

## Электрические токи при создании и нагреве плазмы методом электронного циклотронного резонанса в стеллараторе Л-2М

С. Е. Гребенщиков, Д. Г. Васильков, В. А. Иванов, К. А. Сарксян,  
М. А. Терещенко, Н. К. Харчев

*Представлены результаты измерения продольного электрического тока, возбуждаемого в тороидальной плазме стелларатора Л-2М в результате мощного импульсного СВЧ-нагрева (мощность до 600 кВт, длительность импульса до 20 мс). В экспериментах для создания и нагрева плазмы в стеллараторе использовалось СВЧ-излучение гиротронов на частоте 75 ГГц, равной частоте 2-й гармоники электронного циклотронного резонанса для магнитного поля с индукцией  $B = 1,34$  Тл в центре плазменного шнура. Для измерения токов в плазме использовались диагностические системы стелларатора, предназначенные для регистрации изменений во времени поперечного и полоидального магнитных полей. Показано, что наличие в конструкции стелларатора железного трансформатора омического нагрева существенно влияет на временное развитие токов равновесия вследствие значительной индуктивности плазменного шнура. При компенсации индуктивности этих устройств ожидаемая величина возбуждаемого в плазме тока может достигать величины около 7 кА.*

*Ключевые слова:* возбуждение электрического тока, замагниченная тороидальная плазма, стелларатор, СВЧ-нагрев, электронный циклотронный резонанс, энергия плазмы, индуктивность плазмы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-4-310-324

### 1. Введение

Настоящая статья посвящена описанию экспериментов по измерению токов равновесия в плазме стелларатора Л-2М при её СВЧ-нагреве в режиме электронного

циклотронного резонанса (ЭЦР). Стелларатор Л-2М [1] представляет собой тороидальную магнитную ловушку с двухзаходным ( $l = 2$ ) винтовым магнитным полем и продольным тороидальным магнитным полем (см. рис. 1). Эти поля создаются

Гребенщиков Станислав Евгеньевич, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Васильков Дмитрий Григорьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Иванов Вячеслав Алексеевич, гл.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Сарксян Карен Агасиевич, в.н.с., к.ф.-м.н.

Терещенко Максим Алексеевич, в.н.с., к.ф.-м.н.

Харчев Николай Константинович, в.н.с., к.ф.-м.н.

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

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

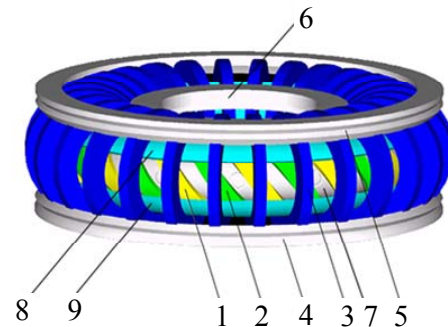
Статья поступила в редакцию 15 июля 2021 г.

© Гребенщиков С. Е., Васильков Д. Г., Иванов В. А., Сарксян К. А., Терещенко Н. К., Харчев Н. К., 2021

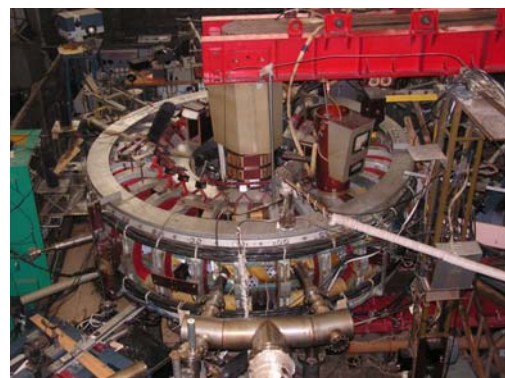
винтовой обмоткой и тороидальными катушками, внутри которых расположена тороидальная вакуумная камера. Большой радиус тора  $R = 1$  м, средний малый радиус плазменного шнура  $a = 11,5$  см, индукция магнитного поля на оси тора  $B_0 < 1,5$  Тл. Продольное магнитное поле стелларатора создается с помощью 28 токовых катушек, закрепленных на четырех алюминиевых кольцах большого сечения. Их назначение – воспринимать радиальные механические нагрузки, возникающие в течение импульса магнитного поля. Двухзаходная винтовая обмотка имеет 7 периодов на длине тора. В отличие от большинства конструкций стеллараторов с винтовыми обмотками, в данной установке винтовые проводники закреплены на внутренней поверхности разрезного тороидального силового каркаса из стеклотекстолита, охватывающего вакуумную камеру стелларатора. При этом проводники винтовой обмотки максимально приближены к вакуумной камере для увеличения преобразования поворота магнитных силовых линий, образующих вложенные магнитные поверхности. Величина преобразования поворота силовых линий на внешней границе системы замкнутых магнитных поверхностей стелларатора в вакууме составляет величину  $\mu_a = 0,78$ , а на магнитной оси стелларатора  $\mu_0 = 0,18$ . Большая величина радиального градиента преобразования силовых линий (так называемый шир) обеспечивает магнитогидродинамическую устойчивость плазмы в магнитной конфигурации стелларатора Л-2М. Проводники винтовой обмотки крепятся к силовому каркасу, состоящему из четырех тороидальных стеклопластиковых колец, в семи сечениях закрепленных на основном алюминиевом каркасе, что в совокупности обеспечивает механическую устойчивость всей системы, создающей стеллараторную конфигурацию магнитного поля.

На рис. 2 приведена фотография стелларатора Л-2М, на которой видно, что

внутри магнитной системы установки проходит железное ярмо трансформатора омического нагрева с сечением равным  $0,1$  м<sup>2</sup>. Трансформатор на данной установке используется также для реализации технологического режима длительного прогрева и обезгаживания стенок вакуумной камеры при температуре  $250$  °С для получения высокого вакуума. В данных экспериментах для создания и нагрева плазмы в стеллараторе использовалось мощное СВЧ-излучение гиротронов на частоте  $75$  ГГц, равной частоте 2-й гармоники электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) для магнитного поля с индукцией  $B = 1,34$  Тл в центре плазменного шнура [2].



*Рис. 1. Схема конструкции тороидальной магнитной системы стелларатора Л-2М. 1 и 2 – проводники двухзаходного винтового магнитного поля; 3 – катушки тороидального магнитного поля; 4, 5 и 6 – алюминиевые силовые кольца для фиксации элементов магнитной системы; 7 – видимые фрагменты тороидальной вакуумной камеры под проводниками винтового магнитного поля; 8 и 9 разрезной тороидальный силовой каркас из стеклопластика для фиксации проводников винтового магнитного поля.*



*Рис. 2. Фотография установки Стелларатор Л-2М.*

Средняя плотность плазмы в этих экспериментах составляет величину  $n_e = (1-2,5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , а электронная температура в центре плазменного шнура (в случае центрального нагрева) достигает значений 1–1,5 кэВ. Магнитные обмотки стелларатора запитываются от конденсаторной батареи ёмкостью  $C = 0,62 \text{ Ф}$  с суммарной энергией 7 МДж. Длительность импульса магнитного поля равна примерно 0,1 с. Максимального (резонансного) значения индукции  $B = 1,34 \text{ Тл}$  магнитное поле достигает в момент  $t = 54 \text{ мс}$  после включения тока через последовательно соединённые проводники, создающие винтовое и тороидальное магнитные поля в стеллараторе. Длительность СВЧ-импульса ЭЦР-нагрева в большинстве экспериментов составляла величину 10–12 мс, в течение которых величина магнитного поля изменяется не более чем на 1,5 %, и точка электронного циклотронного резонанса смещается не более, чем на 1 см.

