

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.02, 533.9.082

**СИСТЕМА ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В
СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА**

© 2025 г. А. И. Мещеряков^{а,*}, И. А. Гришина^а, М. Е. Попов^{а,б}

^а*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Россия, 19991, Москва, ул. Вавилова, 38*

^б*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

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

Поступила в редакцию 13.02.2025 г.

После доработки 20.02.2025 г.

Принята к публикации 04.03.2025 г.

Создана двухканальная система ионного циклотронного резонансного нагрева на стеллараторе Л-2М, позволяющая вводить в плазму ВЧ-излучение мощностью 2 кВт. С помощью созданной системы была проведена предварительная ионизация плазмы, предшествующая созданию плазмы омического нагрева в стеллараторе Л-2М. В экспериментах по предварительной ионизации было продемонстрировано уменьшение напряжения на обходе непосредственно перед пробоем рабочего газа примерно на 15%. Было также продемонстрировано эффективное подавление генерации убегающих электронов при помощи ВЧ-излучения на начальной стадии формирования разряда. Об этом свидетельствует уменьшение интенсивности жесткого рентгеновского излучения в 10 раз.

1. ВВЕДЕНИЕ

На современных токамаках наметилась тенденция к использованию сверхпроводящих катушек тороидального магнитного поля для создания разрядов большой длительности. При этом необходимо размещать криостат для сверхпроводящих катушек, в том числе вблизи оси тора. Это приводит к уменьшению свободного пространства вблизи оси тора. Поэтому на многих установках, особенно на сферических токамаках и токамаках с малым аспектным отношением, проявилась проблема размещения индуктора, создающего напряжение на обходе, достаточное для пробоя рабочего газа. Поэтому на токамаках возникает

необходимость создания систем предварительной ионизации рабочего газа. Предварительная ионизация рабочего газа облегчает процесс пробоя, т. е. позволяет уменьшить величину вихревого электрического поля непосредственно перед пробоем рабочего газа. Кроме того, в разрядах без предварительной ионизации длительность начальной стадии разряда оказывается сравнительно большой и развитие разряда происходит при низкой плотности и достаточно больших напряжениях на обходе. При этом создаются благоприятные условия для развития убегающих электронов, которые выносят на стенку камеры значительную энергию и могут приводить к разрушению поверхностей вакуумной камеры и внутрикамерных конструкций, обращенных к плазме. Предварительная ионизация рабочего газа способствует уменьшению длительности начальной стадии разряда и снижению напряжения на обходе, уменьшая количество убегающих электронов. Как правило, для предварительной ионизации используется СВЧ-излучение гиротронов с частотами в диапазоне электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). В настоящей статье исследуется другой метод предварительной ионизации рабочего газа, основанный на использовании ВЧ-излучения на частоте ионного циклотронного резонанса.

Метод предварительной ионизации рабочего газа с помощью волн в диапазоне ионных циклотронных частот в настоящее время недостаточно разработан с точки зрения типов применяемых антенн и условий их фазировки и поэтому мало используется на токамаках. А метод предварительной ионизации волнами ЭЦР-диапазона разработан хорошо и поэтому, несмотря на недостатки, используется часто. В данной работе исследован новый метод, который можно предложить в качестве альтернативы для использования в строящихся установках: в первую очередь в сферических токамаках и токамаках с малым аспектным отношением со сверхпроводящими катушками. В дальнейшем предполагается найти минимально возможные мощности ВЧ-излучения, которые были бы достаточны для проведения предварительной ионизации.

Проблема предварительной ионизации рабочего газа возникла с самого начала проведения экспериментов с использованием тороидальных магнитных ловушек. Например, в работе [1] представлены результаты оптимизации режима предварительной ионизации плазмы микроволновым излучением с частотой 28 ГГц на токамаке ISX-B. Было показано, что использование предварительной ионизации позволяет значительно снизить напряжение на обходе. Особенно актуальна проблема предварительной ионизации для токамаков. На токамаках используются несколько методов проведения предварительной ионизации: ионизация волнами СВЧ- и ВЧ-диапазонов, ионизация с помощью ультрафиолетового излучения и ионизация пучками электронов.

Предварительная ионизация ультрафиолетовым излучением редко используется как единственный метод предварительной ионизации. Этот метод годится для установок небольшого размера, поскольку ионизация происходит в локальной области рабочего газа. Поскольку маломощные ионизирующие источники создают ионизацию локально, плотность образованного источником ионизованного потока может оказаться недостаточной для поддержания разряда в большом объеме.

На малоразмерном токамаке GOLEM для предварительной ионизации рабочего газа и облегчения пробоя током омического нагрева использовалась электронная пушка [2]. Пушка создавала небольшое количество электронов, которые затем ускорялись под действием напряжения на обходе и создавали электронную лавину ионизации рабочего газа. Однако возможности этого метода недостаточны для облегчения пробоя рабочего газа в крупных установках.

