.

Небольшая часть мощности обыкновенной моды покидает объем вакуумной камеры стелларатора через кварцевые окна диагностических патрубков.

Недавно разработанная двухмерная волновая модель [8] показала отличия от ранее проведенных расчетов. Она позволила более адекватно описывать волновые свойства и распространение инжектированного в плазму СВЧ-излучения по сравнению с методом лучевых траекторий. Однако для описания тонких деталей взаимодействия СВЧ-пучка с плазмой в реальных стеллараторных магнитных конфигурациях требуется создание более сложной (трехмерной) модели. Полный трех-

мерный теоретический расчет поглощенной мощности и ее пространственного распределения пока не удастся провести. В этой связи особую актуальность приобретает задача экспериментального определения величины поглощенной мощности СВЧ-пучка.

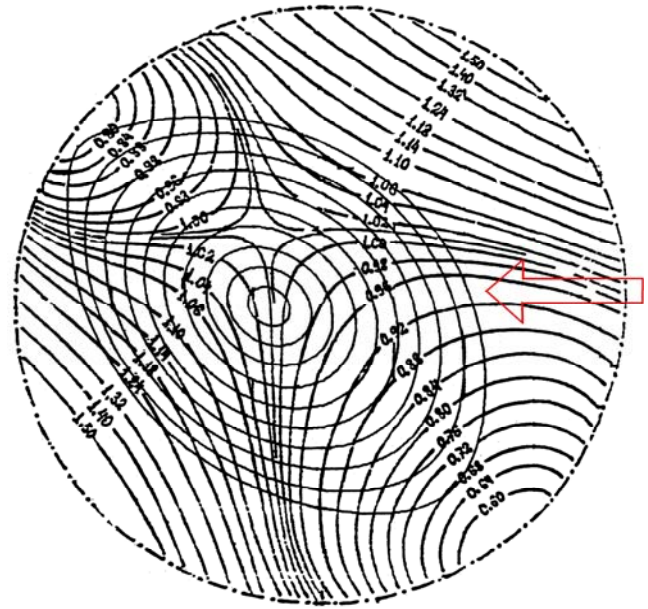


Рис. 1. Поперечное сечение вакуумной камеры стелларатора (штрих-пунктирный круг) с положением вакуумных магнитных поверхностей (овалы) и линий $|B| = \text{const}$; при этом численно обозначено отношение значения B для линий к значению на оси системы. Красная стрелка указывает направление ввода СВЧ-пучка.

Проблема измерения поглощаемой в плазме мощности при ЭЦР-нагреве

Попытки экспериментальных измерений на стеллараторе Л-2М эффективности поглощения ЭЦР-мощности в большинстве случаев давали значения ниже теоретически предсказанных. Так, в работе [9] приведены результаты измерения эффективности поглощения, полученные с помощью микроволновой (по электронному циклотронному излучению из плазмы – ЭЦИ) и диамагнитной диагностик.

Диамагнитные измерения энергосодержания плазмы впервые были проведены на токамаке Т-2 [10] и с тех пор применялись на многих тороидальных термоядерных установках. Теоретические основы подобных измерений подробно изложены, например, в обзоре [11]. Возможность измерения поглощаемой

плазмой мощности при ЭЦР-нагреве видна из следующей формулы:

$$dW/dt = P_{abs} - P_{los}, \quad (1)$$

где W – энергосодержание плазменного шнура; P_{abs} – поглощаемая плазмой мощность ЭЦР-импульса, а P_{los} – суммарная мощность потерь плазменного шнура. Из выражения (1) видно, что если мощность плазменных потерь не меняется за время выключения импульса нагрева, то скачок временной производной энергосодержания плазмы $\Delta(dW/dt)$ (и, соответственно, диамагнитного сигнала) равен величине поглощенной мощности нагрева. Для того чтобы данное условие удовлетворялось, необходимо, чтобы время выключения импульса нагрева было существенно короче энергетического времени удержания плазмы как на стадии нагрева, так и после его выключения.