Сфокусированные линейно поляризованные пучки СВЧ-излучения гиротронов с помощью квазиоптических трактов вводятся внутрь вакуумной камеры с наружной стороны тора через кварцевые окна. Под действием мощного СВЧ-излучения гиротронов происходит сначала ионизация газообразного водорода, предварительно инжектированного в камеру с помощью двух клапанов, и далее реализуется электронный циклотронный нагрев созданной плазмы. На границе плазменного шнура линейно поляризованное СВЧ-излучение гиротрона трансформируется в обыкновенную (вектор электрической компоненты  $E$  СВЧ-волны коллинеарен вектору индукции магнитного поля –  $E \parallel B$ ) и необыкновенную (вектор электрической компоненты  $E$  СВЧ-волны ортогонален вектору индукции магнитного поля –  $E \perp B$ ) моды СВЧ-волны. При СВЧ-нагреве плазмы на второй гармонике циклотронной частоты необыкновенная мода эффективно поглощается в области резо-

нанса, а обыкновенная мода проходит через зону резонанса практически без поглощения и далее рассеивается по объёму плазмы после отражения от металлических стенок вакуумной камеры. При достижении электронной температуры плазмы более 100 эВ для необыкновенной моды СВЧ-волны ( $E \perp B$ ) область резонанса становится сильно поглощающей, т. е. эта область является практически «чёрным телом» для поглощения и излучения на частотах вблизи 2-й гармоники электронной циклотронной частоты. Это свойство плазмы позволяет проводить локальные измерения электронной температуры и её радиальное распределение [3].

Теоретические расчеты поглощения вводимого в плазму СВЧ-излучения для случая стелларатора Л-2М [4, 5] предсказывают, что при нахождении резонансной области вблизи центра плазменного шнура в стеллараторе более 90 % СВЧ-излучения гиротронов поглощается на одном проходе СВЧ-излучения через плазму. Экспериментальные измерения поглощенной СВЧ-мощности в плазме стелларатора Л-2М с помощью диамагнитной диагностики [6, 7] подтвердили правильность данных расчетов. Эти эксперименты показали, что при мощности ЭЦР-нагрева  $P = 400 \text{ кВт}$  и средней плотности плазмы  $n_e \approx 1,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  доля поглощенной СВЧ-мощности, усредненная по многим СВЧ-импульсам, находится в пределах 87–92 %.

При исследовании процессов удержания в стеллараторах плазмы, создаваемой при ЭЦР-нагреве, часто указывается, что речь идёт (в отличие от токамаков) о бес-токовой плазме. Это справедливо в том смысле, что удержание и устойчивость плазмы целиком определяется внешними магнитными полями стелларатора. Но в плазме стелларатора существуют токи равновесия. Прежде всего, это так называемые токи Пфирша-Шлютера. Своё название они получили в честь немецких учёных Д. Пфирша и А. Шлютера, впервые

описавших токи равновесия в плазме стелларатора в 1962 году [8]. Величина этого тока  $J_{\parallel}$  описывается выражением:

$$J_{\parallel} = \frac{2c}{\mu B_0} \frac{dp}{dr} \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $\mu$  – величина преобразования поворота силовых линий магнитного поля;  $B_0$  – напряженность магнитного поля;  $p$  – давление плазмы; а  $\varphi$  – угол в полоидальном направлении. Из формулы (1) видно, что токи с наружной и внутренней стороны плазменного тора противоположны, равны нулю в центре шнура и максимальны на границе плазмы в области максимальных значений градиента плазменного давления. Сила трения, создаваемая этими токами, приводит к более сильной диффузии плазмы, чем в прямых магнитных системах. Расчеты в работе [8] были выполнены в рамках одножидкостной магнитной гидродинамики. Более точные расчеты с учетом возникающих в плазме электрических полей, проведенные А. А. Галеевым [9], показали их малое отличие от выводов работы [8].

Диффузия горячей плазмы в тороидальных системах всегда сопровождается генерацией электрического тока, текущего вдоль магнитного поля. Это так называемый бутстрэп ток. Это явление впервые было обнаружено теоретически Галеевым в 1970 году [10] и несколько позже (1971 г.) независимо Биккертоном, Коннором и Тейлором [11]. Если токи Пфирша-Шлютера обусловлены различием траекторий так называемых пролетных частиц, обходящих тор в противоположных направлениях, то бутстрэп ток в токамаках обусловлен различием траекторий тороидально запертых частиц. Это имеет место в тороидальной плазме в области малых частот столкновений заряженных частиц, соответствующих области плато неоклассической теории Сагдеева-Галеева [12]. Например, величина бутстрэп тока в токамаках в случае чисто водородной плазмы ( $Z_{\text{eff}} = 1$ ) будет определяться формулой:

$$J_{\parallel} = -\varepsilon^{0,5} \frac{c}{\mu B_0} \frac{dp}{dr}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – отношение малого и большого радиусов плазменного тора, а остальные величины те же, что и в формуле (1). Как видно из приведенной выше формулы, бутстрэп ток в тороидальной плазме направлен вдоль тора и максимален в области высоких градиентов плазменного давления. В плазме стеллараторов в области малых частот столкновений заряженных частиц в этот ток дают также вклад стеллараторно запертые частицы, возникающие из-за винтовой гофрировки магнитного поля (см., например, [13–15]). Величина этого тока зависит от формы магнитных поверхностей, которые определяются модовым составом пространственных винтовых гармоник. В зависимости от набора гармоник винтового поля величина бутстрэп тока может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению с формулой (2). Теоретические оценки величины этого тока в ЭЦР-режиме нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, выполненные С. В. Щепетовым [16], предсказывают величину бутстрэп тока порядка 1 кА.

При ЭЦР-нагреве в плазме возникает дополнительный продольный (вдоль тора) электрический ток, связанный с тем, что функции распределения электронов в ходе нагрева оказываются различными для частиц с противоположным направлением продольной скорости. Впервые данный эффект был исследован в работе Фиша и Бузера [17]. Наиболее эффективная генерация продольного тока происходит в области максимального энерговклада в удерживаемую в стеллараторе плазму, то есть при центральном ЭЦР-нагреве, при котором поглощение СВЧ-излучения происходит в центре плазменного шнура. В соответствии с выводами работы [4], величина этого тока может достигать в стеллараторе Л-2М значений  $J_{\parallel} \approx 3$  кА, то есть того же порядка, что и бутстрэп ток.

Цель представленной работы состояла в исследовании возбуждения электрических токов в плазме стелларатора Л-2М при мощном СВЧ-нагреве в режиме электронного циклотронного резонанса.

