

УДК 621.039.643:533.951.2:621.039.623

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Д.Г. Васильков^{1, 2}, Г.М. Батанов¹, В.Д. Борзосеков¹, И.Ю. Вафин¹, С.Е. Гребенщиков¹, И.А. Гришина¹,
В.А. Иванов¹, А.А. Летунов¹, В.П. Логвиненко^{1, 3}, А.И. Мещеряков¹, М.Н. Петрова^{1, 2}, В.Д. Степахин¹,
Н.К. Харчев¹, Ю.В. Хольнов¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Метод электронно-циклотронного резонанса является одним из основных для нагрева плазмы в современных термоядерных установках. Закономерности ионизации и нагрева плазмы СВЧ-волнами являются актуальными для повышения температуры электронного компонента плазмы до необходимых значений. В данной статье представлены результаты исследования динамики создания и нагрева высокотемпературной плазмы, удерживаемой в магнитной ловушке-стеллараторе. Нагрев осуществлялся в импульсно-периодическом режиме в переменном во времени магнитном поле с регулируемыми по амплитуде и времени импульсами СВЧ и паузами между ними, их длительность менялась в диапазоне 1—4 мс. При модуляции режимов ЭЦР-нагрева исследовалось поведение профилей электронной температуры и плотности, а также характеристики краевой плазмы.

Ключевые слова: плазма, стелларатор, импульсно-периодический режим нагрева, электронно-циклотронный нагрев, электронная плотность, электронная температура, зондовые характеристики.

PULSE-PERIODIC ECR-HEATING PLASMA MODE IN L-2M STELLARATOR

D.G. Vasilkov^{1, 2}, G.M. Batanov¹, V.D. Borzosekov¹, I.Yu. Vafin¹, S.E. Grebenschikov¹, I.A. Grishina¹,
V.A. Ivanov¹, A.A. Letunov¹, V.P. Logvinenko^{1, 3}, A.I. Meshcheryakov¹, M.N. Petrova^{1, 2}, V.D. Stepankin¹,
N.K. Kharchev¹, Yu.V. Kholnov¹

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The electron cyclotron resonance method is one of the main methods for plasma heating in modern thermonuclear devices. Mechanisms of ionization and plasma heating by microwave waves are actual for increasing the temperature of the plasma's electron component to the required values. This article presents the results of analysis of the experiments on creation and heating of high-temperature plasma confined in a stellarator magnetic trap. Heating was carried out in a pulse-periodic mode in a time-varying magnetic field with microwave pulses regulated in amplitude and time with pauses between them; their duration varied in the range of 1—4 ms. Dynamic of the electron temperature and density profiles were investigated with the EC-heating modulating as well as the edge plasma features.

Key words: plasma, stellarator, pulse-periodic heating mode, electron-cyclotron heating, electron density, electron temperature, probe characteristics.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-79-89

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжаются различные исследования в поддержку реализации проекта управляемого термоядерного синтеза (УТС) с помощью магнитного удержания высокотемпературной плазмы в замкнутых ловушках. Наибольшие успехи в развитии достигнуты на токамаках, на физических принципах которых будет основываться крупнейший международный термоядерный проект — установка ИТЭР. К наиболее серьёзным трудностям в токамаках относятся проблемы, связанные с необходимостью наличия в них тока высоких значений (индукционного или создаваемого альтернативными методами). По этой причине активно изучаются альтернативные методы поддержания тока, такие как current-drive и др. Однако в любом случае с током связаны многочисленные неустойчивости, приводящие к срывам, что, в конечном итоге, может привести к полному распаду плазменного шнуря и попаданию горячей плазмы на стенки вакуумной камеры, что является крайне нежелательным.

В связи с этим весьма перспективными являются исследования образования и нагрева плазмы безтоковыми методами, что в особенности распространено в стеллараторных системах, в которых в отли-

чие от токамаков суперпозиция магнитных полей, удерживающих плазму, создаётся с помощью внешних проводников, вследствие чего отсутствует необходимость в наличии тока, протекающего по плазме. Для получения такой плазмы можно использовать нагрев волнами или пучком нейтральных атомов.

ЭЦР-нагрев плазмы связан с некоторыми проблемами. Во-первых, сам эффект поглощения излучения на резонансных частотах сопряжён с явлением отсечки волны при критических значениях плотности, из чего следует необходимость контроля средней плотности и её пространственного распределения. Во-вторых, вклад энергии непосредственно идёт в электронный компонент, а нагрев ионного компонента осуществляется только за счёт кулоновских столкновений. В-третьих, существует проблема эффективности нагрева плазмы СВЧ-излучением, когда наблюдается непоглощение отдельных мод поляризации, а также различные эффекты из-за их трансформации. Необходим контроль за непоглотившимся излучением с целью повышения эффективности нагрева. Данной проблеме посвящены в настоящее время многие работы (экспериментальные и теоретические), например, исследование трансформации и измерение непоглощённого компонента излучения на установке Heliotron J [1].

В экспериментах на стеллараторе Л-2М одной из основных целей экспериментов было получение максимально возможной энергии плазмы, для чего в экспериментах постепенно увеличивалась мощность СВЧ-нагрева. Было установлено, что мощность СВЧ, определённая по калориметрическим измерениям (с учётом обычной моды поляризации, не поглощаемой в плазме), существенно превышает измеренную поглощённую мощность, причём доля непоглощённой мощности растёт с ростом мощности нагрева [2]. При создании и нагреве плазмы одиночными импульсами СВЧ после ионизации и пробоя газа наблюдается стадия роста сигнала dW/dt (и роста энергосодержания W), после чего начинается кратковременный (длительностью менее 1 мс) спад диамагнитного сигнала и выход W на стационарную стадию. Выяснилось, что резкое падение dW/dt определяет ограничение возможной максимальной энергии плазмы. Нужно отметить, что при исследовании особенностей начальной стадии нагрева одиночным импульсом нужно учитывать процессы ионизации и пробоя газа, более простой представляется интерпретация дополнительного нагрева уже готовой плазмы. Отдельный интерес представляет физика процессов, происходящих в плазме при быстром изменении мощности ЭЦР-нагрева, в частности, при полном отключении (если этот механизм нагрева единственный, происходит релаксация параметров плазмы) и последующем включении при изменённых параметрах, например, при другом значении продольного магнитного поля. Подобную возможность представляют создание и нагрев плазмы с помощью набора импульсов — так называемый импульсно-периодический режим.

Ранее режим СВЧ-нагрева плазмы с помощью «пачки» одинаковых кратковременных импульсов в одном плазменном разряде применялся для разных целей на стеллараторах LHD [3] и Wendelstein 7-X [4]. В первой работе с помощью серии ультракоротких импульсов СВЧ изменялись свойства покрытия стенки вакуумной камеры. Во второй работе с помощью многоимпульсного разряда исследовались соотношения между градиентами параметров и потоками при условиях включения и выключения СВЧ-нагрева. В экспериментах на стеллараторе Л-2М предполагалось изучить, в первую очередь, эволюцию макропараметров плазмы (электрического поля и радиальных профилей температуры и плотности), впоследствии перейти к анализу параметров переноса и их связи с характеристиками турбулентности при подобном режиме нагрева.