Самым распространенным методом предварительной ионизации рабочего газа является использование СВЧ-излучения. На токамаке HL-2A проводились исследования по облегчению условий пробоя рабочего газа при введении в камеру нижнегибридных волн с частотой 3.7 ГГц [3]. Была найдена минимальная напряженность электрического поля, при которой происходит пробой рабочего газа. При введении в плазму волн мощностью до 300 кВт в нижнегибридном диапазоне частот минимальная величина электрического поля оказалась равной 1–2 В/м.

На токамаках JET [4], JT-60 [5], DIII-D [6], NSTX [7] проводились масштабные исследования по определению минимального электрического поля, достаточного для осуществления пробоя рабочего газа волнами с частотами в диапазоне электронного циклотронного резонанса. Было установлено, что при использовании волн в электронном циклотронном диапазоне частот стабильный пробой рабочего газа можно получить при более низких электрических полях (напряженностью порядка 0.1–0.3 В/м).

Для токамаков со сверхпроводящими катушками тороидального поля существуют ограничения для создания больших напряжений на обходе (электрических полей для пробоя) в силу необходимости размещения кожуха для охлаждения сверхпроводящих катушек. На современных токамаках со сверхпроводящими катушками EAST [8] и KSTAR [9] удалось получить устойчивый пробой рабочего газа при электрических полях 0.6 В/м (в омическом режиме) и 0.3 В/м (в омическом режиме с дополнительным введением ЭЦР-волн). Для международного реактора ITER на основании расчетов ожидается, что пробой рабочего газа в режиме омического нагрева с дополнительным введением ЭЦР-волн можно будет получить при $E = 0.3$ В/м [10]. Для облегчения пробоя газа на ITER предполагается использовать гиротрон с частотой 170 ГГц (магнитное поле в ITER $B = 5.3$ Тл).

На только что вступившем в строй после реконструкции сверхпроводящем токамаке JT-60SA также планируется использовать ЭЦР-волны на второй гармонике гирочастоты электронов 110 ГГц для облегчения пробоя рабочего газа. Команда токамака провела 0-мерное моделирование старта тока в режиме омического разряда с добавлением СВЧ-излучения [11]. Расчеты показали, что для успешного пробоя газа существует порог по мощности ЭЦР-излучения. Для старта токамака JT-60SA с начальной плотностью $n_e = 3.0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ необходимо ЭЦР-излучение мощностью 150 кВт. Величина необходимой мощности возрастает при увеличении начальной плотности и концентрации примесей углерода и кислорода.

Для волн в ионном циклотронном диапазоне частот методика их использования для облегчения пробоя рабочего газа разработана слабо. На индийском токамаке ADITYA проводились эксперименты по использованию волн в ионном циклотронном диапазоне частот для предварительной ионизации [12]. Использовалась антенна, возбуждающая быстрые магнитозвуковые волны и ВЧ-генератор мощностью 200 кВт на частоте 24.8 МГц. На токамаке удалось инициировать пробой рабочего газа в отсутствие напряжения на обходе. Плазма образовывалась в промежутке между антенной и слоем, где выполнялись условия для ионного циклотронного резонанса. В экспериментах удалось осуществить предварительную ионизацию плазмы в отсутствие тока омического разряда.

В статье [13] сообщалось об использовании нерезонансной предварительной ионизации рабочего газа на стеллараторе Heliotron J. Нагрев плазмы в этих экспериментах проводился с помощью инжекции нейтрального пучка. Но перед инжекцией пучка необходимо было создать начальную плазму, для чего использовался промышленный магнетрон от микроволновой печи с частотой 2.45 ГГц и мощностью менее 20 кВт. В этих условиях поглощение СВЧ-излучения было нерезонансным. Отметим, что данный метод предварительной ионизации газа использует магнетрон из бытовой микроволновой печи, что делает данный метод предварительной ионизации достаточно дешевым и доступным для малых токамаков.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что предварительная ионизация с использованием волн ионного циклотронного диапазона частот является малоизученным методом. Перспективность этого метода состоит в том, что для его реализации можно использовать оборудование для ионного циклотронного нагрева плазмы, которое есть на многих установках. При этом требуемая для создания предварительной плазмы мощность невелика.

В настоящей статье описана система для предварительной ионизации рабочего газа в стеллараторе Л-2М с использованием волн ионного циклотронного диапазона частот и

представлены результаты первых экспериментов. В разд. 2 описана экспериментальная установка. Раздел 3 посвящен описанию созданной двухканальной системы ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. В разд. 4 приведены результаты экспериментов по предварительной ионизации плазмы в стеллараторе Л-2М, проведенные с использованием созданной двухканальной системы ионного циклотронного нагрева. В разд. 5 сформулированы основные выводы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на стеллараторе Л-2М. Это классический двухзаходный стелларатор (заходность винтовой обмотки $l = 2$, число периодов поля при обходе тора $N = 7$) с большим радиусом тора ($R = 1$ м), средним радиусом плазмы ($a = 0.115$ м) и магнитным полем $B_0 = 1.25$ Тл вблизи центра плазменного шнура [14]. Эксперименты, описанные в данной статье, проводились в режиме омического нагрева. Пробой газа осуществлялся индукционным образом с помощью трансформатора с железным сердечником. На первичную обмотку трансформатора подавался импульс, формируемый разрядом конденсаторной батареи емкостью 1200 мкф, заряженной до напряжения 2000 В. Максимально возможный магнитный поток, создаваемый индуктором стелларатора Л-2М, составляет 0.18 Вб. Вторичной обмоткой является камера стелларатора, заполненная рабочим газом. В качестве рабочего газа в данных экспериментах использовался водород. При подаче импульса напряжения на первичную обмотку на вторичной обмотке возникает индуцированное напряжение на обходе камеры. До пробоя рабочего газа напряжение на обходе составляет 30–35 В. Затем в рабочем газе возникает пробой, и создается плазма, в которой устанавливается стационарный ток 15–18 кА. Для облегчения пробоя рабочего газа используется ультрафиолетовая лампа. После пробоя напряжение на обходе уменьшается до 4–6 В.