## 2. Измерение поперечных магнитных полей, создаваемых токами Пфирша-Шлютера в плазме при ЭЦР-нагреве

Измерения поперечного (по отношению к плоскости тороидальной плазмы) магнитного поля, создаваемого токами Пфирша-Шлютера, проводилось в экспериментах по СВЧ-нагреву плазмы на второй гармонике ЭЦР в стеллараторе Л-2М с помощью специальных обмоток. Первоначально они были добавлены к системе магнитных обмоток стелларатора для создания поперечного магнитного поля для смещения плазменного шнура вдоль большого радиуса тора и исследования его влияния на удержание плазмы. Результаты этих экспериментов изложены в работе [18]. Поперечное магнитное поле создавалось четырьмя обмотками, расположенными снаружи и внутри тора и разнесенными по вертикали. В дальнейшем эти обмотки использовались в экспериментах при создании и нагреве плазмы в режиме ЭЦР для измерения поперечных магнитных полей, создаваемых токами Пфирша-Шлютера. В экспериментах с мощностью СВЧ-нагрева в диапазоне  $P = 100\text{--}600$  кВт и средней плотностью плазмы  $n_e = (1\text{--}2,5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  было обнаружено, что отношение величины этих токов к энергии плазменного шнура, измеряемой с помощью диамагнитной диагностики, сохраняется примерно постоянным [19]. В различных режимах нагрева это отношение менялось не более чем на  $\pm 15\%$ . Данное обстоятельство позволило (при введении соответствующего коэффициента) использовать сигналы обмоток поперечного поля для измерения плазменной энергии наряду с измерениями энергии плазмы с помощью диамагнитной диагностики. В дальнейшем

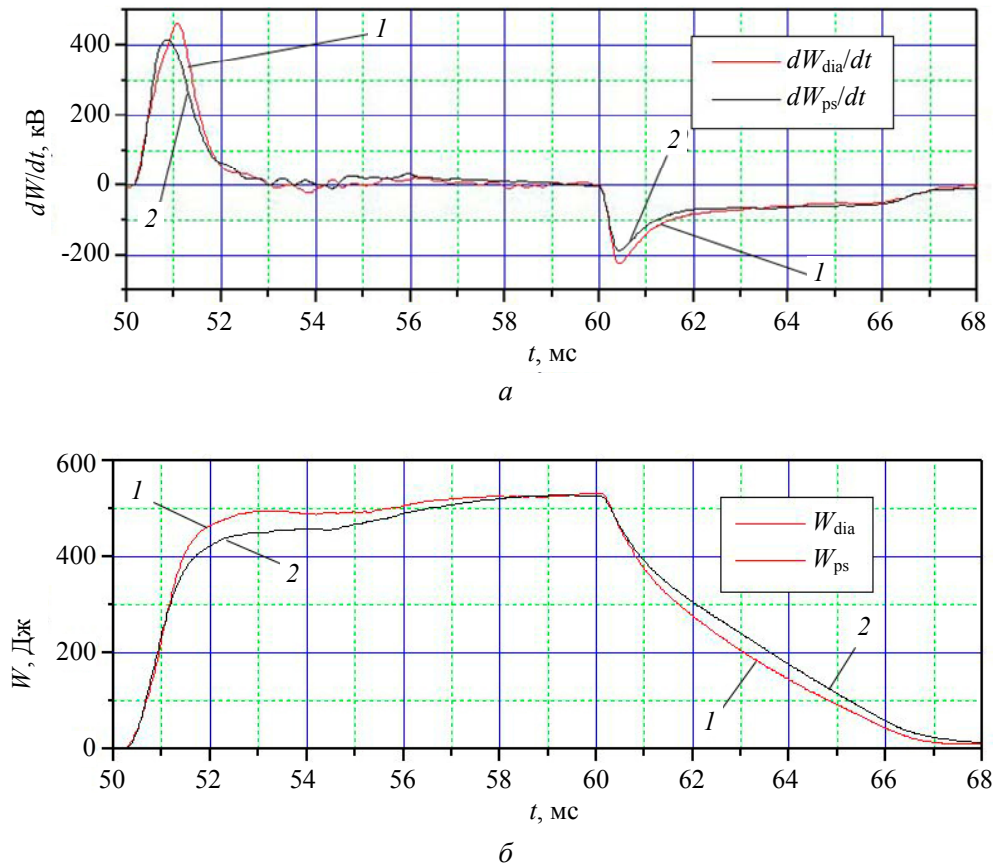
обе диагностики использовались одновременно для определения энергии плазмы. На рис. 3 приведен пример соответствия сигналов диамагнитной диагностики и поля Пфирша-Шлютера. В этом импульсе работали два гиротрона на частотах 75 и 74,8 ГГц (режим центрального нагрева) с суммарной СВЧ-мощностью 520 кВт. Как видно из рисунка, обе диагностики дают близкие результаты. К концу импульса суммарная энергия плазменного шнура в стеллараторе достигает величины 530 Дж.

## 3. Измерение продольных токов, возникающих при ЭЦР-нагреве плазмы

Измерение продольного электрического тока, возникающего в плазме при ЭЦР-нагреве, проводилось с помощью пояса Роговского, который располагался на наружной поверхности тонкостенной (1,2 мм) вакуумной камеры стелларатора, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали. Таким образом, пояс Роговского охватывал всё поперечное сечение плазменного шнура. Как уже отмечалось выше, теоретические оценки величины бутстрэп тока в ЭЦР-режиме могут достигать значений  $J_{\parallel} \approx 1$  кА. Однако в эксперименте растущий в течение импульса нагрева ток достигал на порядок меньших значений. Объясняется это тем, что тороидальный плазменный шнур обладает высокой индуктивностью. Высокая величина индуктивности связана с наличием в стеллараторе трансформатора омического нагрева с железным сердечником (см. рис. 2).

В настоящее время при ЭЦР-экспериментах омический режим используется как вспомогательный для настройки диагностического комплекса стелларатора и проверки состояния вакуумной камеры. Работа в режиме омического нагрева является более экономной по сравнению с ЭЦР-режимом, требующим закупку дорогого жидкого гелия для работы сверхпроводящих магнитов генераторов мощного СВЧ-излучения – гиротронов.

No 17475



**Рис. 3.** Осциллограммы сигналов (а), полученные с помощью диамагнитной диагностики (1) и магнитных обмоток, регистрирующих токи Пфирша-Шлютера (2) в плазме стелларатора Л-2М при введении импульсной СВЧ-мощности 520 кВт с длительностью импульса 10 мс в режиме центрального ЭЦР-нагрева, (б) – восстановленные путем численного интегрирования осциллограмм (а) значения изменения запасенной энергии плазменного шнура в течение действия импульса СВЧ нагрева. Вверху рисунка цифрами No 17475 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

Рассчитать точно индуктивность плазменного шнура при наличии внутри него железного сердечника трансформатора довольно сложно, поскольку необходимо знать поток рассеяния магнитопровода. Наличие большой индуктивности плазменного тора приводит к сильному изменению временного хода продольного тока в плазме. При быстром возникновении плазменного тока  $J_{\parallel}(0)$  его временной ход описывается формулой вида:

$$J_{\parallel}(t) = J_{\parallel}(0)[1 - \exp(-t/\tau)], \quad (3)$$

где величина характерного времени  $\tau = L/\mathfrak{R}$  равна отношению индуктивности

