

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДРАЙВЕРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ЭКРАНАМИ ДЛЯ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ С МНОГОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА

© 2023 г. Д. Ю. Гаврисенко^{а,*}, И. В. Шиховцев^а, Ю. И. Бельченко^а, А. И. Горбовский^а, А. А. Кондаков^а, О. З. Сотников^а, А. Л. Санин^а, В. А. Воинцев^а, Р. А. Финашин^а

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: d.gavrisenko@g.nsu.ru

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 20.07.2023 г.

Инжекция атомарных пучков является одним из основных способов нагрева плазмы в термоядерных установках. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывается инжектор пучка атомов водорода высокой энергии для нагрева плазмы, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода. В инжекторе используется высокочастотный поверхностно-плазменный источник, в котором поток плазмы создается с помощью высокочастотного драйвера – индукционного высокочастотного (ВЧ) разряда, поджигаемого внутри цилиндрической керамической камеры при подаче ВЧ-напряжения на внешнюю трехвитковую антенну. В рамках этих работ разрабатывается новая версия высокочастотного драйвера. Для предотвращения перегрева и эрозии керамической стенки драйвера используется защитный экран. Исследуется работа нескольких конфигураций ВЧ-драйвера с разными защитными экранами. Предложенные экраны в разной степени уменьшают эффективность передачи ВЧ-мощности в разряд, но при этом позволяют реализовать работу ионного источника в многосекундных или стационарных импульсах.

Ключевые слова: атомарные пучки отрицательных ионов водорода, высокочастотный драйвер, ВЧ-антенна, защитный экран, ионный источник многосекундной длительности импульса

DOI: 10.31857/S0367292123600929, EDN: ENFUJL

1. ВВЕДЕНИЕ

Инжекторы быстрых атомов широко используются в крупных термоядерных установках для нагрева и диагностики плазмы. Инжекторы, разработанные в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ), успешно используются на различных установках с магнитным удержанием плазмы [1, 2]. Пучки высокоэнергетичных атомов получают в результате ускорения положительных или отрицательных ионов и их последующей нейтрализации в специальной мишени. Для современных термоядерных установок требуются мощные инжекторы, способные работать с пучками длительностью более десяти секунд.

Одним из основных элементов источника ионов является генератор плазмы. Для генерации плазмы при большой длительности импульса перспективно использовать высокочастотные (ВЧ) драйверы на основе индукционного разряда, создаваемого в керамической камере с помо-

щью внешней антенны [2]. Такие источники успешно работают в инжекторах атомарных пучков с многосекундной продолжительностью импульсов [3–7]. Для увеличения длительности работы генератора плазмы внутрь ВЧ-драйвера устанавливается специальный защитный экран, который обеспечивает защиту керамики от эрозии плазмой и напыления металла. Однако, защитный экран снижает эффективность генерации плазмы и производительность источника ионов. Работы, направленные на увеличение эффективности генерации плазмы в ВЧ-драйвере, ведутся также в зарубежных научных центрах [8–10].

В рамках работ над прототипом инжектора высокоэнергетичных атомов с энергией пучка до 500 кэВ в ИЯФ разрабатывается ВЧ поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода с током пучка до 1.5 А и энергией до 120 кэВ при длительности импульса до 20 с. Для обеспечения требуемого тока пучка плотность потока положительных ионов в плазме на выходе

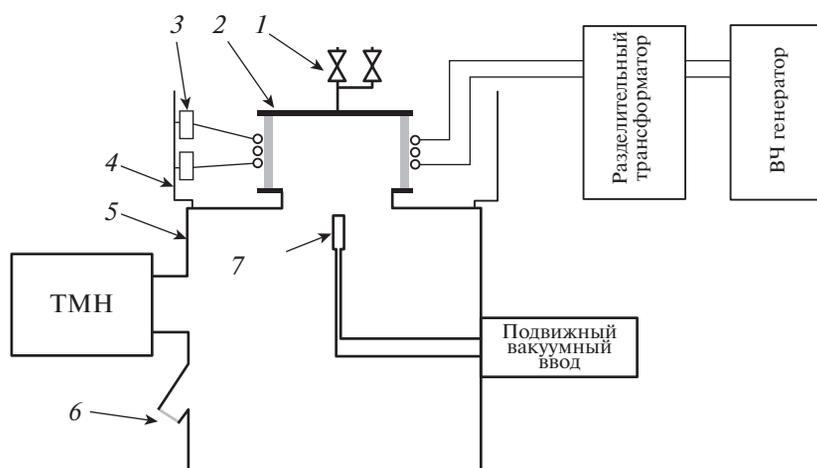


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – система подачи газа с двумя клапанами, 2 – ВЧ-драйвер, 3 – конденсаторы резонансного контура, 4 – внешний цилиндрический экран, 5 – вакуумный объем, 6 – окно с видом на защитный экран ВЧ-драйвера, 7 – сеточный зонд для измерения плотности ионного тока.