Диагностический комплекс стелларатора Л-2М включает в себя более двадцати методов диагностики. Для измерения параметров плазмы в данном эксперименте использовались следующие методы диагностик: пояс Роговского, петля для измерения напряжения на обходе, детектор жесткого рентгеновского излучения, спектрометры для измерения линий H_α и В II. Для измерения плотности на краю плазмы использовался двойной зонд Ленгмюра. Мощность радиационных потерь измерялась абсолютно калиброванным пьезоэлектрическим болометром.

3. СИСТЕМА ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Для возбуждения быстрых магнитозвуковых волн в плазме стелларатора Л-2М была создана двухканальная система ионного циклотронного резонансного нагрева плазмы. Система состоит из задающего генератора, двух усилительных линий для подачи ВЧ-напряжения на витки антенны и двухвитковой ВЧ-антенны [15]. На каждый из витков антенны подавалось ВЧ-напряжение мощностью порядка 1 кВт и частотой 20 МГц, что соответствует ионной циклотронной резонансной частоте в центре плазменного шнура. Для питания каждого из витков антенны были изготовлены две ВЧ-линии, на которые подавался сигнал с общего генератора ВЧ-сигналов. Использовался двухканальный программируемый генератор сигналов (ГС) Juntek PSG9080. Этот ГС обеспечивал генерацию синусоидального сигнала мощностью до 50 мВт на двух независимых выходах. Также была возможность изменять разность фаз между выходными ВЧ-сигналами.

Для усиления сигналов задающего ВЧ-генератора были собраны две идентичные двухкаскадные усилительные линии (рис. 1). В первом каскаде использовался усилитель мощности У1 (производства TZT RF), обладающий коэффициентом усиления по мощности 2000 для входных сигналов мощностью от 1 мВт. Первый каскад усиливал мощность задающего генератора до 5 Вт. Второй каскад включал в себя усилитель мощности У2 (РА5 на основе MOSFET-транзисторов производства компании EB104 equipment, выходная мощность 1000 Вт, рабочий частотный диапазон 1.8–30 МГц) с коэффициентом усиления мощности до 200 для входных сигналов мощностью 5–10 Вт.

Рис. 1. Блок-схема двухканальной линии питания витков антенны для ИЦР нагрева плазмы.

Мощность излучения, подаваемого на витки антенны, определялась с помощью измерителя амплитуд падающей и отраженной волн. Измеритель амплитуд падающей и отраженной волн представляет собой участок ВЧ-фидера, внутри которого проложены два проводника, образующих две дополнительные распределенные линии [16]. Сигналы с выходов дополнительных линий пропорциональны амплитудам падающей и отраженной волн.

На результат измерения ВЧ-мощности с помощью описанного выше прибора сильное влияние оказывают гармоники, которые возбуждаются в усилительных каскадах. Поскольку вся система согласована на частоту 20 МГц, гармоники будут обладать большим коэффициентом отражения и вносить погрешности в величину амплитуд прямой и отраженной волн. Для того чтобы избежать влияния гармоник, на выходе усилительной линии был подключен пассивный фильтр нижних частот (ФНЧ) производства компании

EB104 equipment с максимальной мощностью 2400 Вт и рабочим частотным диапазоном 1.8–54 МГц. Фильтр подключался на выходе второго каскада усиления.

Для проверки работоспособности системы ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М было проведено тестирование двухканальной системы ионного циклотронного резонансного нагрева плазмы в экспериментах по предварительной ионизации плазмы в стеллараторе Л-2М.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью созданной двухканальной системы ионного циклотронного резонансного нагрева плазмы была проведена предварительная ионизация плазмы, предшествующая созданию плазмы омического нагрева. В этих экспериментах о качестве проводимой предварительной ВЧ-ионизации можно было судить, регистрируя подавление генерации убегающих электронов. В токамаках и стеллараторах в режиме омического нагрева на начальной стадии разряда плотность плазмы низкая, а напряжение на обходе высокое. В таких условиях электроны плазмы попадают в режим непрерывного ускорения в вихревом электрическом поле. Частота их столкновений с ионами плазмы мала, и они не передают приобретенную энергию ионам. В итоге они покидают плазму и, попадая на стенку камеры, вызывают генерацию жесткого рентгеновского излучения. Подавление генерации убегающих электронов детектировалось с помощью сцинтилляционного дозиметра ДРГЗ-01, который измерял интеграл по времени от интенсивности жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 20–3000 кэВ.