Диамагнитный эффект на стеллараторе Л-2М измеряется с помощью многовитковой обмотки, расположенной снаружи вакуумной камеры [12]. Радиус измерительной обмотки равен 17 см при среднем малом радиусе плазменного шнура $a = 11,5$ см. При нагреве плазмы из-за ее диамагнетизма соответствующая часть магнитного потока перемещается во внешнюю по отношению к плазме область вплоть до радиуса катушек продольного поля. Продольное тороидальное магнитное поле в стеллараторе Л-2М создается системой из 28 токовых катушек со средним радиусом $r = 31,5$ см. Обмотка продольного поля характеризуется электрической постоянной времени (отношением индуктивности к электрическому сопротивлению), равной 156 мс, т. е. для существенно более коротких по длительности ЭЦР-процессов нагрева плазмы ее можно рассматривать как идеально проводящую, магнитный поток внутри которой не меняется за время ЭЦР-нагрева.

Многоканальная ЭЦИ-диагностика, измеряющая циклотронное излучение плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты, позволяет измерять радиальный профиль электронной температуры плазмы. Возможность измерения электронной температуры по циклотронному излучению плазмы основывается на пионерских работах Б. А. Трубникова [13]. В середине 70-х годов

метод измерения электронной температуры по излучению плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты получил широкое распространение на токамаках (см., например [14–16]). Известно, что в области поглощения ЭЦР-мощности кривая временного хода электронной температуры испытывает излом при выключении импульса нагрева (разрыв во временной производной dT_e/dt). Локальный профиль поглощенной мощности в момент выключения мощности нагрева определяется выражением:

$$P_{abs}(r) = d/dt \left[3/2 n_e(r, t) T_e(r, t) \right]^{(t=t_{0-})} - d/dt \left[3/2 n_e(r, t) T_e(r, t) \right]^{(t=t_{0+})}, \quad (2)$$

где n_e и T_e – соответственно плотность плазмы и электронная температура, а t_{0-} и t_{0+} – моменты времени перед и после выключения ЭЦР-импульса. Формула (2) является следствием локального энергобаланса электронной компоненты в моменты перед выключением импульса нагрева и после него. При этом предполагается, что потери электронной компоненты в данной точке не меняются за время выключения нагрева. Поскольку в установке Л-2М за время выключения импульса нагрева профиль плотности плазмы не успевает сколь-нибудь заметно измениться, многоканальные ЭЦИ-измерения позволяют определить профиль и суммарную величину поглощенной мощности. Необходимо, чтобы временной интервал между моментами измерения профиля температуры был существенно меньше энергетического времени жизни плазменного шнура. В работе [9] оно составляло величину 200 мкс. Точность определения поглощенной мощности с помощью ЭЦИ-диагностики в случае Л-2М ограничена, во-первых, относительно небольшим числом каналов измерения (то есть количеством точек по радиусу), во-вторых, наличием временных флуктуаций ЭЦИ-сигналов.

Результаты работы [9], полученные с помощью двух описанных выше методов, показали, что эффективность нагрева (отношение поглощенной мощности к вводимой в камеру мощности СВЧ-излучения) в этих экспериментах на Л-2М оказалась заметно ниже теоретических предсказаний. ЭЦИ-диагнос-

тика показала величину поглощения в 75 % от вводимой мощности. Диамагнитная диагностика показала величину еще на 10–20 % ниже.

Последующие измерения поглощенной мощности при использовании мощного гиротронного комплекса МИГ-3 с помощью диамагнитной диагностики обычно не превышали 60–50 % от значений мощности, вводимой в камеру стелларатора. Эти данные получены при измерении в момент выключения импульсов ЭЦР-нагрева. При работе с одиночными импульсами ЭЦР-определение поглощаемой мощности по переднему фронту диамагнитного сигнала невозможно, поскольку плазма в стеллараторе создается за счет ионизации газа самим излучением гиротронов, и нарастание плотности плазмы и диамагнитного сигнала происходит за времена, превышающие длительность фронта гиротронного импульса.