ВЧ-драйвера диаметром 200 мм должна составлять $\sim 400 \text{ mA/cm}^2$.

Целью данной работы является анализ и сравнение ВЧ-драйверов с различными защитными экранами и ВЧ-антеннами.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследование режимов работы различных ВЧ-драйверов и измерение их параметров проводилось на экспериментальном стенде, состоящем из цилиндрического вакуумного объема, к торцевому фланцу которого пристыковывался исследуемый ВЧ-драйвер (рис. 1). Стенд откачивается турбомолекулярным насосом и оборудован системой подачи водорода, мощной системой ВЧ-питания и необходимым набором диагностик.

Базовая конструкция высокочастотного плазменного драйвера

Схема ВЧ-драйвера представлена на рис. 2а. Камера драйвера представляет собой керамический цилиндр (Al_2O_3) с внутренним диаметром 200 мм, длиной 111 мм и толщиной стенки 7 мм, зажатый с торцов задним и передним фланцами. Уплотнение керамики осуществляется на краях внешней цилиндрической поверхности при помощи витоновых колец. Они расположены вплотную к керамике, в специальном углублении в заднем (рис. 2а-4) и переднем (рис. 2а-11) фланцах. Уплотнение происходит за счет деформации витоновых колец, которые зажимаются стальными кольцами (рис. 2а-6 и рис. 2а-10). Между керамическим цилиндром (рис. 2а-8) и фланцами

(рис. 2а-4 и рис. 2а-11) проложены тонкие медные кольца для улучшения теплового контакта.

Снаружи на керамический цилиндр намотана 3-витковая антенна для создания переменного электромагнитного поля внутри объема. Антенна изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм, на которую снаружи надета диэлектрическая термоусаживаемая оболочка. Для охлаждения антенны через нее протекает дистиллированная вода. Крепление антенны фиксируется посередине керамического цилиндра и позволяет изменять расстояние между витками и положение антенны. Схема расположения витков антенны представлена на рис. 2б. В экспериментах исследовались 4 конфигурации антенны: широкая (рис. 2б-1), низкая (рис. 2б-2), узкая без ферритов и с применением ферритов (рис. 2б-3). Ферритовые полукольца изготовлены из разрезанных пополам сердечников М200ВНП-3 К65х40х9. Шестнадцать таких полуколец устанавливались равномерно по азимуту снаружи антенны.

В центре верхнего фланца установлен узел поджига, который необходим для создания затравочных электронов, инициирующих зажигание ВЧ-разряда. Он имеет канал напуска газа с электрически изолированным электродом в центре. Для подачи газа использовались два электромагнитных клапана с разными диафрагмами, поджиговой – для создания условий зажигания разряда и рабочий – для поддержания разряда.

На заднем фланце располагаются постоянные магниты, которые создают мультипольную структуру магнитного поля вблизи задней стенки. Магнитное поле помогает увеличить эффективность разряда и уменьшить поток плазмы на заднюю стенку.

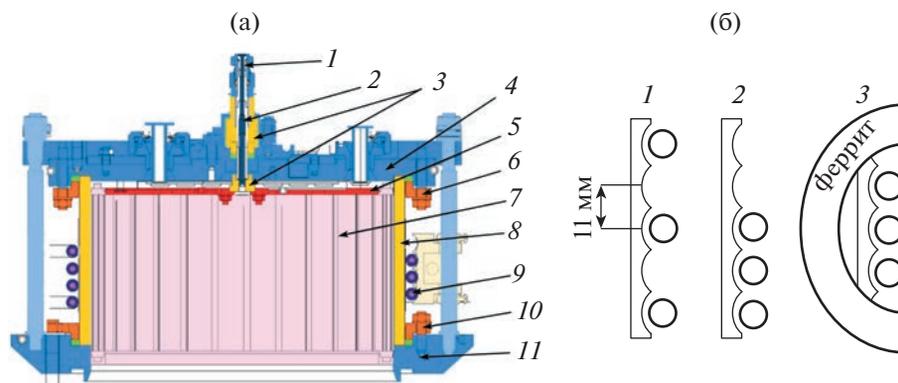


Рис. 2. а) Схема ВЧ-драйвера: 1 – дозатор водорода, 2 – канал напуска водорода, 3 – изоляторы узла поджига, 4 – задний фланец, 5 – экран заднего фланца, 6 – верхнее уплотнительное кольцо, 7 – защитный экран, 8 – керамика Al_2O_3 , 9 – трехвитковая антенна, 10 – нижнее уплотнительное кольцо, 11 – передний фланец, б) варианты размещения наружной антенны в конфигурациях: 1 – широкая, 2 – низкая (пододвинутая на одно деление ближе к переднему фланцу), 3 – узкая с ферритами.