В экспериментах, обсуждаемых в данной статье, во время омического разряда на стеллараторе Л-2М на антенну подавались импульсы ВЧ-напряжения различной длительности. Напряжение на обходе возникало на 30 мс. За 10 мс до его возникновения включался ВЧ-импульс предварительной ионизации длительностью 10 (№ 23043) или 20 (№ 22932) мс. Эти два эксперимента различаются тем, что в импульсе № 23043 ВЧ-импульс предварительной ионизации заканчивался перед возникновением напряжения на обходе, а в импульсе № 22932 воздействие ВЧ-излучения на рабочий газ продолжалось еще 10 мс после возникновения напряжения на обходе. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры импульсов подаваемого ВЧ-излучения и характеристики разрядов

№ разряда	Время старта ВЧ-импульса, мс	Время окончания ВЧ-импульса, мс	Интегральная интенсивность жесткого рентгена, отн. ед.	Максимальное значение напряжения на обходе, В
22931	Без ВЧ-импульса	Без ВЧ-импульса	0.37	35
23043	20	30	0.14	30
22932	20	40	0.04	30

Из табл. 1 следует, что в импульсе № 22931 с предварительной ионизацией максимальная величина напряжения на обходе перед пробоем ниже, чем в импульсе без предварительной ионизации. Более подробно временной ход напряжения на обходе и плазменного тока в этих разрядах показан на рис. 2. Рисунок показывает, что уменьшение максимальной величины напряжения на обходе перед пробоем в импульсе с предварительной ионизацией сопровождается увеличением максимальной величины плазменного тока по сравнению с импульсом без предварительной ионизации. Таким образом, проведение предварительной ионизации позволило снизить напряжение на обходе перед пробоем на 10–15%. При этом целенаправленно не проводилась оптимизация условий предварительной ионизации.

Рис. 2. Динамика напряжения на обходе (кривые 1, 2) и плазменного тока (кривые 3, 4)...

Из табл. 1 также следует, что при подаче ВЧ-импульса предварительной ионизации наблюдается сильное подавление генерации рентгеновского излучения. При длительностях ВЧ-импульса 10 и 20 мс интегральная интенсивность рентгеновского излучения уменьшается в 2.5 раза и на порядок соответственно по сравнению с импульсом без предварительной ионизации.

Сравнение результатов измерений в импульсах № 23043 и № 22931 позволяет установить, что в результате воздействия ВЧ-импульса предварительной ионизации некоторая ионизация рабочего газа происходит еще до подачи напряжения на индуктор. Это следует из того, что значение интегральной интенсивности жесткого рентгеновского излучения уменьшается как минимум вдвое в течение импульса предварительной ионизации, заканчивающегося до подачи напряжения на индуктор. Возможно, происходит образование крайне разреженной плазмы во всем объеме внутри сепаратрисы магнитных поверхностей стелларатора, либо просто дополнительно ионизируется газ вблизи антенны, так как до момента времени 30 мс сигналы от используемых в эксперименте каналов диагностики, в том числе зонда Ленгмюра, отсутствовали.

Подавление генерации убегающих электронов при предварительной ионизации происходит за счет повышения плотности на начальной стадии образования плазмы. Изменение плотности на периферии плазмы контролировалось с помощью двойного зонда Ленгмюра. В этих экспериментах средняя плотность плазмы по центральной хорде составляла около 10^{13} см^{-3} . На рис. 3 показаны зависимости плотности плазмы на периферии от времени в импульсах с предварительной ионизацией (№ 22932, импульс с наибольшим подавлением жесткого рентгена) и без нее (№ 22931).

Рис.3. Временной ход напряжения на обходе в разряде № 22931 (Кривая 1)...

В эксперименте напряжение на обходе возникало в момент времени 30 мс (рис. 3, кривая 1). В разряде с ВЧ-излучением уже при $t = 31$ мс наблюдался рост электронной плотности на краю плазмы (кривая 2). В разряде без ВЧ-импульса плотность начинала расти лишь в интервале 33–34 мс (кривая 3). Рисунок показывает, что в импульсах с предварительной ионизацией ленгмюровский зонд регистрирует образование плазмы с плотностью около 10^{12} см⁻³ на 3 мс раньше, чем в импульсах без предварительной ионизации. Этот факт крайне важен, поскольку образование убегающих электронов происходит именно на начальной стадии разряда в условиях низкой плотности и высокого напряжения на обходе. Наличие плазмы в начале импульса не позволяет электронам переходить в режим постоянного ускорения из-за частых столкновений с ионами плазмы.