Импульсно-периодический режим ЭЦР-нагрева

Новые возможности в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы появились после разра-

ботки импульсно-периодического режима работы гиротронного комплекса, при котором создается серия СВЧ-импульсов с регулируемой длительностью и с регулируемой временной паузой между ними. В ходе экспериментов менялись длительности ЭЦР-импульсов, пауз между ними и число импульсов нагрева. Число импульсов в одном разряде составляло от 2 до 5; длительность импульсов 0,5–4 мс; длительность пауз – 2,5–6 мс. Магнитные обмотки стелларатора запитываются от конденсаторной батареи емкостью 0,6 Ф. Полная длительность магнитного поля равна 0,12 секунды. Максимальные значения величины магнитного поля B_0 достигались через 54,5 мс после включения тока в обмотках. Время ЭЦР-нагрева ограничено в стеллараторе Л-2М длительностью примерно 12 мс, когда величина магнитного поля сохраняется примерно неизменной в пределах $\pm 1,5\%$ и радиальный сдвиг зоны циклотронного резонанса можно не учитывать. В большинстве экспериментов использовался интервал времени от 48 до 60 мс. Пример подобного импульсно периодического режима работы стелларатора Л-2М приведен на рис. 2.

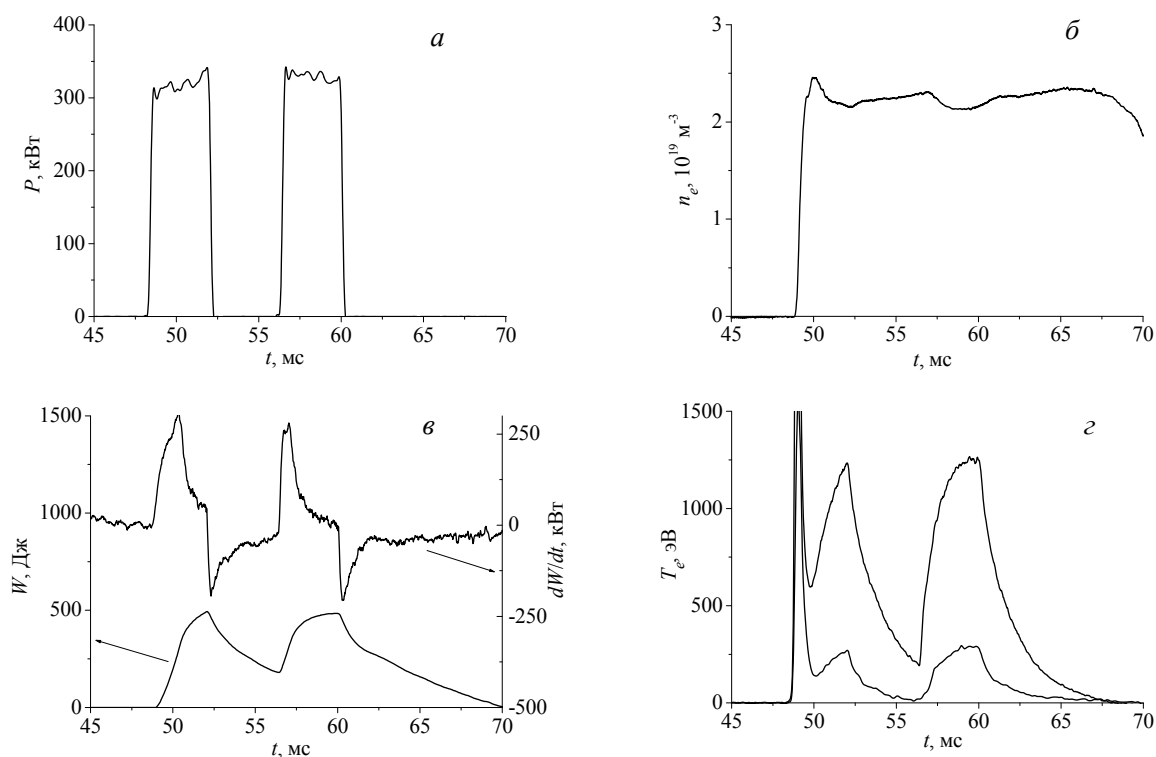


Рис. 2. Временная эволюция основных параметров разряда в импульсно-периодическом режиме (2 импульса гиротрона): а – мощность ЭЦР-нагрева; б – средняя по диаметру электронная плотность; в – сигнал диамагнитной диагностики dW/dt и энергия плазмы W ; г – электронная температура в центре и на радиусе 0,7 от радиуса граничной магнитной поверхности.