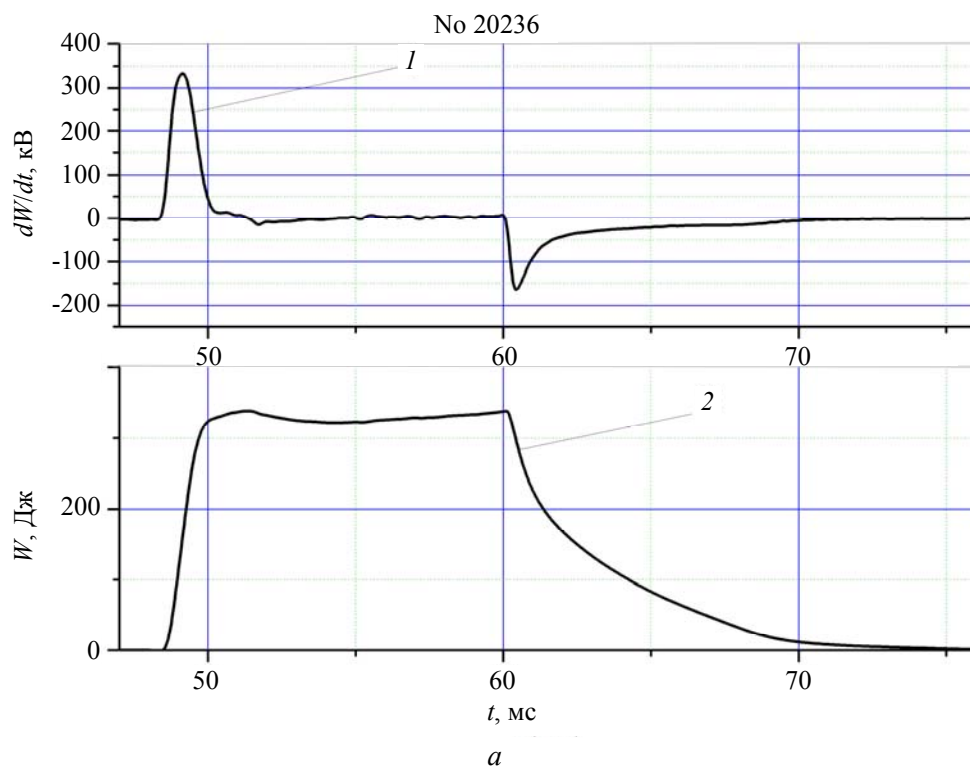
плазменного шнура  $L$  к его омическому сопротивлению  $\mathfrak{R}$ . Если величина  $\tau$  значительно больше длительности ЭЦР-нагрева (обычно равной 12 мс), то продольный ток в плазме будет линейно возрастать со временем, не достигая своего стационарного значения. В стандартном ЭЦР-режиме работы стелларатора этот ток достигал к концу импульса значений 150–200 А, и его влиянием можно было пренебречь.

Чтобы уменьшить индуктивность плазменного шнура и убедиться в правильности объяснения наблюдаемого в эксперименте поведения продольного тока, были проведены эксперименты с законченной обмоткой трансформатора омиче-



ского нагрева, что привело к существенному снижению величины индуктивности плазменного шнура. Регистрируемый продольный ток в плазме в этом случае увеличивался в течение импульса СВЧ-нагрева и к концу импульса достигал значения 1,5 кА, но по-прежнему не успевал выйти на стационарные значения. То есть даже при уменьшенной индуктивности шнура его постоянная времени  $\tau$  существенно превышала длительность СВЧ-импульса. Увеличение продольных токов в плазме привело к существенному изменению формы импульсов, регистрируемых обмотками поперечного поля. На рис. 4 приведены соответствующие сигналы без закоротки обмотки трансформатора и в случае её закоротки.

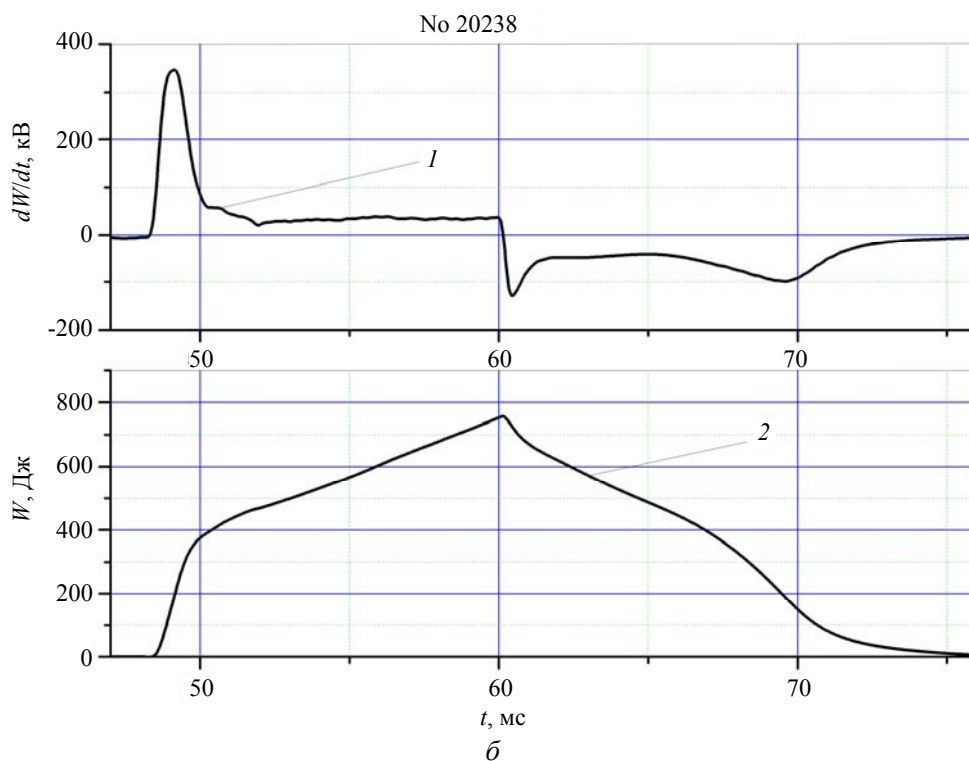
В стандартном режиме (рис. 4, а, импульс No 20236) проинтегрированный по времени сигнал с обмоток поперечного поля возрастал до максимальных значений за время порядка 1,5 мс. В остальное время СВЧ-импульса он оставался приблизительно постоянным, меняясь не более чем на 5 % (рис. 4, а, сигнал 2). Как указывалось выше (раздел 2), в этом случае показания обмоток поперечного поля с достаточной точностью согласуются с данными диамагнитной диагностики. В случае с закороченной обмоткой трансформатора (рис. 4, б, импульс No 20238) проинтегрированный сигнал с обмоток поперечного поля также быстро возрастал за время порядка 1,5 мс, но далее не выходил на стационар, а непрерывно возрастал во времени



**Рис. 4, а.** Осциллограмма сигнала (1)  $dW/dt$  (соответствует временной производной запасенной энергии  $W$  плазменного шнура при СВЧ нагреве), полученного с магнитных обмоток, регистрирующих токи Пфирша-Шлютера в плазме стелларатора Л-2М при введении импульсной СВЧ-мощности 520 кВт с длительностью импульса 12 мс в режиме центрального ЭЦР-нагрева при разомкнутых обмотках трансформатора; (2) сигнал, восстановленный путем численного интегрирования осциллограммы (1), соответствует энергии плазменного шнура. Вверху рисунка цифрами No 20236 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

вплоть до окончания импульса нагрева (рис. 4, б, сигнал 2). Из приведенного рисунка следует, что энергия плазмы якобы возрастает за последние 10 мс импульса СВЧ-нагрева примерно вдвое. Но это противоречит как данным по измерениям плотности и температуры плазмы, так и показаниям диамагнитной диагностики, указывающим на то, что энергия плазмы за последние 10 мс существенно не меняется. Объяснение этого противоречия заключается в том, что обмотки поперечного поля расположены несимметрично относительно центра плазменного шнура, и возросший продольный плазменный ток, генерируя поперечный магнитный поток, начинает давать вклад в сигналы обмоток поперечного поля. Данные обмотки не были предусмотрены в первоначальном про-