В экспериментах на Л-2М подробно изучена стационарная стадия плазменного разряда при одиночных СВЧ-импульсах как экспериментально [5], так и теоретически [6], в частности, определены коэффициенты теплопроводности и диффузии по неоклассической модели с учётом аномального переноса.

В качестве следующего этапа исследований рассматривается изучение нестационарных процессов, в частности, быстрого изменения мощности потерь, перестройки профилей температуры, плотности и электрического поля и эволюции турбулентности при включении или выключении мощности СВЧ-нагрева. Для исследования процессов, происходящих в плазме, созданной в стеллараторной системе с помощью СВЧ-излучения, на установке Л-2М был предложен и разработан метод импульсно-периодического нагрева, представляющий собой последовательность СВЧ-импульсов с временными паузами между ними. Механизмы переноса при включении/выключении СВЧ можно детально исследовать.

При подобной схеме нагрева первый СВЧ-импульс ионизует газ и обеспечивает первоначальный нагрев плазмы, последующие импульсы создают дополнительный нагрев готовой плазмы (без потерь на ионизацию), а паузы между импульсами позволяют исследовать процессы остывания плазменного шнура.

ра и перестройки профиля плотности в режиме релаксации. Кроме того, из-за особенностей системы электропитания продольного магнитного поля установки Л-2М значение магнитной индукции B_0 на оси в течение разряда меняется от 1,34 Тл (максимальное значение, резонанс в центре) до 1,33 Тл в стандартном разряде и в отдельных случаях до 1,23 Тл, когда смещение точки резонанса от геометрического центра уже значительно. В связи с этим существует возможность проследить эволюцию плазмы в условиях перемещения точки ЭЦ-резонанса в пространстве.

К большому сожалению, из-за особенностей системы питания магнитного поля его значение меняется непрерывно, т.е. меняется и пространственная локализация ЭЦ-резонанса. В связи с этим приходится выбирать небольшую длительность СВЧ-импульсов (до 20 мс), хотя возможности гиротронного комплекса позволяют получать импульсы существенно большей длительности (50 мс и выше). Подобная схема усложняет постановку задачи, однако в первом приближении можно качественно оценить влияние различных параметров на свойства плазмы.

Ранее для импульсно-периодического режима подробно изучались эволюция мощности потерь (по диамагнитному сигналу) и её связь с микропараметрами плазмы, в первую очередь, с уровнем флюктуаций рассеянного гиротронного излучения. В работе [2] описаны особенности энергобаланса и эволюции dW/dt в импульсно-периодическом режиме. В статье [7] подробно рассматривается связь между кратковременным спадом dW/dt мощности и эволюцией микротурбулентностей плазмы. В работе анализируются результаты допплеровской рефлектометрии и рассеяния гиротронного излучения. Обнаружено, что интенсивность турбулентности в разных частотных диапазонах существенно возрастает в момент кратковременного спада диамагнитного сигнала.

Целями работы являются изучение и качественный анализ (в первом приближении) эволюции макропараметров плазмы при различных режимах модуляции ЭЦР-нагрева — анализ эволюции профилей электронной температуры, электронной плотности и электрического поля в краевой области плазмы. Исследование планируется в дальнейшем дополнить моделированием и количественными оценками параметров переноса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка Л2-М (ИОФ РАН) представляет собой классический двухзаходный стелларатор. Большой радиус системы $R = 100$ см, средний радиус плазмы $a = 11,5$ см, число заходов винтового поля $N = 2$, магнитное поле на оси камеры $B_0 = 1—1,4$ Тл, угол вращательного преобразования на оси $\iota_0 = 0,18$, угол вращательного преобразования на границе $\iota_a = 0,78$, амплитудный коэффициент винтового поля $\varepsilon = 0,228$. Внешний вид установки представлен на рис. 1, подробное описание дано в работе [8].

Эксперименты проводились с водородной плазмой при условии боронизации стенок вакуумной камеры [9]. Давление плазмы сравнительно мало $\beta \leq 0,2\%$ (β — усреднённое по объёму отношение давления плазмы к давлению магнитного поля).

Присутствует небольшой положительный (т.е. увеличивающий вращательное преобразование) ток $I_p < 1$ кА (бутстреп-ток), который не может заметно изменить шир, нарушить равновесие и быть причиной крупномасштабных неустойчивостей. Энергетическое время жизни плазмы в стандартных экспериментах достаточно мало ($\sim 1—2$ мс).

Диагностический комплекс стелларатора Л-2М позволяет проводить измерения энергии плазмы W и поглощённой мощности нагрева [5], радиального распределения электронной температуры методами рентгеновских измерений, циклотронного излучения и спектроскопии в видимом диапазоне, профилей

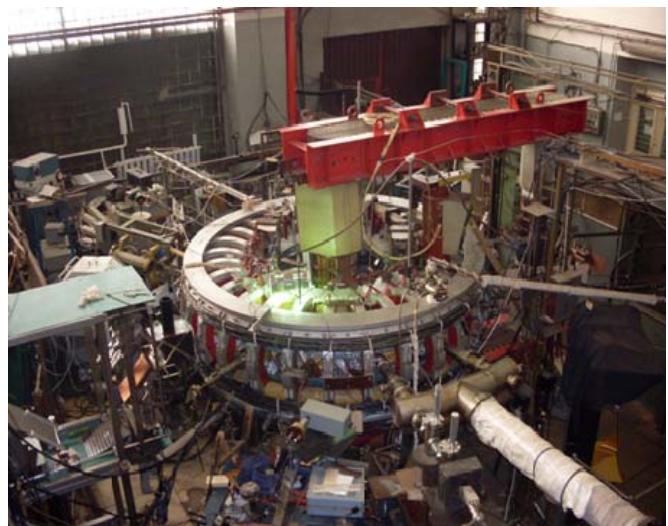


Рис. 1. Внешний вид стелларатора Л-2М

электронной плотности с помощью микроволнового и лазерного интерферометров, локальных характеристик плазмы с помощью ленгмюровских и магнитных зондов и допплеровской рефлектометрии, а также регистрацию рассеянного гиротронного излучения на флуктуациях плотности плазмы.

Основным методом создания и нагрева плазмы является ЭЦР-нагрев, осуществляемый с помощью гиротронного комплекса, также возможно использование омического нагрева (в первую очередь, для изменения структуры магнитного поля). Модернизированный гиротронный комплекс МИГ-3, созданный в 2009—2010 гг., состоит из двух гиротронов Борец (фирма «ГИКОМ») с рекуперацией энергии электронного пучка: первый гиротрон мощностью до $P = 0,8$ МВт частотой 75 ГГц; второй гиротрон мощностью до 0,7 МВт и перестройкой частоты на 71,5, 74,8 и 78,2 ГГц [10]. В представленной серии область поглощения СВЧ-мощности была локализована в центре сечения плазменного шнура при максимальном значении резонансного поля $B_0 = 1,34$ Тл.