Во время первого импульса происходит пробой газа, формирование плазменного шнура и его ЭЦР-нагрев. После выключения первого импульса средняя по диаметру плотность плазмы сохраняется в течение нескольких мс. В стеллараторе Л-2М это обычное явление; при работе с одиночными импульсами нагрева средняя плотность плазмы остается практически неизменной после выключения СВЧ-импульса в течение 6–8 мс. Таким образом, включение ЭЦР-нагрева во втором и следующих импульсах происходит при уже сформированном плазменном шнуре с достаточно высокими значениями электронной температуры.

Применение импульсно-периодического режима ЭЦР-нагрева позволило более детально изучить процессы нагрева и остывания плазмы в стеллараторе Л-2М. Результаты первых экспериментов были представлены в [17, 18]. В них было установлено существование двух режимов плазменного удержания с различным уровнем энергетических потерь в каждом импульсе нагрева. Быстрый переход к резкому увеличению потерь энергии происходит за времена существенно меньшие, чем энергетическое время жизни τ_E . В данной статье мы не будем обсуждать свойства удерживаемой плазмы в стеллараторе, а ограничимся только проблемой корректного измерения поглощаемой мощности с помощью диамагнитной диагностики.

Измерения поглощенной мощности

В настоящее время на гиротроном комплексе МИГ-3 включение импульсов нагрева происходит за время 80 мкс, а их выключение – за время 40 мкс. Диамагнитная диагностика не может регистрировать изменение сигналов за столь короткие времена из-за влияния вакуумной камеры. Как было указано выше, измерительная диамагнитная обмотка намотана непосредственно на поверхность вакуумной камеры. Вакуумная камера стелларатора изготовлена из немагнитной нержавеющей стали марки 12X18H10T толщиной 1,2 мм.

Большой радиус камеры $R = 99,5$ см для установки Л-2М был выбран на 5 мм меньше, чем большой радиус винтовой обмотки, чтобы при ее прогреве при вакуумной тренировке камеры предотвратить ее контакт с шинами винтовой обмотки. Малый радиус камеры $r = 16,8$ см. Удельное электрическое сопротивление стали равно 725×10^{-9} Ом м при температуре 20°C и, соответственно, расчетная электрическая постоянная времени камеры для полоидальных токов $\tau = 170$ мкс. При быстрых изменениях продольного магнитного потока в объеме камеры в ней возбуждаются индукционные токи, приводящие к временному интегрированию диамагнитных сигналов. Учет этого эффекта на величину $dW/dt = U$ может быть вычислен с помощью следующего уравнения:

$$U_0 = U + \tau dU/dt, \quad (3)$$

где U_0 – величина диамагнитного сигнала в случае, если бы отсутствовала проводящая металлическая камера, а U – реально измеряемый сигнал. Величина dU/dt находилась численно по измеренным значениям диамагнитного сигнала, оцифровка которого (и умножение на необходимые коэффициенты) проводилась системой регистрации каждые 10 мкс. Производная dU/dt заменялась значением $\Delta U/\Delta t$, где ΔU – разница диамагнитных сигналов в соседних точках оцифровки, а Δt – временной промежуток между ними.

Пример подобной корректировки диамагнитных измерений приведен на рис. 3 для импульса стелларатора № 21340, в котором использовались четыре импульса ЭЦР-нагрева с мощностью 410 кВт.

Как видно из рис. 3, быстрые временные скачки производной плазменной энергии dW/dt в моменты включения и выключения ЭЦР-импульсов (равные по величине поглощенной мощности) стали короче во времени и больше по амплитуде. Таким образом, наши прежние оценки величин поглощаемой при электронном циклотронном нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М являются заметно заниженными.