екте стелларатора и были созданы позднее. Наиболее удобный метод их размещения – прикрепление к четырем массивным алюминиевым силовым кольцам, на которых закреплены 28 катушек продольного магнитного поля стелларатора. В радиальном направлении наружные и внутренние обмотки поперечного поля размещены примерно симметрично относительно центра магнитной системы стелларатора. Расстояние центра внешних обмоток от магнитной оси стелларатора составляло величину  $\Delta R = +30$  см. Для внутренних обмоток это значение равно  $\Delta R = -35$  см. По высоте их координаты существенно различаются. Наружные обмотки расположены относительно средней плоскости на расстоянии  $\Delta z = +/ - 30$  см, а внутренние – на расстоянии  $\Delta z = +/ - 15$  см. Данная асимметрия



**Рис. 4, б.** Осциллограмма сигнала (1)  $dW/dt$ , полученного с магнитных обмоток, регистрирующих токи Пфирша-Шлютера в плазме стелларатора Л-2М при введении импульсной СВЧ-мощности 520 кВт с длительностью импульса 12 мс в режиме центрального ЭЦР-нагрева при замкнутых обмотках трансформатора; (2) – восстановленные путем численного интегрирования осциллограммы (1) значения изменения запасенной энергии плазменного шнура  $W$  в течение действия импульса СВЧ нагрева. Вверху рисунка цифрами No 20238 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

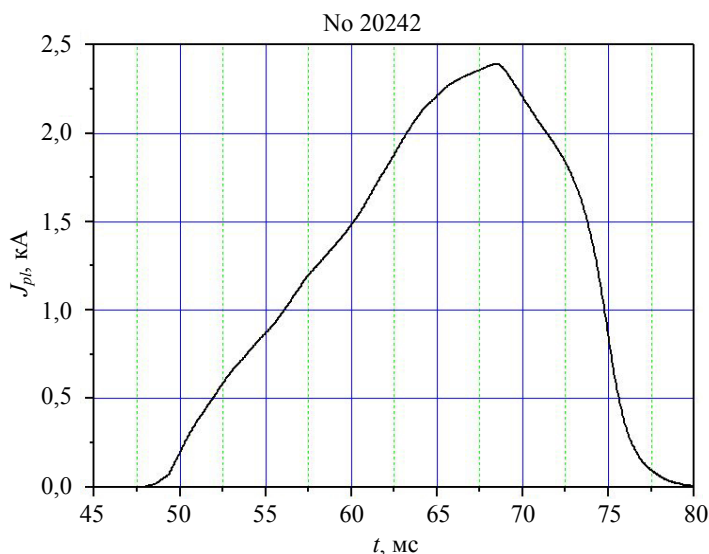


приводит к тому, что в случае закоротки обмотки трансформатора и возрастании на порядок продольных токов в плазме стелларатора, обмотки поперечного поля регистрируют сигналы от них, по величине соизмеримые с сигналами токов Пфирша-Шлютера и, соответственно, возрастание продольного тока в стеллараторе делает невозможным измерения плазменной энергии по показаниям сигналов обмоток поперечного поля. Из рис. 4, б (1) следует, что продольный ток непрерывно растет во времени в течение всего импульса СВЧ-нагрева, то есть 12 мс. Таким образом, несмотря на уменьшенную индуктивность плазменного шнура, его постоянная времени по-прежнему существенно превышает 30 мс.

Чтобы выяснить, начиная с какого момента времени начнется отклонение от линейного роста тока в плазме, на стеллараторе был проведен эксперимент с удлинением длительности СВЧ-импульса до 20 мс (с 48 до 68 мс при временном отсчете от момента включения магнитного поля). В стандартном режиме ЭЦР-нагрева в стеллараторе Л-2М длительность импульса нагрева составляла обычно 12 мс, с 48 до 60 мс после включения импульса магнитного поля. В течение первых 2 мс происходил СВЧ-пробой инжектированного газа, формирование плазменного шнура

и его начальный нагрев. В последующие 10 мс проводились исследования ЭЦР-нагрева и удержания плазмы в стеллараторном магнитном поле при практически неизменных его значениях. Как было указано выше, радиальная координата зоны электронного циклотронного резонанса в течение импульса практически не меняется. При удлинении СВЧ-импульса нагрева величина магнитного поля к моменту времени 68 мс снижалась на 8,5 % относительно его максимального значения, что приводило к сдвигу зоны резонанса от центра примерно на 3 сантиметра. Таким образом, со временем происходит переход от центрального к нецентральному нагреву. Однако поглощение СВЧ-мощности по-прежнему остается эффективным, то есть с точки зрения временного поведения тока условия, казалось бы, сохранялись неизменными. Временной ход тороидального тока, регистрируемого поясом Роговского, для случая длинного импульса приведен на рис. 5.

Как видно из рисунка, плазменный ток продолжает расти во времени в течение всех 20 мс СВЧ-импульса, достигая максимальных значений  $I_{pl} \approx 2,5$  кА. Очевидно, временная зависимость регистрируемого тока полностью определяется влиянием магнитной системы трансформатора омического нагрева. На стадии ЭЦР-нагрева



**Рис. 5.** Осциллограмма сигнала продольного тока в плазме стелларатора в условиях ЭЦР-нагрева при вводимой СВЧ-мощности 520 кВт и длительности импульса 20 мс. Вверху рисунка цифрами No 20242 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

из-за малого сопротивления  $\mathcal{R}$  плазменного шнура его постоянная времени ( $\tau = L/\mathcal{R}$ ) во много раз превышает длительность импульса (20 мс), что приводит к практически линейному росту тока во времени. Таким образом, даже при удлинении СВЧ-импульса ЭЦР-нагрева нам не удалось точно измерить величину возникающего в плазме тока. Очевидно, что его величина существенно превышает 2,5 кА. После выключения СВЧ-нагрева и остывания плазменного шнура и, соответственно, роста его сопротивления происходит существенное уменьшение его постоянной времени  $\tau$ . Это сказывается на временном ходе продольного тока. Как видно из рис. 4, продольный ток относительно быстро падает до нулевых значений за время около 10 мс.

Эксперименты с закороченной обмоткой трансформатора показали, что с помощью существующей обмотки поперечного поля нельзя надежно измерять плазменную энергию, поскольку она регистрирует не только токи Пфирша-Шлютера, но и возникающие в плазме продольные токи. Наблюдавшееся ранее совпадение сигналов диамагнитной диагностики с показанием сигналов данной обмотки (рис. 3) было обусловлено тем, что за время импульса ЭЦР-нагрева продольные токи не успевали дорасти до значений, при которых начинает сказываться их влияние на общий сигнал.

Более детальное изучение временного хода токов Пфирша-Шлютера и продольных токов показало, что их временной ход при включении и выключении ЭЦР-нагрева различен. На рис. 6 приведены временной ход основных параметров плазмы при включении 20 мс СВЧ-импульса нагрева мощностью около 500 кВт.