Ранее проводились стандартные одноимпульсные эксперименты по ЭЦР-нагреву плазмы на частоте 75 ГГц в диапазоне мощности 50—300 кВт [5]. В дальнейшем (после модернизации гиротронного комплекса) в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы одиночными импульсами СВЧ-мощность нагрева достигла 800 кВт (или удельная мощность нагрева до 3,2 МВт/м³). Кроме того, была проведена серия экспериментов с двумя гиротронами, что позволило создавать частично пересекающиеся во времени два импульса СВЧ-нагрева. Результаты экспериментов при различной модуляции мощности ЭЦР-нагрева с помощью двух гиротронов опубликованы в работах [11—13], осциллограммы основных параметров типичного разряда показаны на рис. 2. Плазма создавалась первым гиротроном мощностью $P_1 \sim 100$ кВт, через 9 мс включается второй гиротрон мощностью $P_2 \sim 200$ кВт. Наиболее существенным выводом из анализа данных осциллограмм является тот факт, что при включении второго гиротрона сразу возрастает электронная температура во всех пространственных точках измерения циклотронного излучения (на рисунке представлены сигналы из двух точек) и соответственно энергия плазмы, в то время как средняя по диаметру плотность начинает существенно возрастать с задержкой ~2 мс, после чего начинает спадать температура, причём ещё до выключения СВЧ. На более поздней стадии разряда смещение области энерговклада уже значительно, и из-за появления дополнительных сложностей анализ, как и в более ранних статьях [2, 7], ограничивается вторым импульсом. Энергия же начинает линейно спадать только после выключения нагрева.

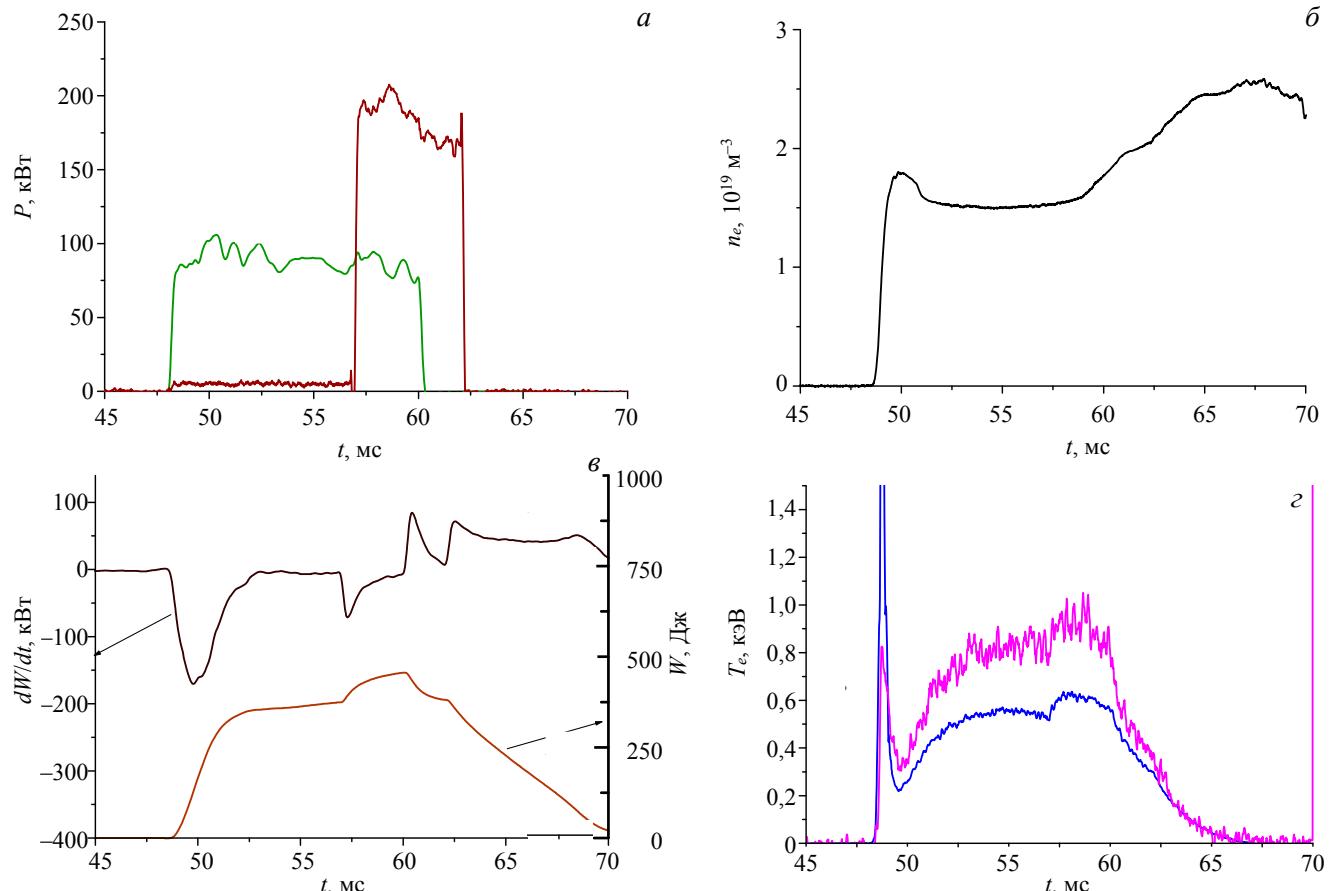


Рис. 2. Временная эволюция основных параметров разряда при работе двух гиротронов, импульс № 19 643: мощность ЭЦР-нагрева (— P_1 , — P_2) (а); средняя по диаметру электронная плотность (б); сигнал диамагнитной диагностики dW/dt (—) и энергия плазмы W (—) (в); электронная температура в центре T_e (—) и на 0,7 радиуса (—) (г)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящих экспериментах были отработаны различные режимы временной модуляции гиротронного излучения, при этом менялась длительность СВЧ-импульсов и пауз в одном плазменном разряде. Использованные режимы работы представлены в таблице, мощность гиротрона составляла 300—400 кВт. Основные измеренные параметры для некоторых режимов представлены на рис. 3—5.