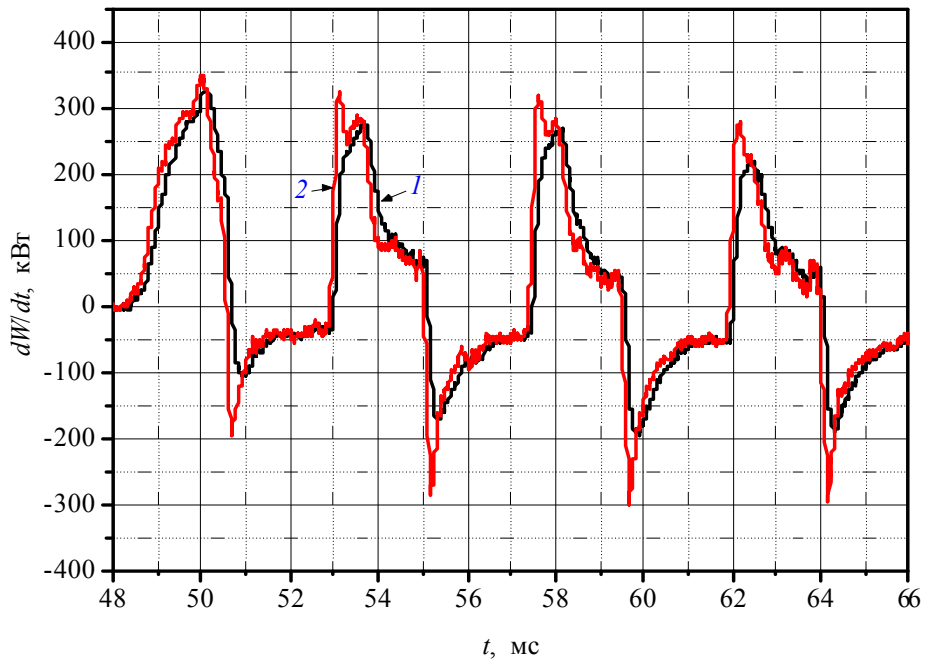


Рис. 3. Временной ход диамагнитного сигнала без учета влияния вакуумной камеры (кривая 1) и с учетом (кривая 2).

На рис. 4 для рассмотренного выше импульса стелларатора приведена временная зависимость доли поглощенной мощности относительно вводимой в камеру стелларатора мощности СВЧ-пучка. Полученные значения лежат в интервале от 81,5 % до 92,5 %, что существенно выше значений наших прежних

измерений, проводившихся без учета влияния вакуумной камеры. Подобные значения доли поглощенной мощности были получены и при мощности нагрева равной 200 кВт. Приведенные выше значения не противоречат теоретическим оценкам работы [7].

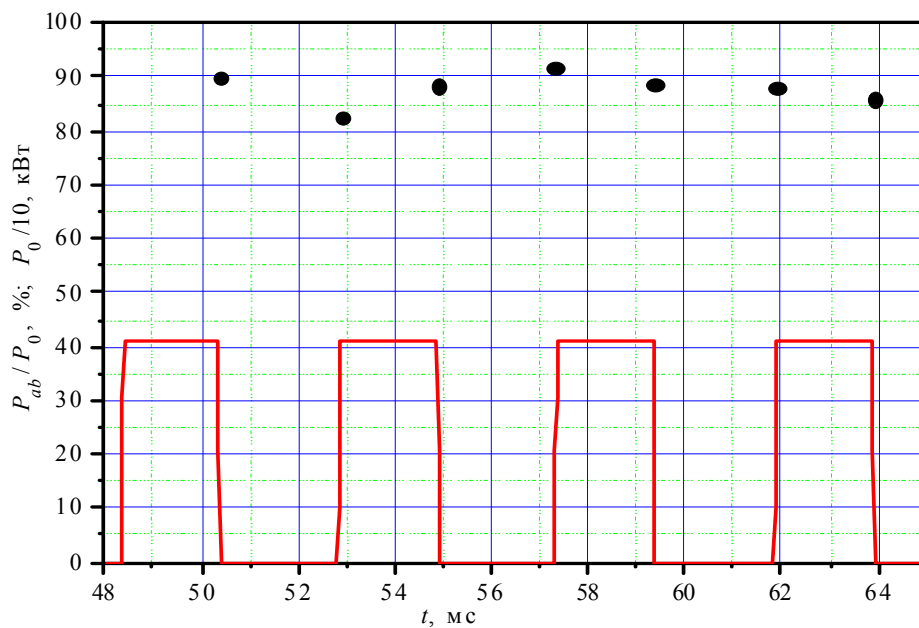


Рис. 4. Временная эволюция мощности ЭЦР-нагрева (красные линии) и доля поглощенной мощности (черные точки).