Более раннее образование плазмы в импульсах с предварительной ионизацией было подтверждено измерениями временной зависимости интенсивности линии H_{α} (рис. 4). На этой зависимости видно, что в импульсе с предварительной ионизацией (кривая 1) пик линии H_{α} возникает на 2–3 мс раньше, чем в импульсе без предварительной ионизации. В импульсе № 22931 без предварительной ионизации (кривая 2) в начальные моменты времени сигнал H_{α} вдвое превышает сигнал в импульсе № 22932 с предварительной ионизацией. Это объясняется тем, что вследствие недостаточной экранировки спектрометра жесткое рентгеновское излучение, проходя сквозь его корпус, попадает напрямую на детектор (ФЭУ) и создает электронную лавину. Поэтому ФЭУ регистрирует суммарный сигнал линии H_{α} и жесткого рентгеновского излучения. В импульсе с предварительной ионизацией происходит подавление генерации убегающих электронов и величина жесткого рентгеновского излучения на порядок меньше, поэтому ФЭУ регистрирует только сигнал H_{α} .

Рис. 4. Временные зависимости интенсивности линии H_{α} в разрядах с ВЧ импульсом...

С помощью болометра были также измерены временные зависимости мощности радиационных потерь в импульсах с предварительной ионизацией и без нее (рис. 5, кривые 1 и 2 соответственно). Было обнаружено, что в импульсах с предварительной ионизацией излучение плазмы регистрируется на 2–3 мс раньше, чем в импульсах без предварительной ионизации. На рис. 5 видно, что на начальной и квазистационарной стадиях формирования плазменного шнура мощность радиационных потерь, которую регистрирует болометр, в импульсе № 22932 с предварительной ионизацией выше, чем в импульсе без предварительной ионизации. Возможная причина этого заключается в том, что в импульсе с предварительной ионизацией средняя плотность плазмы выше.

Рис. 5. Зависимость мощности радиационных потерь от времени в разрядах с ВЧ импульсом

Все приведенные выше экспериментальные данные указывает на более раннее образование плазмы при проведении предварительной ионизации ВЧ-импульсом. Этот эффект носит систематический характер и имеет высокую повторяемость.

5. ВЫВОДЫ

Создана двухканальная система ионного циклотронного резонансного нагрева на стеллараторе Л-2М, позволяющая вводить в плазму ВЧ-излучение мощностью 2 кВт. С помощью созданной двухканальной системы ионного циклотронного резонансного нагрева плазмы была проведена предварительная ионизация плазмы, предшествующая созданию плазмы омического нагрева в стеллараторе Л-2М.

В экспериментах по предварительной ионизации было продемонстрировано уменьшение напряжения на обходе непосредственно перед пробоем рабочего газа на 10–15%.

В ходе экспериментов по предварительной ионизации плазмы было показано, что, несмотря на небольшую величину ВЧ-мощности, при включении ВЧ-импульса некоторая ионизация рабочего газа происходит еще до подачи напряжения на индуктор. Это следует из того, что значение интегральной интенсивности жесткого рентгеновского излучения уменьшается как минимум вдвое в течение импульса предварительной ионизации, заканчивающегося до подачи напряжения на индуктор. Возможно, происходит образование крайне разреженной плазмы во всем объеме внутри сепаратрисы магнитных поверхностей стелларатора, либо просто дополнительно ионизуется газ вблизи антенны. Образование предварительной плазмы приводит к тому, что пробой рабочего газа происходит на 2–3 мс раньше по сравнению с импульсами без предварительной ионизации. Этот факт крайне важен с точки зрения подавления генерации убегающих электронов.