Различные режимы модуляции СВЧ-импульса

Количество импульсов	Длительность импульса t_h , мс	Время между соседними импульсами t_p , мс
2	4	4
3	2,5	6
3	4	2
4	1	4
4	2,5	2,5
4	2,5	5
5	1	4

Рассмотрим эволюцию основных параметров при импульсно-периодическом режиме. Во всех представленных случаях инициация разряда с помощью первого СВЧ-импульса начинается на 48-й мс, энергетическое время жизни на стадии нагрева составляет ~ 1 мс. В первом рассмотренном случае гиротрон создаёт три импульса мощностью $P \sim 340$ кВт, длительностью $t_h \sim 2,5$ мс каждый, длительность пауз $t_p \sim 6$ мс. Временная эволюция основных параметров плазмы показана на рис. 3. При включении первого импульса СВЧ происходит ионизация и пробой газа (см. рис. 3, δ), сопровождаемый пиками надтеплового излучения (см. рис. 2, ε). Практически сразу появляется сигнал dW/dt , доходящий до максимума спустя 2 мс, после чего начинается его падение. Выключение СВЧ сопровождается продолжением спада dW/dt и T_e , в то время как плотность слегка подрастает. При втором СВЧ-импульсе в центре плазменного шнуря происходит падение плотности, а температура, упавшая до значения ~ 100 эВ, резко подрастает вместе с энергией. Необходимо отметить, что строго условия резонанса в центре реализуются на 55-й мс, а в более позд-

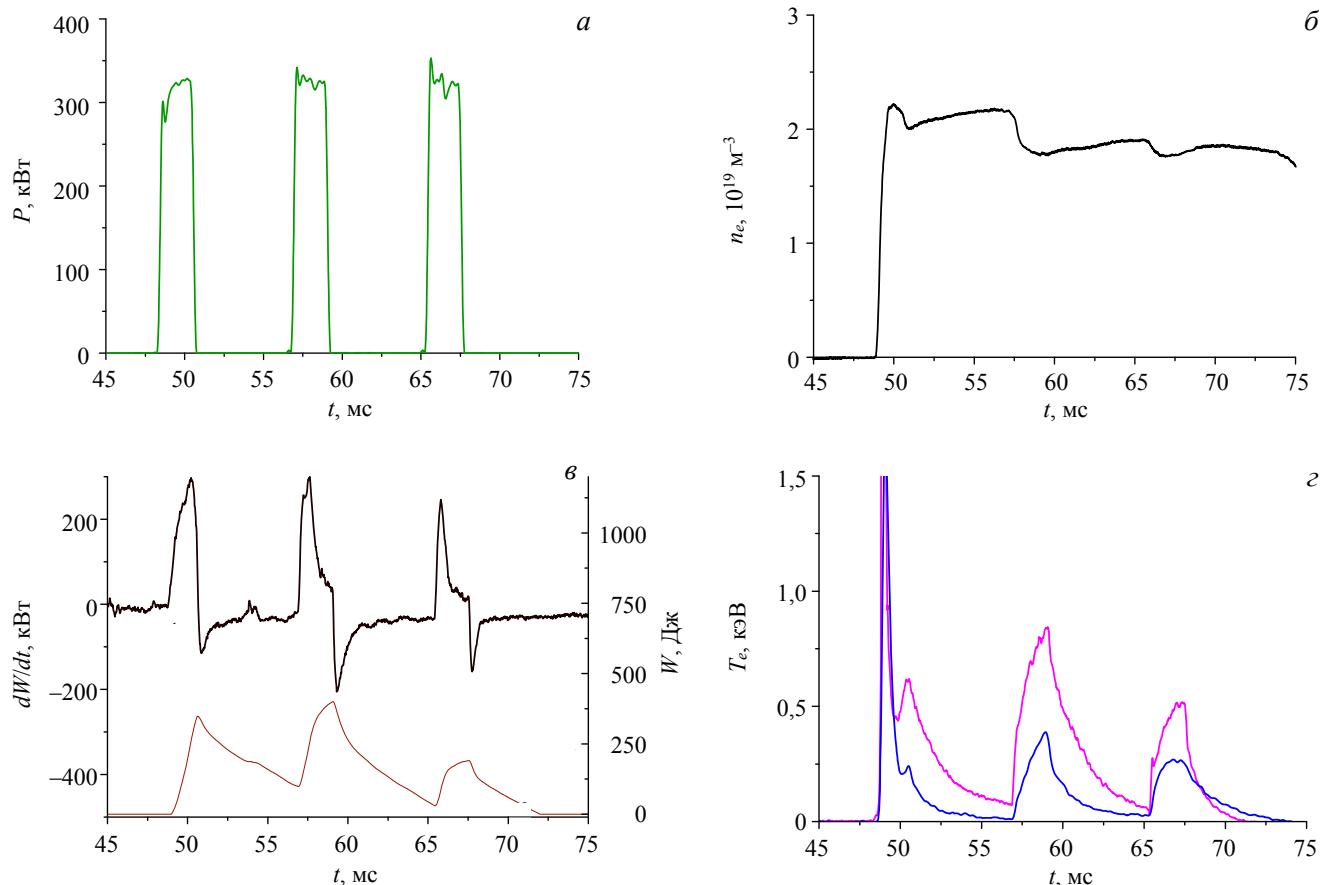


Рис. 3. Временная эволюция основных параметров разряда в импульсно-периодическом режиме (три импульса гиротрона), разряд № 21 355. Параметры аналогичны представленным на рис. 2