На рис. 5 приведен временной ход полной энергии плазменного шнура, вычисленный с коррекцией и без учета влияния вакуумной камеры. Как видно из рисунка, хотя временной ход скорректированных осциллограмм энергии несколько другой, максималь-

ные и минимальные их значения в каждом импульсе нагрева изменились незначительно. Так и должно быть, поскольку электрическая постоянная времени вакуумной камеры на порядок величины меньше, чем длительность ЭЦР-разрядов.

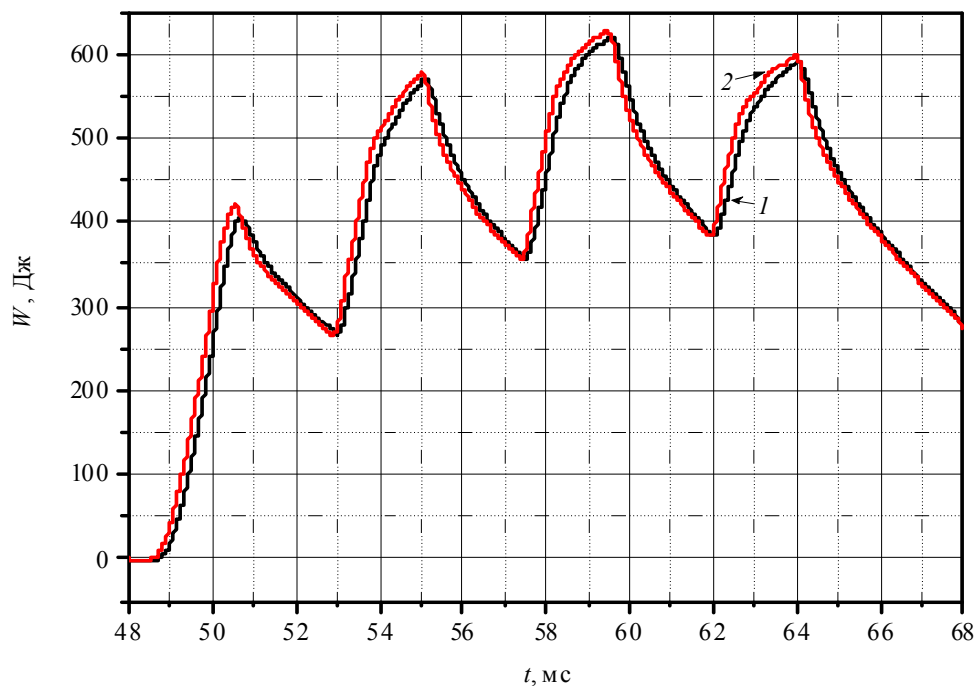


Рис. 5. Временной ход полной энергии плазменного шнура по результатам диагностики: кривая 1 (черная) — без учета влияния вакуумной камеры, кривая 2 (красная) — с учетом.

Заключение

Учет влияния металлической вакуумной камеры на сигналы диамагнитной диагностики позволил более точно определить величину поглощаемой плазмой мощности при ЭЦР-нагреве в стеллараторе. Применение импульсно-периодического режима ЭЦР-нагрева существенно повышает возможности подобных измерений. За один импульс стелларатора проводится несколько измерений величины скачков диамагнитного сигнала в моменты включения и выключения ЭЦР-нагрева.

Установлено, что при центральном циклотронном нагреве плазменного шнура на второй гармонике гирочастоты эффективность поглощения вводимой в камеру СВЧ-мощности достигает величины 90 %.

Работа выполнена по Программе РАН «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

Авторы благодарят А. С. Сахарова за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тамм И. Е., Сахаров А. Д. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Т. 1. — М.: Издательство Академии Наук СССР, 1958
2. Арцимович Л. А. / Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Res. IAEA. Vienna. 1969. Vol. 1. P. 3.
3. Spitzer L. // Phys. Fluids. 1958. Vol. 1. No. 4. P. 253.
4. Spitzer L. // Plasma Physics and Contr. Nuclear Fusion Res., IAEA, Vienna, 1966. Vol. 1. P. 3.