В ходе экспериментов по предварительной ионизации плазмы было также продемонстрировано эффективное подавление генерации убегающих электронов при помощи ВЧ-излучения. Об этом свидетельствует уменьшение интенсивности жесткого рентгеновского излучения в 10 раз. Образование убегающих электронов происходит именно на начальной стадии разряда в условиях низкой плотности плазмы и высокого напряжения на обходе. Наличие плазмы в начале импульса не позволяет электронам переходить в режим постоянного ускорения из-за частых столкновений с ионами плазмы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания FFWF-2025-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulchar A.G., Eldridge O.C., England A.C et al.* // Phys. Fluids. 1984. V. 27. P. 1869.
<https://doi.org/10.1063/1.864799>.
2. *Саранча Г.А., Дрозд А.С., Емекеев И.А. и др.* // ВАНТ. Серия Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. № 4. С. 92. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2021-44-4-92-110>
3. *Song X., Duan X.R., Song X.M et al.* // Fusion Eng. Des. 2017. V. 125. P. 195.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.11.007>
4. *Sheffield J.* Tokamak Start-up: Problems and Scenarios Related to the Transient Phases of a Thermonuclear Fusion Reactor / Ed. by H. Knoepfel. Berlin: Springer, 1986. P. 7.
https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1889-8_2
5. *Yoshino R., Seki M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39. P. 205.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/39/1/012>
6. *Lloyd B.T., Jackson G., Taylor T., Lazarus E., Luce T., Prater R.* // Nucl. Fusion. 1991. V. 31. P. 2031. <http://doi.org/10.1088/0029-5515/31/11/001>
7. *Menard J.E., LeBlanc B., Sabbagh S. et al.* // Nucl. Fusion. 2001. V. 41, P. 1197.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/9/308>
8. *Leuer J.A., Xiao B.J., Humphreys D.A. et al.* // Fusion Sci. Technol. 2010. V. 57. P. 48.
<https://doi.org/10.13182/FST10-A9268>
9. *Leuer J.A., Eidietis N.W., Ferron J.R. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 333.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2037890>
10. *Ikeda K.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. E01. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/E01>
11. *Hada K., Nagasaki K., Masuda K., Kinjo R., Ide S., Isayama A.* // Plasma Fusion Res. 2012. V. 7. P. 2403104. <https://doi.org/10.1585/pfr.7.2403104>
12. *Kulkarni S.V., Mishra K., Kumar S. et al.* // Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference (FEC-2012), San Diego, 2012. V. EX/P2-17. P. 91.
13. *Kobayashi S., Nagasaki K., Hada K. et al.* // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. P. 116009.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2105>
14. *Мещеряков А.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М. и др.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 496.
15. *Meshcheryakov A.I., Grishina I.A., Vafin I.Yu.* // Plasma Phys. Rep. 2022. V. 48. P. 1051. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063780X22600438>
16. *Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю.* // ПТЭ. 2022. № 5. С. 88.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222050287>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Блок-схема двухканальной линии питания витков антенны для нагрева ИЦР-плазмы: ГС – генератор ВЧ-напряжения, У1 – первый каскад усиления мощности ГС, У2 – второй каскад усиления мощности ГС, ФНЧ – фильтры низкой частоты.
- Рис. 2.** Динамика напряжения на обходе (кривые 1, 2) и плазменного тока (кривые 3, 4) в разрядах с ВЧ-импульсом предварительной ионизации (кривые 1, 3) и без него (кривые 2, 4).
- Рис.3.** Временной ход напряжения на обходе в разряде № 22931 (кривая 1). Временные зависимости электронной плотности на периферии в разрядах с ВЧ-импульсом предварительной ионизации (кривая 2) и без него (кривая 3).
- Рис. 4.** Временные зависимости интенсивности линии H_{α} в разрядах с ВЧ-импульсом предварительной ионизации (кривая 1) и без него (кривая 2).
- Рис. 5.** Зависимость мощности радиационных потерь от времени в разрядах с ВЧ-импульсом предварительной ионизации (кривая 1) и без него (кривая 2).

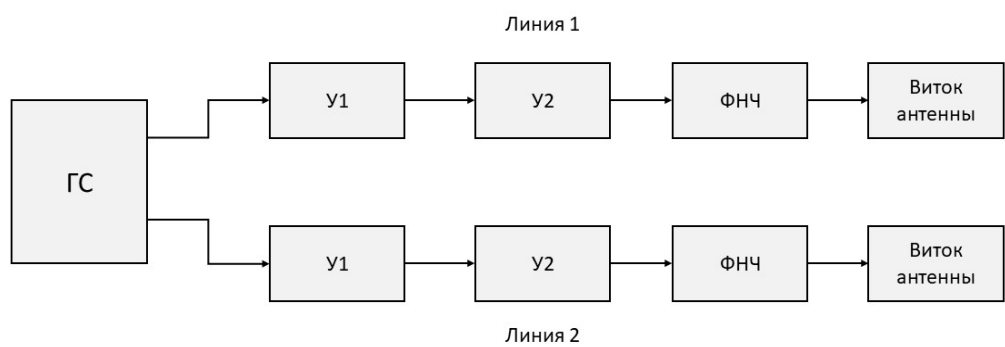


Рис. 1.

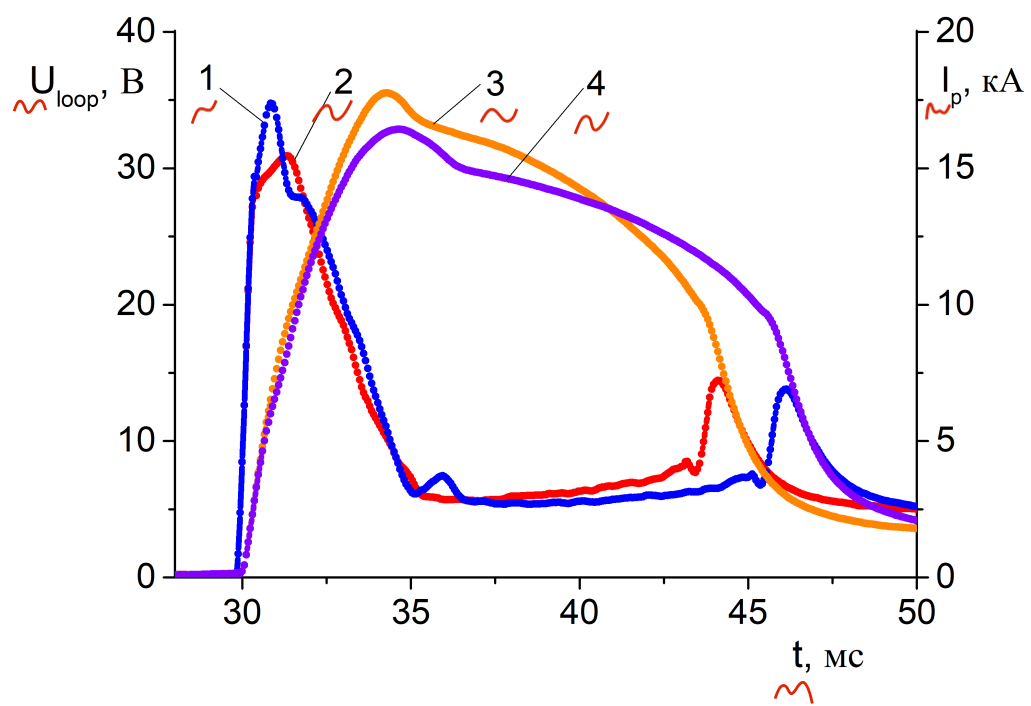


Рис. 2.