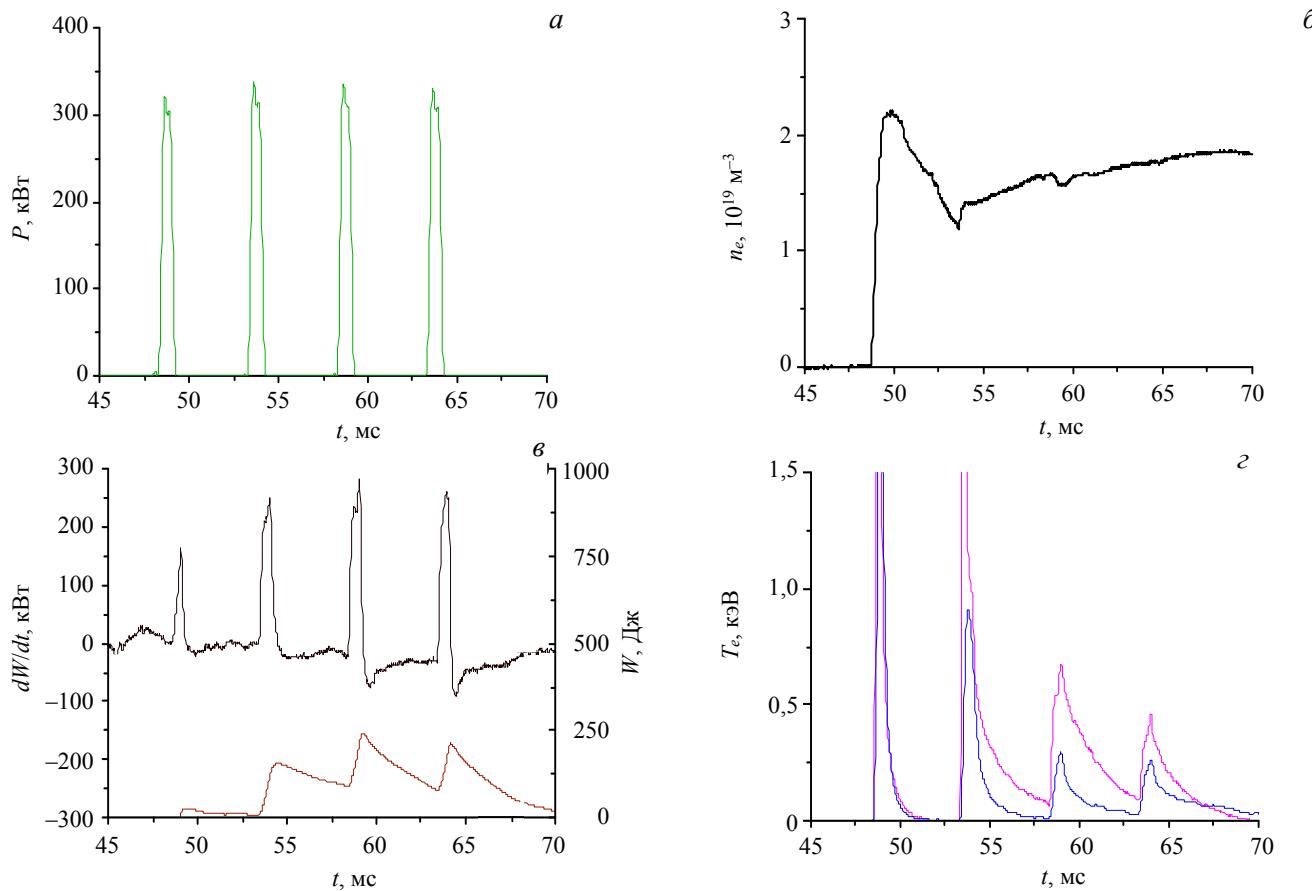


Рис. 4. Временная эволюция основных параметров разряда в импульсно-периодическом режиме (четыре импульса гиротрона), разряд № 21 360. Параметры аналогичны представленным на рис. 2

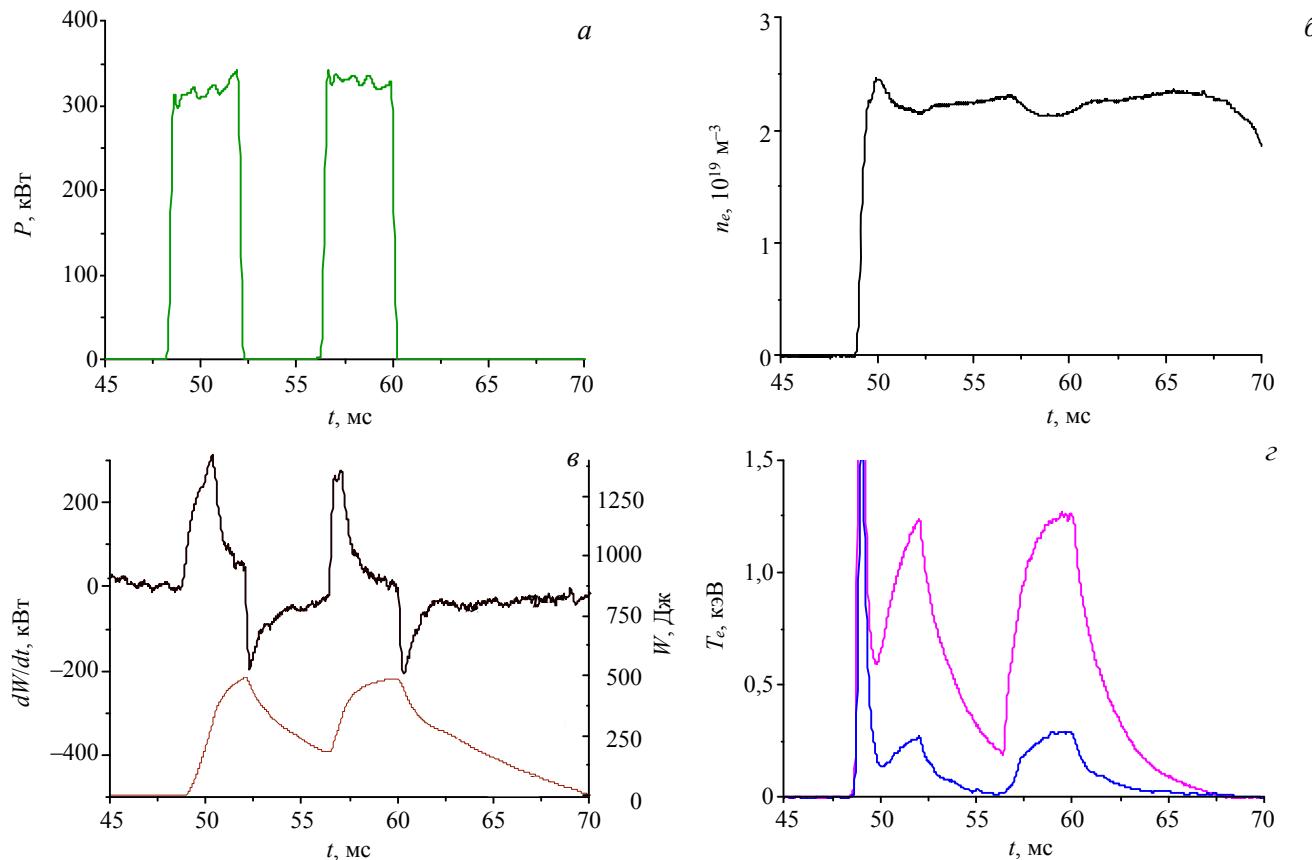


Рис. 5. Временная эволюция основных параметров разряда в импульсно-периодическом режиме (два импульса гиротрона), разряд № 21 395. Параметры аналогичны представленным на рис. 2

ние моменты времени резонансная зона смещается к внутреннему обходу тора и уменьшается эффективность поглощения СВЧ-мощности. Эффект ухудшенного поглощения хорошо виден при третьем импульсе СВЧ (температура в центре в 1,5, энергия в 2 раза меньше соответствующих значений при втором импульсе, в то время как мощность всех трёх импульсов одинакова). Во время третьего импульса продольное магнитное поля спадает от значения 1,28 до 1,23 Тл, т.е. поглощение СВЧ уже сильно отличается от оптимального режима. Исследование подобных условий ЭЦР-нагрева также представляет определённый интерес.