5. *Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., Batanov G. M., Berezhetskiy M. S., Danilkin I. S., Don-skaya N. P., Fedyanin O. I., Gladkov G. A., Grebenshchikov S. E., Harris J. H., Kharchev N. K., Kholnov Yu. V., Kolik L. V., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Likin K. M., Lyon J. F., Meshcheryakov A. I., Nechaev Yu. I., Petrov A. E., Sarksyun K. A., Sbitnikova I. S.* // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. No. 2. P. 233.
6. *Batanov G. M., Belousov V. I., Bondar' Yu. F., Borzosekov V. D., Vasil'kov D. G., Grebenshchikov S. E., Ivannikov I. A., Kolik L. V., Konchekov E. M., Malakhov D. V., Matveev N. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Sarksyun K. A., Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Kharchev N. K., Khol'nov Yu. V., Tai E. M.* // Plasma Physics Reports. 2013. Vol. 39. No. 13. P. 1088.
7. *Сахаров А. С., Терещенко М. А.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. Вып. 7. С. 584.
8. *Сахаров А. С.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. Вып. 4. С. 291.
9. *Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Воронов Г. С., Гладков Г. А., Гребеничиков С. Е., Донская Н. П., Колик Л. В., Ларионова Н. Ф., Меццерыков А. И., Сарксян К. А., Федянин О. И., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Щенетов С. В.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 9.
10. *Разумова К. А.* // Атомная энергия. 1966. Т. 20. Вып. 6. С. 459.
11. *Pustovitov V. D.* // Plasma Phys. Control Fusion. 2010. Vol. 52. P. 085005.
12. *Андрюхина Э. Д., Федянин О. И.* // Физика плазмы. 1977. Т. 3. Вып. 4. С. 792.
13. *Трубников Б. А., Бажанова А. Е.* Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Т. 3. – М.: Издательство академии наук СССР, 1958.
14. *Brossier P., Costley A.E., Komm D.S., Rampo-ni G., Tamor S.* / Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Res. 1977. IAEA. Vienna. Vol. 1. P. 409.
15. *Hosea J., Arunasalam V.* // Cano R. Phys. Rev. Letters. 1977. Vol. 39. P. 408.
16. *Equipe TFR* // Nuclear Fusion. 1978. Vol. 18. P. 647.
17. *Batanov G. M., Berezhetskiy M. S., Borzosekov V. D., Grebenshchikov S. E., Grishina I. A., Ivanov V. A., Kharchev N. K., Kharchevsky A. A., Kholnov Yu. V., Kolik L. V., Konchekov E. M., Letunov A. A., Logvinenko V. P., Malakhov D. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Sarksyun K. A., Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Vasilkov D. G., Vafin I. Yu.* // 44th EPS Conference on Plasma Physics, Belfast, Northern Ireland, P2.154, <http://OCS.CIEMAT.ES/EPS 2017 PAP/pdf/P2.154.pdf>.
18. *Батанов Г. М., Борзосексов В. Д., Васильков Д. Г., Вафин И. Ю., Воронова Е. В., Гребеничиков С. Е., Гришина И. А., Иванов В. А., Колик Л. В., Кончечков Е. М., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Малахов Д. В., Меццерыков А. И., Петров А. Е., Прокудина А. А., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Степахин В. Д., Харчев Н. К., Харчевский А. А., Хольнов Ю. В., Щенетов С. В.* / XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. 2018. Тезисы докладов. С. 72.

PACS: 52.55.Hc; 52.50.Sw; 52.70.-m.

Measurement of the absorbed microwave power during plasma ECR heating in the L-2M stellarator

S. E. Grebenshchikov¹, N. K. Kharchev¹, and D. G. Vasilkov^{1,2}

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia

² Bauman Moscow State Technical University
5/1 Baumanskaya 2-nd str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: greben@fpl.gpi.ru

Received January 25, 2019

The results of the absorbed power measurements in the L-2M stellarator during electron cyclotron resonance (ECR) plasma heating on the gyro frequency second harmonic are presented. Hydrogen plasma was created and heated in the vacuum chamber of the stellarator at resonant absorption of microwave power in the mode of pulsed periodic operation of gyrotrons. The total energy of the toroidal plasma cord and the absorbed power were measured by diamagnetic diagnostics. The analysis of the shielding effect of the metal vacuum chamber on the measurement of diamagnetic signals is carried out. It is established that at the central ECR heating

in plasma up to 90% of the power of the injected gyrotron beam is absorbed, which is consistent with the existing theoretical estimates.

Keywords: high-temperature plasma, magnetic confinement, stellarator, electron-cyclotron heating, plasma diagnostics, diamagnetic measurements.