Для работы ВЧ-драйвера в режимах с большой мощностью и длительностью импульсов его основные компоненты (защитный экран, антенна, узел поджига, торцевые фланцы) охлаждаются за счет прокачки дистиллированной воды. Остальные элементы охлаждаются в результате отвода тепла через прижимные контакты и снаружи за счет конвекции воздуха. Основными источниками нагрева элементов ВЧ-драйвера являются потоки плазмы на стенки, омические потери в ВЧ-антенне и нагрев вихревыми токами, возбуждаемыми ВЧ-полем в защитном экране, торцевых и уплотнительных фланцах.

Сценарий работы драйвера следующий. Сначала в камеру через поджиговой клапан подается газообразный водород. При этом создается необходимое для зажигания разряда давление около 1–2 Па. Затем подается ВЧ-напряжение на антенну, а на стержень узла поджига подается короткий (длительностью несколько мкс) импульс напряжением около 3 кВ. По внутренней поверхности керамического изолятора поджига генерируется искра, плазма которой попадает в плазменную камеру и поджигает ВЧ-разряд. После загорания разряда поджиговой клапан закрывается и открывается рабочий, который поддерживает в течение действия ВЧ-импульса необходимое пониженное давление водорода 0.3–0.6 Па.

Варианты защитных экранов

В импульсах с большой длительностью внутрь керамической камеры ВЧ-драйвера устанавливается щелевой защитный экран. Это помогает снизить тепловую нагрузку на керамику, предотвратить распыление керамики быстрыми частицами плазмы, уменьшить напыление металла. Продольные щели в экране позволяют индукционно-

му ВЧ-полю антенны проникать внутрь газоразрядной камеры. В эксперименте использовались два типа экранов: с активным охлаждением и пассивным охлаждением. Экран с пассивным охлаждением передает тепло за счет механического контакта экрана с фланцами или другими охлаждаемыми элементами [1]. Для активного охлаждения защитного экрана в нем изготавливаются каналы охлаждения с выводами для подачи дистиллированной воды, проходящими через задний фланец ВЧ-драйвера.

Тонкий экран состоит из молибденовых пластинок толщиной 1 мм, на торцах прикрепленных к охлаждаемым медным кольцам. В охлаждающие каналы колец по трубкам, проходящим через задний фланец ВЧ-драйвера, подается дистиллят. Соединение пластинок с кольцами обеспечивается винтами. Щели между пластинками экрана составляют 20% площади внутренней поверхности экрана.

Паяный экран состоит из двух нержавеющей колец и Z-образных ламелей, которые представляют собой нержавеющую трубку диаметром 6 мм сплюснутую до толщины 4 мм с припаянными двумя молибденовыми пластинами толщиной 0.5 мм. Схема экрана представлена на рис. 3. Расстояние между соседними пластинами 4.5 мм. Трубки сварены в коллекторы диаметром 6 мм. Канал охлаждения образует змейку, проходящую через жалюзи. В экране имеется два канала для каждой половины, с выводами через задний фланец ВЧ-драйвера. Общая толщина боковой стенки экрана 5 мм.

Экран с формованными щелями представляет собой медный экран с z-образными щелями и внутренними каналами охлаждения. Разработан в Институте физики плазмы (г. Хэфэй, Китай) [10] и изготовлен методом диффузионной сварки

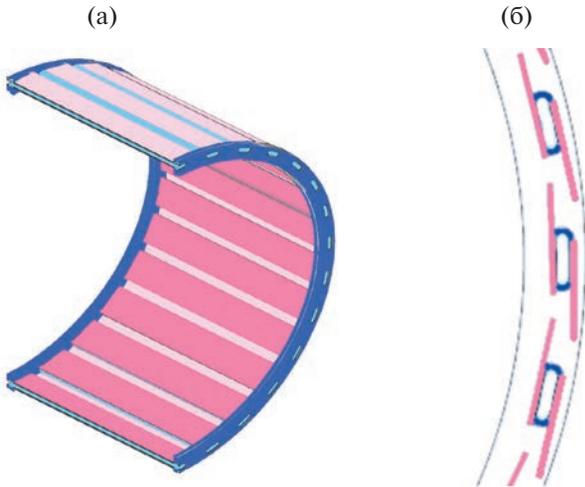


Рис. 3. Молибденовый экран с z-образными щелями. а) 3D-схема экрана, б) поперечное сечение экрана.

на китайском предприятии (Hefei Keye Electrical Physical Equipment Manufacturing Co., Ltd). Общая толщина боковой стенки экрана составляет 6 мм.

Схемы подключения ВЧ-напряжения к антенне

Эквивалентная схема подачи напряжения на антенну показана на рис. 4. Напряжение 3–9 кВ и частотой $f \approx 4$ МГц подается от генератора, созданного на основе мощного тетрода Е1мас 4СW50,000Е, через разделительный трансформатор на антенну ВЧ-драйвера с коэффициентом передачи 1 : 1. При непосредственном подключении антенны к такому трансформатору невозможно получить оптимальное согласование генератора с нагрузкой, которая представляет собой ВЧ-драйвер с плазмой. Также для работы драйвера, как правило, требуется напряжение на антенне, большее, чем напряжение на аноде лампы ВЧ-генератора.