Кривая 1 соответствует сигналу вводимой в камеру стелларатора СВЧ-мощности. Кривая 2 показывает временной ход средней по сечению шнура плотности плазмы, измеряемой с помощью

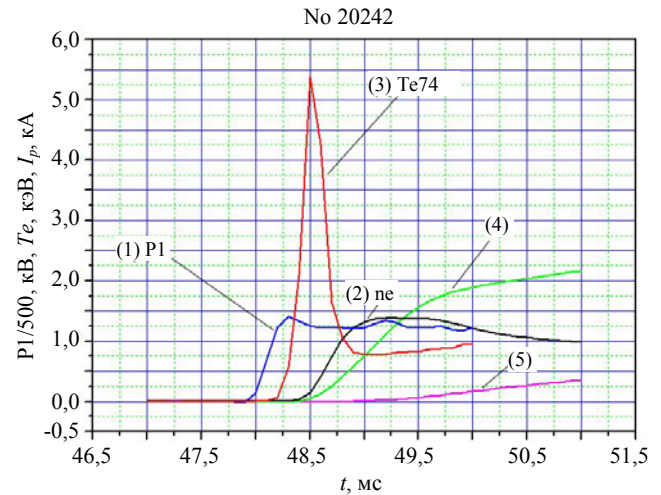


Рис. 6. Осциллограммы сигналов, регистрируемых диагностическими системами стелларатора Л-2М на начальной стадии формирования и удержания плазмы в стеллараторе: (1) — огибающая вводимого в плазму СВЧ-импульса (усредненная по времени мощность импульса составляет 520 кВт при центральном СВЧ-нагреве плазмы на частоте второй гармоники ЭЦР 75 ГГц); (2) — изменение во времени средней плотности плазмы ( $n_{max} \approx 1,4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ); (3) — сигнал СВЧ-излучения на частоте 74 ГГц, пропорциональный электронной температуре плазмы (представлен на графике в энергетических единицах кэВ); (4) — осциллограмма сигнала поперечного магнитного поля, (5) — осциллограмма продольного тока в кА, регистрируемого поясом Роговского. Вверху рисунка цифрами No 20242 указан номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

2 мм интерферометра. Как видно из рисунка, примерно 0,5 мс требуется для начала интенсивной ионизации водородного газа и начала формирования плазменного шнура. Это время согласуется с результатами теоретического расчета ЭЦР-пробоя в стеллараторе Л-2М на второй гармонике циклотронной частоты [20]. Еще примерно 0,5 мс требуется для достижения максимальных значений плотности плазмы. Кривая 3 показывает временной ход сигналов излучения плазмы на частоте 74 ГГц. При центральном ЭЦР-нагреве на второй гармонике электронной частоты (75 ГГц при  $B_0 = 1,34 \text{ Тл}$ ) излучение на данной частоте описывает временной ход электронной температуры в цен-

тральной части плазменного шнура. Как было указано в первом разделе статьи, начиная с электронной температуры плазмы большей 100 эВ, плазма в стеллараторе Л-2М становится черным телом для излучения на второй гармонике циклотронной частоты, что позволяет измерять ее электронную температуру. Большой пик излучения, возникающий после включения импульса СВЧ-нагрева, соответствует не равновесному излучению плазмы, а излучению ускоренных электронов, возникающих на начальной стадии ионизации водородного газа при очень низкой плотности плазмы. По мере роста ее плотности из-за взаимодействия ускоренных электронов с частицами плазмы происходит быстрая потеря их энергии и, соответственно, снижение интенсивности нетеплового излучения. Кривые 4 и 5 показывают сигналы обмотки поперечного магнитного поля и пояса Роговского. Для сигналов поперечного поля мы сохранили ту же калибровку, которую использовали ранее (рис. 3). Начиная с момента роста средней плотности плазмы, наблюдается практически линейное нарастание сигнала с обмоток поперечного поля. Оно длится примерно в течение 1 мс. Это время соответствует формированию тока Пфирша-Шлютера в плазме стелларатора. Далее временной ход сигнала меняется, что связано с развитием продольного электрического тока. Начало развития этого тока сдвинуто по времени относительно возникновения токов Пфирша-Шлютера. Его влияние на общий сигнал начинается с величин токов  $I_{pl}$ , примерно равных 100 А. Это согласуется с данными экспериментов без замыкания обмоток трансформатора, когда продольный ток в плазме не успевает за время импульса СВЧ-нагрева дорасти до значений, достаточных для влияния на общий сигнал обмоток поперечного поля. В этом случае, как было указано ранее, сигналы от токов Пфирша-Шлютера совпадают с показаниями диамагнитных измерений.

После выключения СВЧ-импульса электронного циклотронного нагрева временной ход продольного тока в плазме и сигнала с обмотки поперечного магнитного поля также различаются. На рис. 7 приведен временной ход основных параметров плазмы после выключения на 68 мс импульса СВЧ-нагрева.

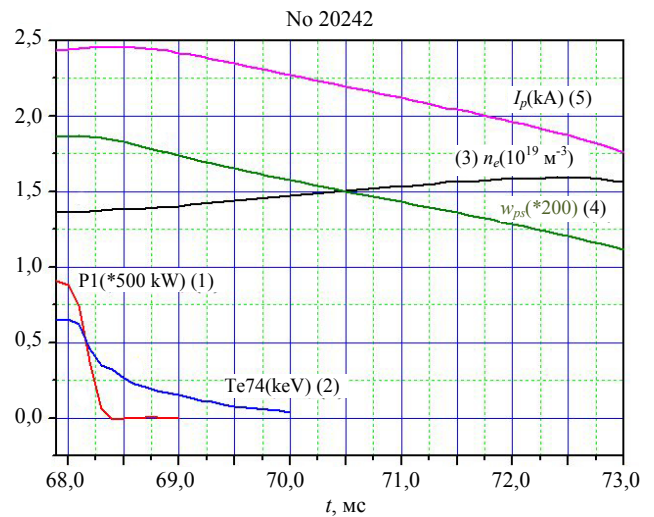
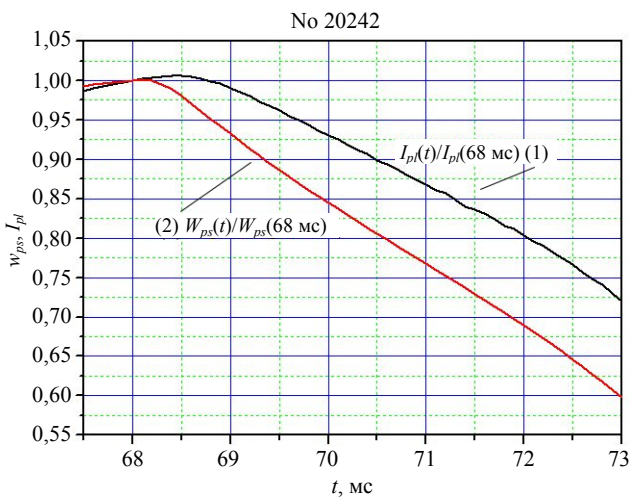


Рис. 7. Осциллограммы сигналов, регистрируемых диагностическими системами стелларатора Л-2М в конце импульса СВЧ-нагрева плазмы на частоте 75 ГГц и после его: (1) – огибающая заднего фронта импульса вводимой в плазму СВЧ-мощности; (2) – сигнал СВЧ-излучения плазмы на частоте 74 ГГц, пропорциональный электронной температуре плазмы в единицах кэВ; (3) – изменение во времени средней плотности плазмы  $n_e$  в единицах  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ ; (4) – осциллограмма сигнала датчика поперечного магнитного поля, (5) – осциллограмма продольного тока, регистрируемого поясом Роговского. Вверху рисунка цифрами No 20242 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

Электронная температура в центре плазмы (кривая 2) после выключения нагрева падает в  $e$  раз за время 0,5 мс. Дальнейшее по времени ее измерение становится ненадежным, поскольку плазма перестает уже являться черным телом. Средняя по диаметру плазмы плотность (кривая 3) практически не чувствует выключения нагрева, слегка возрастая со временем в течение 3,5 мс. Подобное вре-



менное поведение средней плотности плазмы является типичным при ЭЦР-нагреве в стеллараторе Л-2М. Обычно средняя плотность сохраняет свои значения в течение 6–8 мс после выключения нагрева. Продолжающийся рост средней плотности вплоть до 72,5 мс связан, скорее всего, не с увеличением общего количества частиц в объеме плазмы, а с изменением ее радиального профиля. Кривые 4 и 5 показывают временной ход продольного тока и сигналов обмотки поперечного поля. Как видно из рисунка, в начальные моменты времени после момента выключения их временной ход различен. Чтобы более четко проследить это различие сигналов тока и поперечного поля, их величины были пронормированы на значения этих величин в момент перед выключением импульса нагрева (рис. 8).