Импульсы СВЧ малой длительностью с достаточно продолжительными паузами между ними показаны на рис. 4. В данном случае гиротрон создаёт четыре импульса мощностью $P \sim 330$ кВт, длительностью $t_h \sim 1$ мс каждый с тремя паузами длительностью $t_p \sim 4$ мс. После первого импульса СВЧ-энергия достигает значения 50 Дж, значение температуры по сигналу ЭЦ-диагностики определить невозможно — на осциллограмме наблюдается пик, связанный с появлением надтеплового излучения. Интерпретация сигнала данной диагностики для корректного определения электронной температуры дана в статье [15]. К сожалению, на установке в настоящее время нет отдельной диагностики, позволяющей более корректно изучить характер надтеплового излучения.

В паузе температура спадает почти до нуля, плотность также резко падает, но до значения $\sim 1,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Во втором импульсе также наблюдается пик надтеплового излучения, после которого в двух последних импульсах максимальная температура достигает менее высоких значений, а средняя плотность монотонно возрастает, практически не реагируя на включение и выключение СВЧ.

Наиболее подробно исследовался последний режим с двумя импульсами СВЧ и одной паузой. Временная эволюция основных параметров разряда показана на рис. 5. Здесь гиротрон создаёт два импульса мощностью $P \sim 320$ кВт, длительностью $t_h \sim 4$ мс каждый, длительность паузы также $t_p \sim 4$ мс. Предполагалось, что первый импульс служит для ионизации и первичного нагрева плазмы, а второй — для дальнейшего нагрева готовой плазмы (по аналогии с ранее проводившимися экспериментами с двумя гиротронами) [10—12]. В данном случае наибольший интерес представляют динамика параметров при включении и выключении мощности во втором импульсе, когда энерговклад идёт в уже существующую плазму, и соответствующие переходные процессы в плазме. В связи с этим методами многохордовой рентгеновской диагностики и регистрации циклотронного излучения на второй гармонике гирочастоты (68—81 ГГц) были измерены радиальные профили электронной температуры в моменты времени, соответствующие максимуму и минимуму температуры (см. рис. 5, 2). Абсолютные значения температуры определялись методом рентгеновской спектрометрии.

На рис. 6 показаны радиальные профили электронной температуры, полученные по измерению циклотронного излучения на различных частотах и соответственно в различных точках объёма плазмы. Значения представлены для двух моментов времени, соответствующих максимуму (во время нагрева) и минимуму (во время паузы) электронной температуры. Для максимума приведены точки, полученные по данным многохордовой рентгеновской диагностики. Видно, что во время паузы краевая область шнура остывает до значения ~ 80 эВ. Полученные экспериментальные результаты можно аппроксимировать параболой (в момент максимума) или распределением Гаусса (в момент минимума).

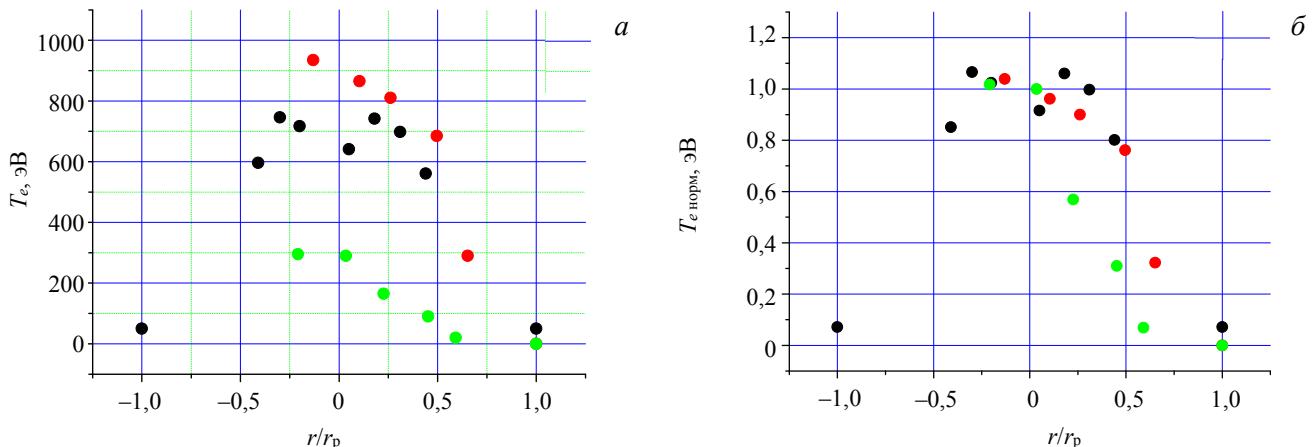


Рис. 6. Радиальный профиль электронной температуры, импульс № 21 362: *а* — абсолютные значения; *б* — нормированный профиль; ● — SXR_{макс}; ● — EC_{макс}; ● — EC_{мин}

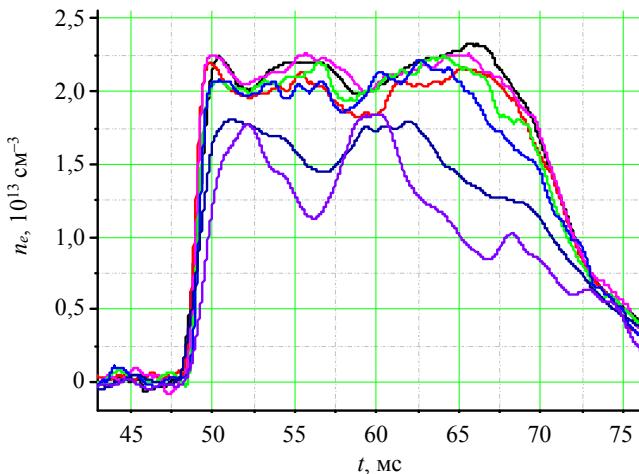


Рис. 7. Временная эволюция электронной плотности, полученная по семи хордам лазерного интерферометра: — 1, — 2, — 3, — 4, — 5, — 6, — 7

шинстве токамаков и стеллараторов и варьируется от уплощения параболического профиля [17] до наблюдаемого в стеллараторе Л-2М «провала» в центре и роста на периферии, т.е. немонотонного характера профиля, когда значение плотности на периферии двукратно превышает значение в центре, т.е. в области энерговклада. Данный эффект активно изучается и интерпретируется. Известно, что на характер профиля плотности существенно влияет значение тока (или его отсутствие), а также рециклинг. В одиночных импульсах ЭЦР на стеллараторе Л-2М форма профиля электронной плотности с ростом мощности ЭЦР-нагрева меняется от плоской (аппроксимируемой параболой 6—8-й степени) до «провальной».