Для увеличения полного напряжения на антенне подключение ВЧ-генератора осуществлялось по схеме, известной в радиотехнике как контур второго вида или индуктивная трехточка. Для реализации схемы на антенне было сделано 2 отвода, к которым подключался генератор. Вариант согласования с частичным включением антенны показан на рис. 5. В реализованной схеме подключения, более подробно описанной в [11], на концах антенны формируется более высокое напряжение, чем подводится от генератора, из-за эффектов резонансного усиления. Векторные диаграммы, поясняющие работу антенны при резонансе, приведены справа на рис. 5. Для приведенных схем на рис. 4 и 5: L_a , C_1 , R_H — индуктив-

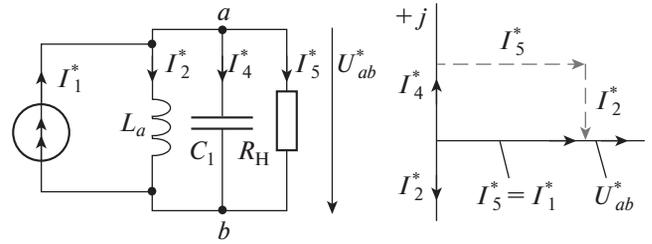


Рис. 4. Схема подключения ВЧ-генератора к резонансному контуру ВЧ-драйвера. Справа приведены векторные диаграммы токов и напряжений при параллельном резонансе.

ность, емкость и активная нагрузка, I_1, I_2, \dots, I_n — токи в ветвях.

После анализа схем по правилам Кирхгофа аналитически найдены напряжения на нагрузке $U_{ab} = I_5 R_H$ и на нижнем плече $U_{cb} = I_2 \rho \omega L_a$ индуктивности антенны, где $\omega = 2\pi f$. Отношение входного напряжения источника и напряжения на нагрузке U_{ab}/U_{cb} определяется как:

$$\frac{U_{ab}}{U_{cb}} = \frac{I_5 R_H}{I_2 \rho \omega L_a} = \frac{1}{p},$$

$$U_{ab} = I_5 R_H = \frac{I_1 p}{X_{La}^{-1} + X_{C1}^{-1} + R_H^{-1}},$$

где X_{La}, X_{C1}, R_H — индуктивное, реактивное, активное сопротивление.

Отношение напряжения на антенне и выходного напряжения ВЧ-генератора пропорционально отношению индуктивности плеч антенны в месте подключения генератора $1/p$. Коэффициент включения p верхнего L_u и нижнего L_d плеч антенны равен $p = L_d/(L_d + L_u)$.

При появлении в резонансном контуре индуктивности L_u в верхнем плече (са) происходит сдвиг фаз напряжений U_{ca} и U_{cb} относительно точки (с), результирующая разность потенциалов между (ab) при этом увеличивается [12, 13]. Ток, потребляемый с генератора и ток в нагрузке (R_H) активный. При резонансной настройке и коэффициенте включения $p \sim 1$ (малая индуктивность L_u) напряжение U_{ca} и U_{ab} уменьшаются, фазный угол между векторами U_{cb} и I_1 уменьшается, модуль вектора I_5 увеличивается, и в пределе схема стремится к случаю, представленному на рис. 4.

Диагностики на экспериментальном стенде

Сеточный зонд использовался для измерения плотности ионного тока. Он прикреплен к штоку шагового двигателя и находится на выходе плазменного эмиттера. Зонд имеет два электрода с отверстиями, перекрытыми сетками, и коллектор,

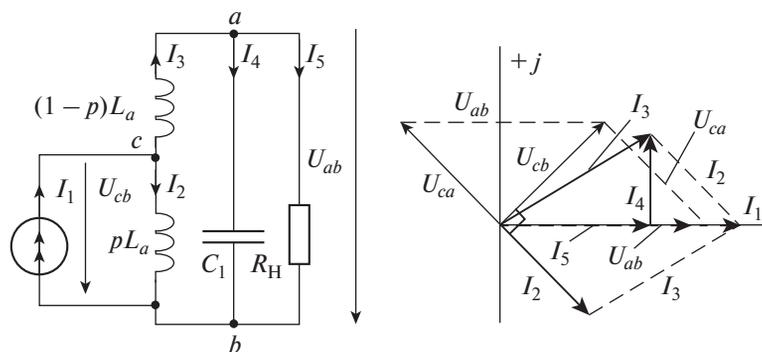


Рис. 5. Схема подключения ВЧ-генератора к резонансному контуру ВЧ-драйвера с использованием частичного включения. Справа приведены векторные диаграммы токов и напряжений при параллельном резонансе с частичным включением.