**Рис. 8.** Осциллограммы сигналов, регистрируемых диагностическими системами измерения продольного тока (1) и поперечного магнитного поля (2) плазмы стелларатора Л-2М после выключения импульса СВЧ-нагрева плазмы на частоте 75 ГГц. Сигналы нормированы на значения соответствующих величин для момента времени выключения СВЧ-нагрева на 68 мс. Вверху рисунка цифрами No 20242 обозначен номер рабочего импульса с плазмой на установке стелларатор Л-2М.

Как видно из рисунка, сигнал поперечного поля начинает спадать во времени уже через 0,25 мс после момента выключе-

ния, в то время как продольный ток еще продолжает возрастать в течение 0,5 мс. Быстрый спад сигналов поперечного поля связан, по-видимому, с затуханием токов Пфирша-Шлютера. Начиная с момента времени  $t \approx 70$  мс, оба сигнала спадают во времени примерно параллельно. Таким образом, сигналы, обусловленные токами Пфирша-Шлютера, реагируют на моменты включения и выключения импульсов нагрева гораздо быстрее, по сравнению с сигналами, обусловленными продольными токами, возникающими при СВЧ-нагреве. По-видимому, это связано с тем, что токи Пфирша-Шлютера обусловлены пролетными частицами плазмы, которые составляют большинство в распределении частиц по энергиям, и временные изменения функции распределения в ходе нагрева слабо сказываются на их величине. Как было показано в работе [4], достижение стационарных значений функции распределения электронов по скоростям в стеллараторе Л-2М при ЭЦР-нагреве и, соответственно, возрастание продольных токов, требует времени более 0,1 мс. Этим объясняется временная задержка регистрируемых продольных токов относительно токов Пфирша-Шлютера. Большая величина продольных токов ( $I_{pl} \approx 6-7$  кА) в стеллараторе указывает на то, что в данных экспериментах продольные токи, генерируемые при ЭЦР-нагреве, суммировались с бутстрэп токами.

#### 4. Заключение

1. В представленной работе приводятся результаты экспериментальных измерений токов равновесия, возникающих в плазме стелларатора Л-2М при СВЧ-создании и нагреве плазмы в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Продольные тороидальные токи равновесия (так называемые бутстрэп токи) и токи, возникающие при

ЭЦР-нагреве, измерялись с помощью пояса Роговского, охватывающего все поперечное сечение плазмы. Токи, протекающие в противоположных направлениях снаружи и внутри тора (так называемые токи Пфирша-Шлютера), измерялись с помощью обмоток поперечного магнитного поля.

2. Показано, что наличие в конструкции стелларатора железного трансформатора омического нагрева существенно влияет на временное развитие токов равновесия вследствие значительной индуктивности плазменного шнура.

3. Эксперименты с закороткой первичной обмотки трансформатора и, соответственно, с уменьшением его индуктивности позволили существенно увеличить регистрируемые продольные токи в плазме стелларатора. Однако небольшая общая длительность импульса магнитного поля стелларатора не дала возможности достигнуть момента выхода продольных токов на стационарные значения даже при максимально возможной в нашем случае длительности СВЧ-импульса с длительностью 20 мс и, соответственно, измерить максимальные значения продольных тороидальных токов 2,5 кА в плазме стелларатора Л-2М при мощности ЭЦР-нагрева 500 кВт и средней по диаметру плотности плазмы  $n_e \approx 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Выполненные оценки максимально возможного тока при его выходе на стационарное значение дают 6–7 кА. Сравнение данной величины с соответствующими теоретическими оценками указывает на то, что в нашем случае СВЧ-нагрева плазмы в режиме ЭЦР возбужденные токи и бутстрэп токи суммировались.

4. Показано, что наличие возникающих в плазме продольных токов равновесия оказывает заметное влияние на регистрацию поперечных магнитных потоков, обусловленных токами Пфирша-Шлютера. Поэтому выводы работы [19] о возможности измерения суммарной плазменной

энергии плазмы по величине сигналов поперечного поля имеют методические ограничения. В этой работе не учитывалась возможность возникновения продольных тороидальных токов. Выводы данной работы [19] справедливы, когда величины продольных токов малы, и их влиянием можно пренебречь. Даже в случае изготовления обмоток поперечного поля с абсолютно симметричными координатами относительно центра магнитной системы стелларатора из-за сдвига плазменного центра при изменении плазменного давления витки обмоток могут регистрировать сигналы от продольного тока.

5. Проведенные эксперименты показали, что временное развитие токов Пфирша-Шлютера и продольных токов, возникающих при ЭЦР нагреве, различно. При включении и выключении ЭЦР-нагрева токи Пфирша-Шлютера реагируют быстрее, чем продольные токи равновесия. Это различие можно объяснить тем, что для развития стационарных значений продольных токов требуется некоторое время для установления стационарных функций распределения запертых частиц по энергиям. Токи Пфирша-Шлютера обусловлены пролетными частицами, которые во многих токамаках и стеллараторах преобладают и слабо зависят от полной функции распределения частиц по энергиям.

*Авторы благодарят Г. М. Батанова и А. И. Мецзякова за полезные обсуждения, также коллектив сотрудников стелларатора Л-2М за помощь в проведении экспериментов.*

---

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме «Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях» (0024-2019-0006).*