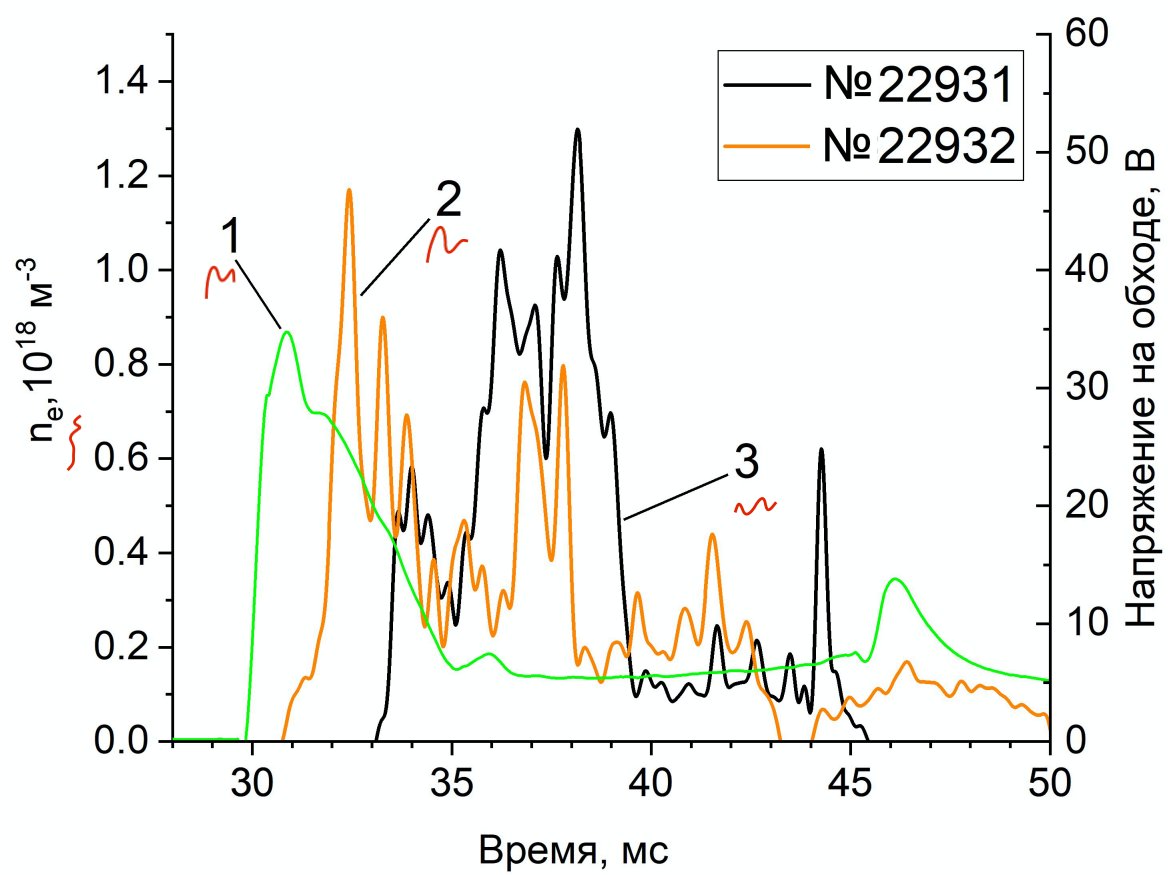


Рис. 3.