принимающий ионы, как это показано на рис. 6. При подаче напряжения между сеточными электродами формируется плоская плазменная граница, с поверхности которой вытягиваются положительные ионы. Площадь отверстия зонда с учетом прозрачности сеток составляет 1.3 мм^2 . Коллектор находится под потенциалом -2.5 кВ относительно внешней сетки и принимает вытянутые и ускоренные ионы из газоразрядной камеры. Установленная перед коллектором сетка с потенциалом -2.8 кВ является запирающей для вторичных электронов, образовавшихся на коллекторе с потенциалом -2.5 кВ . Зонд находился на 10 мм дальше от уровня стыковочного фланца ВЧ-драйвера (позиция 7 на рис. 1).

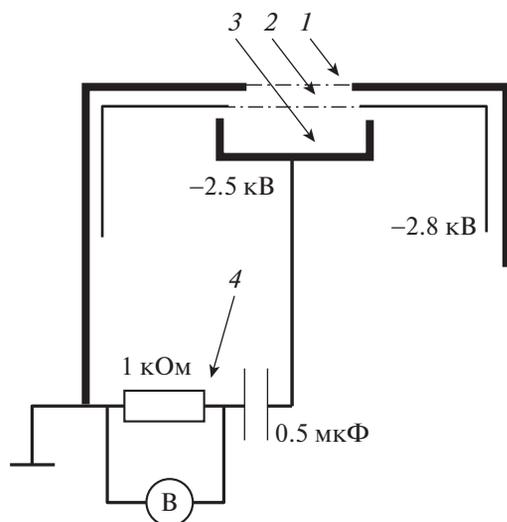


Рис. 6. Схема сеточного зонда для измерения плотности ионного тока: 1 – внешний экран с входным отверстием, 2 – электрод, ускоряющий ионы из плазмы и запирающий вторичные электроны, выходящие с коллектора, 3 – коллектор, 4 – измерительное сопротивление.

Измерение температур элементов и мощности охлаждения. Стенд имеет водяное охлаждение элементов ВЧ-драйвера: антенны, нижнего и верхнего фланца, узла поджига. Каналы охлаждения этих элементов соединены параллельно и запитываются с помощью входного и выходного коллекторов. Охлаждение защитного экрана осуществляется отдельно. На каналах охлаждения элементов ВЧ-драйвера и защитного экрана стоят измерители потока и температуры воды.

Для измерения температуры элементов ВЧ-драйвера был использован тепловизор FLIR T650. Это также позволило измерить температуру элементов ВЧ-драйвера и защитного экрана через окно из фторида бария в вакуумной камере сразу после плазменных импульсов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены следующие эксперименты: в режиме коротких импульсов измерялась плотность тока на сеточном зонде в зависимости от ВЧ-мощности. В длинных импульсах исследовались тепловые нагрузки на ВЧ-драйвер с помощью калориметрических измерений. Сеточный зонд нагревается плазмой разряда и поэтому измерения можно проводить в миллисекундных импульсах. Измерения плотности ионного тока проводились в коротких импульсах длительностью 50 мс . В этом случае давление газа в газоразрядной камере определяется поджиговым клапаном и составляет $1\text{--}2 \text{ Па}$.

В экспериментах по анализу тепловых нагрузок длительность импульсов ВЧ-разряда была увеличена до 30 сек и использовалась конфигурация ВЧ-драйвера с широкой антенной. В начальный момент времени работа ВЧ-драйвера аналогична работе в коротких импульсах. После зажигания разряда подача газа осуществлялась через второй рабочий клапан. В газоразрядной камере устанавливалось давление $0.3\text{--}0.6 \text{ Па}$. Из-за из-

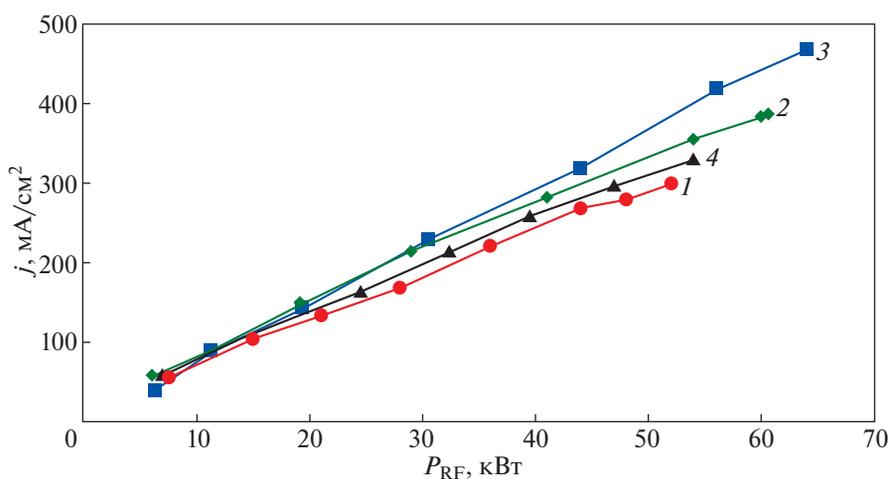


Рис. 7. Плотность тока положительных ионов на зонд j в зависимости от мощности ВЧ-генератора P_{RF} для ВЧ-драйвера с тонким экраном: 1 – с широкой антенной, показанной рис. 26-1, 2 – с узкой антенной и ферритами, показанной на рис. 26-3, 3 – с узкой антенной, показанной на рис. 26-3 без ферритов, 4 – с низкой антенной, показанной на рис. 26-2.