## ЛИТЕРАТУРА

1. Grebenschikov S. E., Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., Batanov G. M., Berezhetskiy M. S., Danilkin I. S., Donskaya N. P., Fedyanin O. I., Kharchev N. K., Kolnov Yu. V., Kolik L. V., Kovrizhnykh L. M., Lagerev V. V., Larionova N. F., Letunov A. A., Likin K. M., Meshcheryakov A. I., Nakladov A. N., Petrov A. E., Popov S. N., Sarksyian K. A., Sbitnikova I. S., Sisov E. R., Smirnova A. D., Sukhodol'skiy V. N., Voronov G. S. // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Res. Seville. 1994, IAEA, Vienna, Vol. 2. P. 327 (1995).
2. Batanov G. M., Belousov V. I., Bondar' Yu. F., Borzosekov V. D., Vasil'kov D. G., Grebenschikov S. E., Ivannikov I. A., Kolik L. V., Konchekov E. M., Malakhov D. V., Matveev N. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Sarksyian K. A., Skvortsova N. N., Stepankin V. D., Kharchev N. K., Khol'nov Yu. V., Tai E. M. // Plasma Physics Reports. 2013. Vol. 39. № 13. P. 1088.
3. Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Воронов Г. С., Гладков Г. А., Гребеничиков С. Е., Данилкин И. С., Ларионова Н. Ф., Мецерыяков А. И., Сарксян К. А., Федянин О. И., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Щенетов С. В. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 12. С. 1108.
4. Сахаров А. С., Терещенко М. А. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. Вып. 7. С. 584.
5. Сахаров А. С. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. Вып. 4. С. 291.
6. Гребеничиков С. Е., Харчев Н. К., Васильков Д. Г. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 5.
7. Grebenschikov S. E., Kharchev N. K., Vasilkov D. G. // Plasma Physics Reports. 2019. Vol. 45. № 11. P. 1059.
8. Pfirsich D., Schlüter A. // Rept. MPI/PA/7/62 (Max-Planck Inst. Phys. and Astrophys.), Munich (1962).
9. Галеев А. А. // Письма ЖЭТФ. 1969. Вып. 10. С. 353.
10. Галеев А. А. // ЖЭТФ. 1970. Вып. 59. С. 1378.
11. Bickerton R. J., Connor J. W., Taylor J. B. // Nature Phys. Science. 1971. Vol. 229. P. 110.
12. Сагдеев Р. З., Галеев А. А. Вопросы теории плазмы. Вып. 7. – М.: Госатомиздат, 1973.
13. Zarnstorff M. C., Prager S. C. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 53. P. 454.
14. Murakami M. et al. // Plasma Physics and Contr. Nuclear Fusion Res. 1990, IAEA, Vienna, Vol. 2. P. 455 (1991).
15. Yamada H., Kubo S., Watanabe E., Iguchi H., Okamura S., Morita S., Idei H., Yamada I., Arimoto H., Matsuoka K., Nishimura K., Sakakibara S., Takahashi C., Takita Y. // Nuclear Fusion. 1994. Vol. 34. № 5. P. 641.
16. Щенетов С. В. // Частное сообщение.
17. Fisch N. J., Boozer A. M. // Phys. Rev. Lett. 1980. Vol. 45. P. 720.
18. Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Гладков Г. А., Гребеничиков С. Е., Данилкин И. С., Коврижных Л. М., Колик Л. В., Кузнецов А. Б., Ларионова Н. Ф., Ликин К. М., Малых Н. И., Мецерыяков А. И., Петров А. Е., Сарксян К. А., Сбитникова И. С., Скворцова Н. Н., Федянин О. И., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Щенетов С. В. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 1. С. 3.
19. Fedyanin O. I., Berezhetskii M. S., Shchepetov S. V., Kuznetsov A. V. / 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg 2003 ECA Vol. 27A. P. 4.7.
20. Shchepetov S. V., Tereshchenko M. A., Vasilkov D. G., Kholnov Yu. V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. Vol. 60. P. 125003.

PACS: 52.55.Hc, 52.25. Xz, 52.70.Ds

## Study of electric currents excitation in the plasma of the L-2M stellarator with its electronic cyclotronic creation and heating

S. E. Grebenschikov, D. G. Vasilkov, V. A. Ivanov, K. A. Sarksyian,  
M. A. Tereshchenko, and N. K. Kharchev

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Received July 15, 2021

*The results of measuring the longitudinal electric current excited in the toroidal plasma of the L-2M stellarator as a result of powerful pulsed microwave heating*

**(power up to 600 kW, pulse duration up to 20 ms) are presented. In the experiments, to create and heat plasma in the stellarator, microwave radiation of gyrotrons with a frequency of 75 GHz, equal to the frequency of the 2nd harmonic of electron cyclotron resonance for a magnetic field with induction  $B = 1.34$  T at the center of the plasma column, was used. To measure the currents in the plasma, diagnostic systems of the stellarator were used, designed to record changes in time of the transverse and poloidal magnetic fields. It is shown that the presence of an ohmic heating iron transformer in the stellarator design significantly affects the temporal development of equilibrium currents due to the significant inductance of the toroidal plasma. When compensating the inductance of these devices, the expected value of the current excited in the plasma can reach a value of about 7 kA.**

**Keywords:** electric current excitation, magnetized toroidal plasma, stellarator, microwave heating, electron cyclotron resonance, plasma energy, plasma inductance.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-4-310-324

#### REFERENCES

1. S. E. Grebenschikov, V. V. Abrakov, D. K. Akulina, E. D. Andryukhina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskiy, I. S. Danilkin, N. P. Donskaya, O. I. Fedyanin, N. K. Kharchev, Yu. V. Kolnov, L. V. Kolik, L. M. Kovrizhnykh, V. V. Lagerev, N. F. Larionova, A. A. Letunov, K. M. Likin, A. I. Meshcheryakov, A. N. Nakladov, A. E. Petrov, S. N. Popov, K. A. Sarksyanyan, I. S. Sbitnikova, E. R. Sisov, A. D. Smirnova, V. N. Sukhodol'skiy, and G. S. Voronov, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Res.*, Seville 1994, IAEA, Vienna, V.2, p.327 (1995).
2. 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. Sarksyanyan, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, N. K. Kharchev, Yu. V. Khol'nov, and E. M. Tai, *Plasma Physics Reports* **39** (13), 1088 (2013).
3. D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, et al., *Plasma Phys. Rep.* **29** (12), 1108 (2003).
4. A. S. Sakharov and M. A. Tereshchenko, *Plasma Phys. Rep.* **28** (7), 584 (2002).
5. A. S. Sakharov, *Plasma Phys. Rep.* **45** (4), 291 (2019).
6. S. E. Grebenschikov, N. K. Kharchev, and D. G. Vasilkov, *Applied Physics*, No. 2, 5 (2019) [in Russian].
7. S. E. Grebenschikov, N. K. Kharchev, and D. G. Vasilkov, *Plasma Physics Reports* **45** (11), 1059 (2019).
8. D. Pfirsch and A. Schlüter, Rept. MPI/PA/7/62 (Max-Planck Inst. Phys. and Astrophys.), Munich (1962).
9. A. A. Galeev, *Pis'ma ZhETF*, No. 10, 353 (1969).
10. A. A. Galeev, *ZhETF*, No. 59, 1378 (1970).
11. R. J. Bickerton, J. W. Connor, and J. B. Taylor, *Nature Phys. Science* **229**, 110 (1971).
12. R. Z. Sagdeev and A. A. Galeev, *Questions of Plasma Theory. Iss. 7* (Moscow, Gosatomizdat, 1973) [in Russian].
13. M. C. Zarnstorff and S. C. Prager, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 454 (1984).
14. M. Murakami, et al., *Plasma Physics and Contr. Nuclear Fusion Res.* 1990, IAEA, Vienna, **2**, 455 (1991).
15. H. Yamada, S. Kubo, E. Watanabe, H. Iguchi, S. Okamura, S. Morita, H. Idei, I. Yamada, H. Arimoto, K. Matsuoka, K. Nishimura, S. Sakakibara, C. Takahashi, and Y. Takita, *Nuclear Fusion* **34** (5), 641 (1994).
16. S. V. Shchepetov *Part Message*.
17. N. J. Fisch and A. M. Boozer, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 720 (1980).
18. D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, et al. *Plasma Phys. Rep.* **26** (1), 3 (2000).
19. O. I. Fedyanin, M. S. Berezhetskii, S. V. Shchepetov, and A. V. Kuznetsov, in *Proc. 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.*, St. Petersburg 2003 ECA Vol. 27A. P. 4.7.
20. S. V. Shchepetov, M. A. Tereshchenko, D. G. Vasilkov, and Yu. V. Kholnov, *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 125003 (2018).