Краевые эффекты в области сепаратрисы наиболее полно характеризуются сигналами, получаемыми с ленгмюровских зондов (плавающий потенциал V_f и ионный ток насыщения I_{sat}). Из этих сигналов можно оценить соответственно значение электрического потенциала плазмы в данной области и уровень его флюктуаций, а также среднее значение и флюктуации концентрации ионов. На рис. 8 показана дина-

На рис. 7 показана эволюция электронной плотности, полученная по сигналам лазерного интерферометра (семь хорд). Подробнее методика описана в [16]. Представляет интерес тот факт, что в центральной области при включении второго импульса наблюдается падение плотности, что связано, видимо, с эффектом сильного выноса частиц из центра на периферию (так называемый эффект density rimp-out). В краевой области включение СВЧ-нагрева приводит к существенному росту плотности, выключение — к падению. Также при включении импульсов нагрева наблюдается рост радиационных потерь (сигнал болометра), а также интенсивности видимого излучения (свечение линий H_α , примесей — ионизированного бора B_2 и углерода C_3).

Надо отметить, что эффект rimp-out при ЭЦР-нагреве наблюдается в том или ином виде в большинстве токамаков и стеллараторов и варьируется от уплощения параболического профиля [17] до наблюдаемого в стеллараторе Л-2М «провала» в центре и роста на периферии, т.е. немонотонного характера профиля, когда значение плотности на периферии двукратно превышает значение в центре, т.е. в области энерговклада. Данный эффект активно изучается и интерпретируется. Известно, что на характер профиля плотности существенно влияет значение тока (или его отсутствие), а также рециклинг. В одиночных импульсах ЭЦР на стеллараторе Л-2М форма профиля электронной плотности с ростом мощности ЭЦР-нагрева меняется от плоской (аппроксимируемой параболой 6—8-й степени) до «провальной».

Краевые эффекты в области сепаратрисы наиболее полно характеризуются сигналами, получаемыми с ленгмюровских зондов (плавающий потенциал V_f и ионный ток насыщения I_{sat}). Из этих сигналов можно оценить соответственно значение электрического потенциала плазмы в данной области и уровень его флюктуаций, а также среднее значение и флюктуации концентрации ионов. На рис. 8 показана дина-

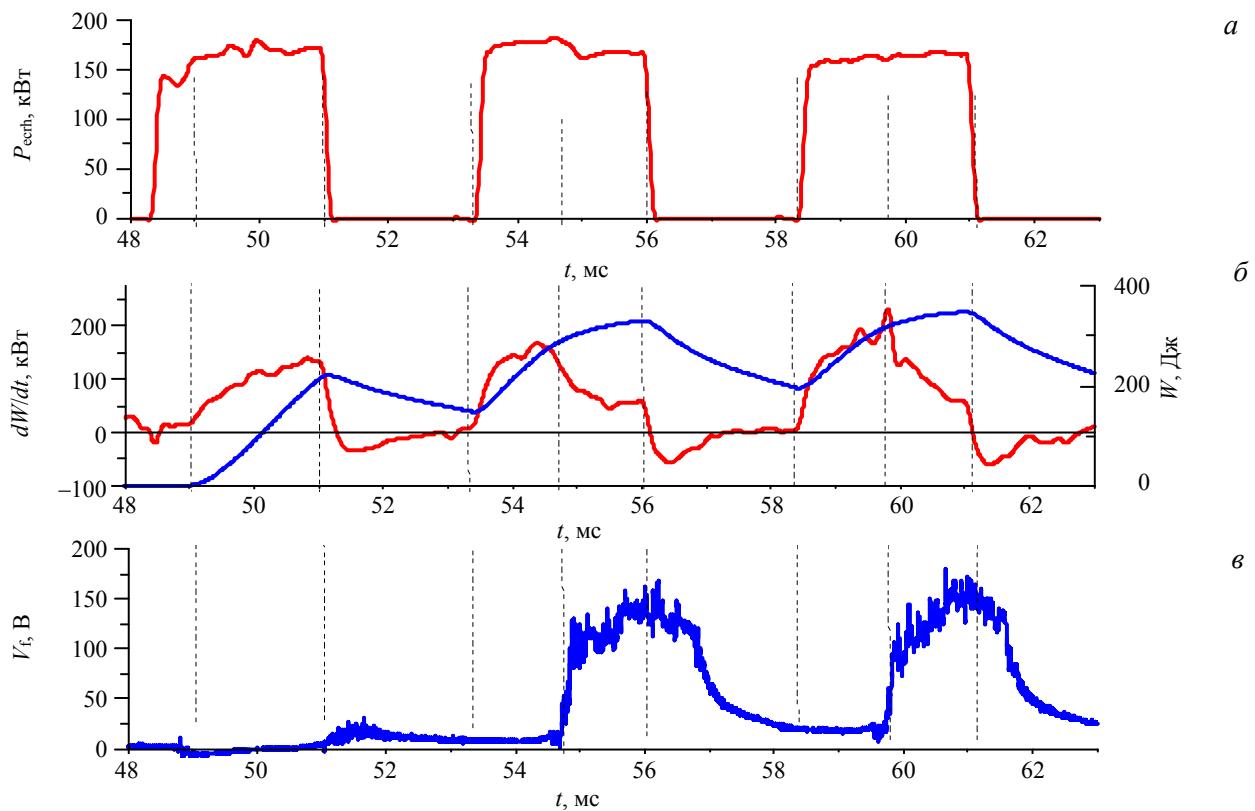


Рис. 8. Временная эволюция мощности ЭЦР-нагрева P (а), диамагнитный сигнал dW/dt и энергосодержание W (б), плавающий потенциал V_f на ленгмюровском зонде (с). Разряд № 20 276

ника плавающего потенциала в сравнении с основными макропараметрами плазмы. Сигнал получен с зонда, расположенного в верхней части камеры и вдвинутого на ~5 мм внутрь крайней магнитной поверхности. Особенностью сигналов V_f является появление в моменты времени, соответствующие сбросам dW/dt , потенциала (10—100 В), существенно превышающего фоновые значения. Интересным является тот факт, что такое поведение характерно как для одиночных импульсов, так и для каждого импульса в разряде импульсно-периодического режима, т.е. во время пауз огибающая потенциала также спадает практически до нуля.

Видно, что при первом импульсе плавающий потенциал растёт до значения порядка 20 В, после чего спадает (как и в случае одиночных СВЧ-импульсов, этот процесс совпадает по времени с резким падением сигнала dW/dt). Далее, во время паузы, значение потенциала составляет несколько вольт и сигнал не реагирует на второй СВЧ-импульс, однако при последующем сбросе его значение резко возрастает до 100—150 В. После выключения СВЧ потенциал уменьшается и с некоторой задержкой опять спадает до значения около 20 В, при дальнейшем включении СВЧ процесс повторяется. Как и в случае одиночного СВЧ-импульса, появление потенциала на краю совпадает с точкой максимума производной диамагнитного сигнала. Однако в этом случае потенциал спадает до уровня шума и снова растёт при переходном процессе второго импульса. Данный процесс совпадает по времени с падением и ростом температуры (см. рис. 6). Оценки электронной температуры по зондовым измерениям в моменты минимума дают значение порядка десятков эВ, что согласуется с значениями температуры в краевой области в момент паузы (см. рис. 6), полученными по сигналам циклотронного излучения.