менения давления в ВЧ-драйвере в течение импульса плазменная нагрузка, с которой взаимодействует ВЧ-генератор, так же изменялась.

Измерения характеристик драйвера с тонким экраном

Плотность ионного тока на зонд. Результаты измерений плотности ионного тока на зонд представлены на рис. 7. В эксперименте были исследованы 4 конфигурации антенны. Зависимости плотности ионного тока плазмы от ВЧ-мощности имеют линейные тренды. Максимальная плотность ионного тока составила 470 мА/см^2 при ВЧ-мощности 64 кВт и амплитудном напряжении на антенне 10.8 кВ с узкой конфигурацией антенны. Применение ферритов не дало преимущества перед узкой антенной.

Тепловые нагрузки. Результаты испытаний генератора в режиме длинных импульсов показали, что защитный экран обеспечивает необходимую защиту керамики – эрозии керамики не наблюдалось, но часть молибденовых пластин расслоилась. Временная зависимость подаваемой и отводимых ВЧ-мощностей представлена на рис. 8. В данном импульсе достигнута ВЧ-мощность 32 кВт при ВЧ-напряжении на антенне 10.2 кВ. Характерное время установления отводимой мощности составило около 15 с. За это время отводимая мощность быстро нарастает, после чего темп роста спадает. Чтобы оценить мощность, которая уходит в индукционный нагрев элементов драйвера, был произведен импульс с таким же напряжением, но без зажигания плазмы. ВЧ-мощность, затраченная в этом случае, соответствует

потерям и составляет 13 кВт. Следовательно, вложенная в плазму мощность составляет 19 кВт, что соответствует оценочной эффективности $19/32 = 59\%$. Также из зависимости рис. 8 видно, что мощность, вкладываемая в элементы ВЧ-драйвера: нижний и верхний фланцы, узел поджига и антенна с плазмой и без плазмы практически одинакова, а основная часть тепловых нагрузок приходится на защитный экран.

Отдельно были измерены температуры поверхностей ВЧ-драйвера и экрана. Результаты представлены на рис. 9 и 10. Максимальная температура экрана достигается в середине молибденовой пластины 3 (рис. 10) и составляет 350°C . Причиной неоднородности температуры является расслоение молибдена на некоторых пластинах. Внутри источника на фотографии, полученной с помощью тепловизора, видна трубка охлаждения 1 (рис. 10), которая может перекрывать часть азимутального тока в плазме и приводить к потерям. Но существенного снижения эффективности не зарегистрировано. Снаружи видно, что больше всего греется антенна и объекты, расположенные близко к ней: гайки прижимных колец 3 (рис. 9), прижимные кольца и шпильки. Температура керамики составляла 50°C .

Измерения характеристик драйвера с паяным экраном

Плотность ионного тока на зонд. С паяным экраном проведены эксперименты, аналогичные описанным выше. Исследование работы ВЧ-драйвера с паяным экраном было проведено в [14]. Зависимости плотности тока от мощности пред-

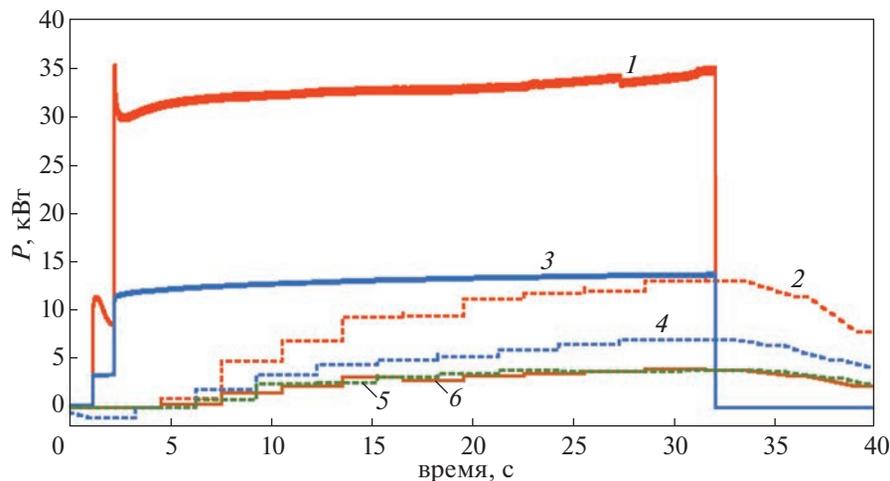


Рис. 8. Осциллограммы мощностей, подаваемых с ВЧ-генератора (1 – с ВЧ-разрядом, 3 – без ВЧ-разряда), и мощностей, уносимых водой с элементов (2 – с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ-разрядом, 4 – с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ-разряда, 5, 6 – с антенны, узла поджига, заднего и переднего фланцев с ВЧ-разрядом и без него для ВЧ-драйвера с тонким экраном).