REFERENCES

1. I. E. Tamm and A. D. Sakharov, *Plasma Physics and Problem of Controlled Thermonuclear Reactions Vol. 1.* (Izdat. Akademii Nauk SSSR, Moscow, 1958) [in Russian].
2. L. A. Artsimovich, in *Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Res*, Vol. 1 (IAEA, Vienna, 1969).
3. L. Spitzer, *Phys. Fluids* **1**, 253 (1958).
4. L. Spitzer, in *Plasma Physics and Contr. Nuclear Fusion Res.*, Vol. 1. (IAEA, Vienna, 1966).
5. V. V. Abrakov, D. K. Akulina, E. D. Andryukhina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, I. S. Danilkin, N. P. Donskaya, O. I. Fedyanin, G. A. Gladkov, S. E. Grebenschikov, J. H. Harris, N. K. Kharchev, Yu. V. Kholnov, L. V. Kolik, L. M. Kovrizhnykh, N. F. Larionova, A. A. Letunov, K. M. Likin, J. F. Lyon, A. I. Meshcheryakov, Yu. I. Nechaev, A. E. Petrov, K. A. Sarksyian, and I. S. Sbitnikova, *Nuclear Fusion* **37**, 233 (1997).
6. G. M. Batanov, V. I. Belousov, Yu. F. Bondar', V. D. Borzosekov, D. G. Vasil'kov, S. E. Grebenschikov, I. A. Ivannikov, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, D. V. Malakhov, N. V. Matveev, A. I. Meshcheryakov, A. E. Petrov, K. A. Sarksyian, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, N. K. Kharchev, Yu. V. Khol'nov, and E. M. Tai, *Plasma Physics Reports* **39**, 1088 (2013).
7. A. S. Sakharov and M. A. Tereshchenko, *Plasma Physics Reports* **28**, 539 (2002).
8. A. S. Sakharov, *Plasma Physics Reports* **45**, (2019, in print).
9. D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, G. S. Voronov, G. A. Gladkov, S. E. Grebenschikov, N. P. Donskaya, L. V. Kolik, N. F. Larionova, A. I. Meshcheryakov, K. A. Sarksyian, O. I. Fedyanin, N. K. Kharchev, Yu. V. Khol'nov, and S. V. Shchepetov, *Plasma Physics Reports* **28**, 7 (2002).
10. K. A. Razumova, *Soviet Atomic Energy* **20**, 531 (1966).
11. V. D. Pustovitov, *Plasma Phys. Control Fusion* **52**, 085005 (2010).
12. E. D. Andryukhina and O. I. Fedyanin, *Soviet Journal of Plasma Physics* **3**, 792 (1977).
13. B. A. Trubnikov and A. E. Bazhanova, *Plasma Physics and Problem of Controlled Thermonuclear Reactions Vol. 3.* (Izdat. Akademii Nauk SSSR, Moscow, 1958) [in Russian].
14. P. Brossier, A. E. Costley, D. S. Komm, G. Ramponi, and S. Tamor, in *Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Res, Vol. 1* (IAEA Vienna, 977).
15. J. Hosea, V. Arunasalam, and R. Cano, *Phys. Rev. Letters*, **39**, 408 (1977).
16. Equipe TFR, *Nuclear Fusion* **18**, 647 (1978).
17. G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, V. D. Borzosekov, S. E. Grebenschikov, I. A. Grishina, V. A. Ivanov, N. K. Kharchev, A. A. Kharchevsky, Yu. V. Kholnov, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, A. A. Letunov, V. P. Logvinenko, D. V. Malakhov, A. I. Meshcheryakov, A. E. Petrov, K. A. Sarksyian, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, D. G. Vasilkov, and I. Yu. Vafin, in *Proc. 44th EPS Conference on Plasma Physics*, (Belfast, Northern Ireland, P2.154) [http://OCS.CIEMAT.ES/EPS 2017 PAP/pdf/ P2.154.pdf](http://OCS.CIEMAT.ES/EPS%2017/PAP/pdf/P2.154.pdf).
18. G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, D. G. Vasilkov, et al., in *Proc. XLV International conference on plasma physics and controlled fusion* (Zvenigorod, 2018), p. 72.