Судя по всему, после СВЧ-импульса температура возрастает сначала в центре и далее увеличивается по всему радиусу до краевой области. В момент повышения температуры на краю резко растёт потенциал плазмы в этой области и растут конвективные потери, что и приводит к резкому спаду диамагнитного сигнала. Интересным является то, что кратковременный спад диамагнитного сигнала наблюдается как в режиме одиночных импульсов, так и в импульсно-периодическом режиме (в импульсах, начиная со второго), в которых энерговклад идёт уже в существующую плазму. Более подробно физические механизмы, отвечающие за данный эффект, фактически ограничивающий максимальное значение энергии плазмы, в настоящее время теоретически анализируются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стеллараторе Л-2М продемонстрирована возможность получения плазмы в импульсно-периодическом режиме в условиях электронно-циклotronного резонанса. Использовались различные режимы временной модуляции гиротронного излучения, при этом менялась длительность СВЧ-импульсов и пауз в одном плазменном разряде.

Число импульсов в разряде варьировалось от двух до пяти, длительность импульсов — от 1 до 4 мс, длительность пауз — от 2 до 6 мс, мощность гиротрона составляла 300—400 кВт. Для представленных режимов были измерены все основные макро- и микропараметры плазмы. Основное внимание уделялось изучению энергобаланса, поведению радиальных профилей электронной плотности и электронной концентрации и характеристикам пристеночной плазмы.

Обнаружено, что во время пауз температура в краевой области спадает до значений <100 эВ, при включении гиротрона снова резко возрастает на всех радиусах. Средняя плотность меняется мало, в центре наблюдается падение плотности (эффект *rim-p-out*) в момент нагрева, во время пауз профиль выполяживается. В краевой области, наоборот, во время нагрева электронная плотность растёт, что связано, по-видимому, с выносом частиц из области ЭЦ-резонанса, а также с усилением взаимодействия краевой плазмы со стенками вакуумной камеры и дополнительным поступлением водорода и примесей со стенок. Быстрое падение сигнала dW/dt , наблюдавшееся также в режимах одиночных СВЧ-импульсов, коррелирует с ростом потенциала на ленгмюровском зонде и ростом температуры на всём радиусе плазмы. Данный эффект, видимо, связан с ростом конвективных потерь в данный момент времени, причём этот механизм ограничивает рост энергосодержания плазмы и фактически определяет его максимальное значение. Подробнее особенности процессов переноса в импульсно-периодическом режиме, в том числе результаты моделирования, предполагается представить в следующих публикациях.

Авторы выражают благодарность экспериментальной группе стелларатора Л-2М и сотрудникам лаборатории «Рамус» за обеспечение проведения экспериментов и участие в них.

Работа выполнена по программе РАН «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии», а также за счёт средств проекта РФФИ № 18-02-00621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagasaki K. et al. Measurement of stray millimeter-wave radiation from a 70-GHz ECH/ECCD system in Heliotron J. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 144, p. 40—45.
2. Гребенщиков С.Е. и др. Измерение поглощаемой СВЧ-мощности при ЭЦР-нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М. — Прикладная физика, 2019, № 2, с. 5—14.
3. Itoh K. et al. Hysteresis and fast timescales in transport relations of toroidal plasmas. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 102021.
4. Moiseenko V.E. et al. A scenario of pulsed ECRH wall conditioning in hydrogen for the Wendelstein 7-X helias. — Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics, 2019, vol. 25, № 1, p. 37—40.
5. Федягин О.И. и др. Энергобаланс плазмы в стеллараторе Л-2М. — Физика плазмы, 2007, т. 33, № 10, с. 880—890.
6. Коврижных Л.М. Моделирование процессов переноса в стеллараторах. — Там же, 2006, т. 32, № 12, с. 1070—1078.
7. Батанов Г.М. и др. Потери энергии и микротурбулентность при нестационарном ЭЦ-нагреве плазмы на стеллараторе Л-2М. — Там же, 2019, т. 45, № 8, с. 685—694.
8. Abrakov V.V. et al. High power density electron cyclotron experiments in the L-2M stellarator. — Nuclear Fusion, 1997, vol. 37, p. 233.
9. Мещеряков А.И. и др. Влияние боронизации вакуумной камеры на параметры плазмы в стеллараторе Л-2М. — Физика плазмы, 2005, т. 31, № 6, с. 496—505.
10. Kharchev N.K. et al. Recent ECRH experiments in the L-2M stellarator with the use of a new high-power gyrotron. — Plasma and Fusion Research, 2011, vol. 6, p. 2402142.
11. Батанов Г.М. и др. Влияние турбулентности в переходном процессе электронно-циклотронного нагрева на стеллараторе Л-2М. — Письма в ЖЭТФ, 2015, т. 102, вып. 4, с. 245—249.
12. Батанов Г.М. и др. Транспортный переход в плазме стелларатора Л-2М: роль коротковолновой турбулентности. — Прикладная физика, 2015, № 6, с. 61—64.
13. Батанов Г.М. и др. Отражение и обратное рассеяние волн при удвоении плотности плазмы и смещении области гирорезонанса в условиях электронно-циклотронного нагрева плазмы на стеллараторе Л-2М. — Физика плазмы, 2016, т. 42, № 8, с. 707—715.
14. Сахаров А.С. и др. Численное моделирование спектров электронно-циклотронного излучения в условиях экспериментов на стеллараторе Л-2М. — Там же, 2006, т. 32, № 9, с. 794—801.
15. Князев А.В. и др. HCN-интерферометр для измерения распределения концентрации электронов в плазме стелларатора Л-2М. — Приборы и техника эксперимента, 2004, № 2, с. 105.
16. Касьянова Н.В., Андреев В.Ф. Исследования выноса частиц из центра плазмы после включения центрального ЭЦР-нагрева в токамаке Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 2, с. 73—83.



Дмитрий Григорьевич Васильков, к.ф.-м.н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия; доцент; МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская 5, Россия



Георгий Михайлович Батанов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Валентин Дмитриевич Борзосеков, к.ф.-м.н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Ильдар Юсупович Вафин, к.ф.-м.н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Станислав Евгеньевич Гребенщиков, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Ирина Анатольевна Гришина, к.ф.-м.н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Вячеслав Алексеевич Иванов, к.ф.-м.н., заведующий отделом физики плазмы; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Александр Алексеевич Летунов, к.ф.-м.н., с.н.т.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия;



Владимир Павлович Логвиненко, научный сотрудник; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия; старший преподаватель; РУДН, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая 6, Россия



Алексей Иванович Мещеряков, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Мария Николаевна Петрова, старший лаборант; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия; студент магистратуры; МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская 5, Россия



Владимир Дмитриевич Степахин, к. техн. н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Николай Константинович Харчев, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия



Юрий Викторович Хольнов, к.ф.-м.н., с.н.с.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

После доработки 7 июля 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 79—89.