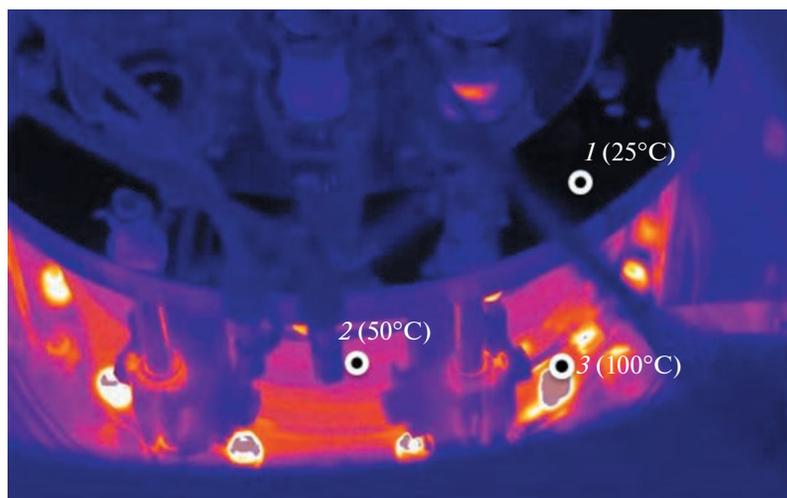


Рис. 9. Нагрев элементов драйвера с тонким экраном к концу импульса 33 кВт, 30 с (измерения тепловизором): 1 – задний фланец, 2 – середина керамического цилиндра, 3 – гайка нижнего уплотнительного кольца.

ставлены на рис. 11. Максимальный ток был получен с широкой антенной и составил 248 мА/см^2 при ВЧ-мощности 55 кВт и напряжении на антенне 10.4 кВ. Наибольшая эффективность достигнута в конфигурации с применением ферритов. Это может быть связано с тем, что ферриты помогают сконцентрировать поле внутри антенны. При этом возрастает индуктивность антенны, и для сохранения вкладываемой мощности требуется увеличивать ВЧ-напряжение на антенне. Конфигурация с низкой антенной имеет повышенную эффективность. Это может быть объяснено тем, что антенна в этом случае располагается дальше от задней стенки экрана ВЧ-драйвера. Из-за этого наведенные токи в экране становятся

меньше, и связанные с нагревом потери уменьшаются.

Тепловые нагрузки. Результаты испытаний драйвера в режиме длинных импульсов показали, что защитный экран обеспечивает необходимую защиту керамики. Видимых деформаций экрана, эрозии или запыления керамики не наблюдалось. Временная зависимость подаваемых и отводимых ВЧ-мощностей представлена на рис. 12. В данном импульсе достигнута мощность 26 кВт при напряжении на антенне 8.5 кВ с широкой конфигурацией антенны. Без плазмы мощность составила 11 кВт, что характеризует мощность потерь. Это соответствует оценочной эффективности 58%. Аналогично предыдущему экрану, мощность

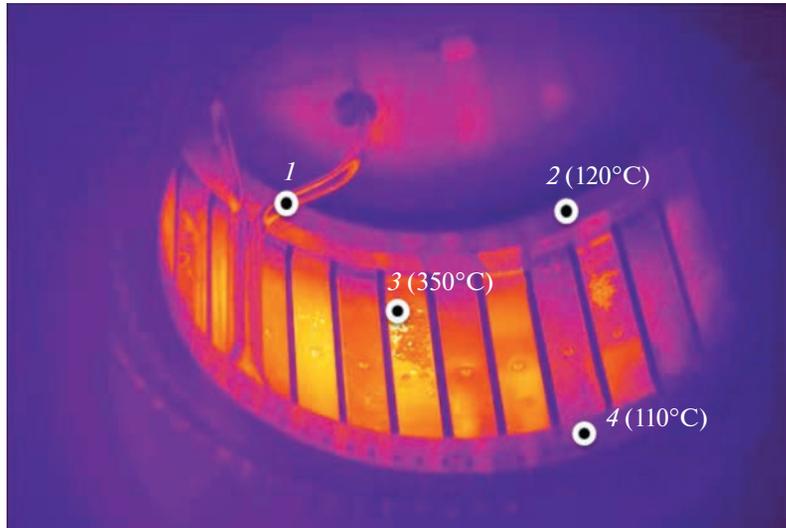


Рис. 10. Фотоизображение нагрева элементов тонкого экрана к концу импульса 33 кВт, 30 с (измерения тепловизором): 1 – трубка охлаждения переднего кольца, 2 – заднее охлаждаемое кольцо, 3 – середина пластины, 4 – переднее охлаждаемое кольцо.