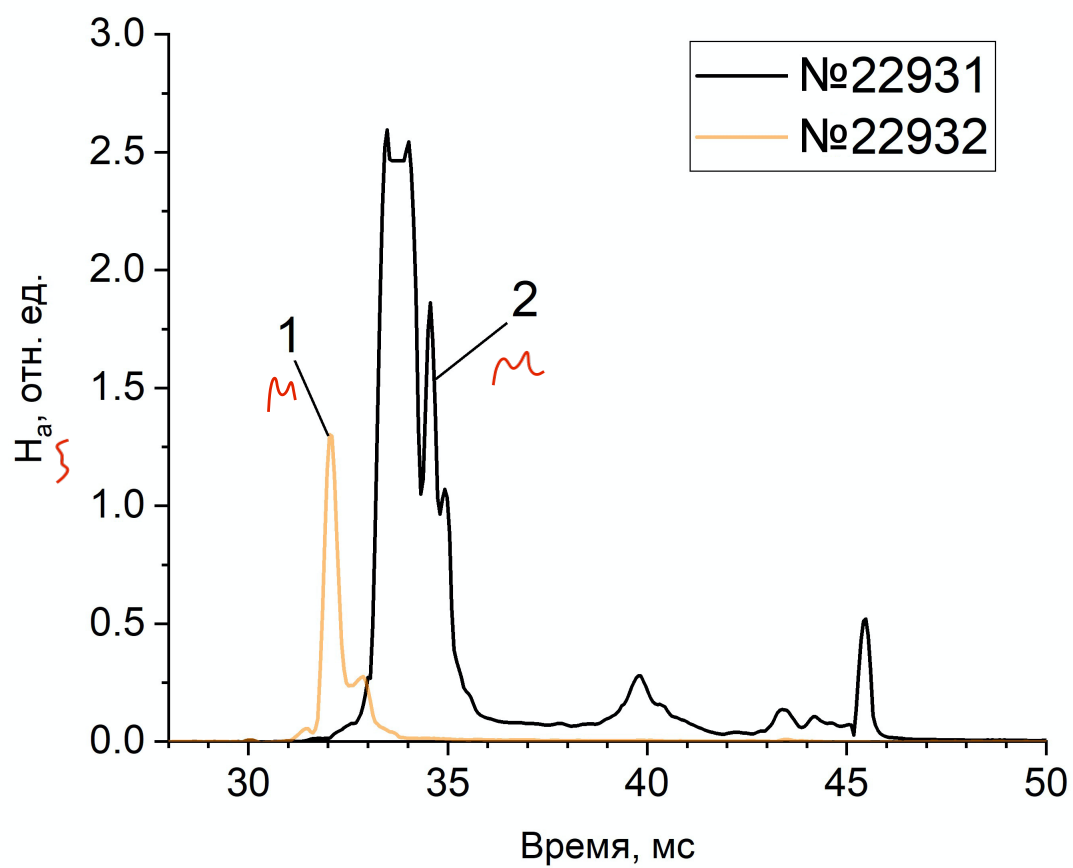


Рис. 4.

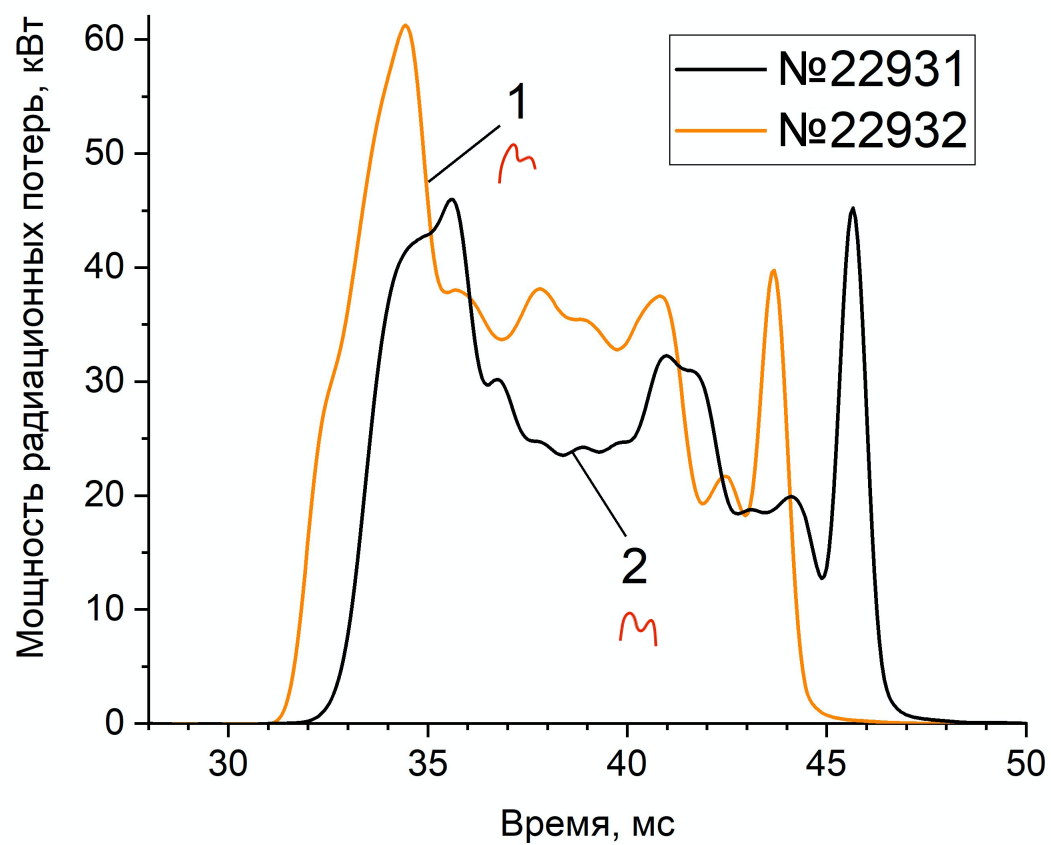


Рис. 5.