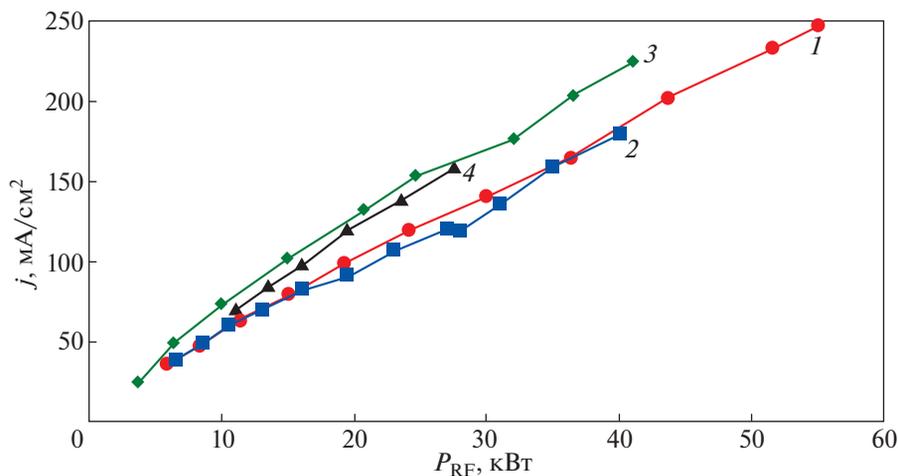


Рис. 11. Плотность тока положительных ионов на зонд j в зависимости от мощности ВЧ-генератора P_{RF} для ВЧ-драйвера с паяным экраном: 1 – с широкой антенной, показанной рис. 26-1, 2 – с узкой антенной, показанной на рис. 26-3 без ферритов, 3 – с узкой антенной и ферритами, показанной на рис. 26-3, 4 – с низкой антенной, показанной на рис. 26-2.

охлаждения элементов ВЧ-драйвера с плазмой и без плазмы практически совпадает. Доля ВЧ-мощности, которая отведена охлаждением боковой стенки защитного экрана, значительно больше, чем у тонкого экрана. Это указывает на то, что потери, связанные с нагревом экрана электромагнитной волной, увеличились по сравнению с тонким экраном. Причиной является увеличение площади поверхности у данного экрана. Характерное время нагрева ~15 сек, после чего мощность охлаждения выходит на стационар. Измерение температур поверхностей для данного экрана не производилось.

Измерения характеристик драйвера с экраном с формованными щелями

Плотность ионного тока на зонд. Зависимость плотности ионного тока от ВЧ-мощности представлена на рис. 13. Максимальный ток был достигнут с широкой конфигурацией антенны и составил 198 мА/см² при мощности 45 кВт и напряжении на антенне 10.5 кВ. Аналогично паяному экрану, применение ферритов позволило незначительно увеличить эффективность, конфигурация с узкой антенной дала такой же эффект. Поле слабо проникает внутрь экрана. Данный экран толще других и имеет заднюю стенку, поэтому он

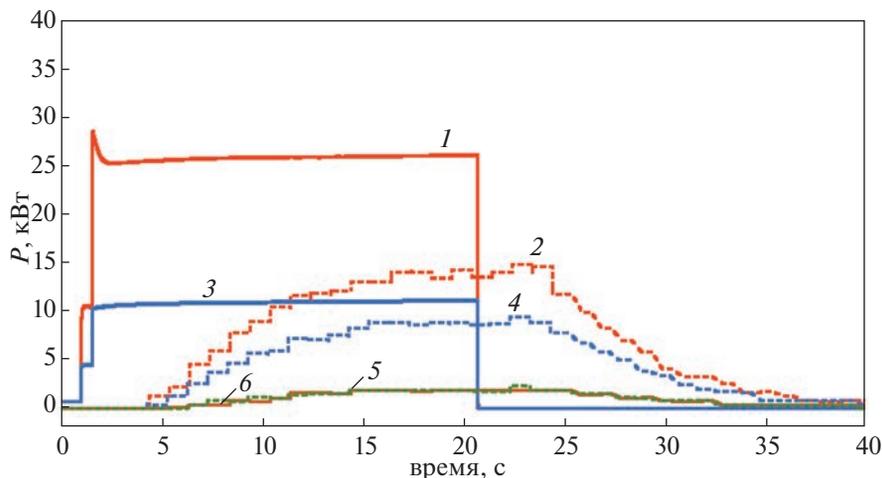


Рис. 12. Осциллограммы мощностей, подаваемых с ВЧ-генератора (1 – с ВЧ-разрядом, 3 – без ВЧ-разряда), и мощностей, уносимых водой с элементов драйвера: 2 – с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ-разрядом, 4 – с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ-разряда, 5, 6 – с антенны, узла поджига, заднего и переднего фланцев с ВЧ-разрядом и без него для ВЧ-драйвера с паяным экраном.

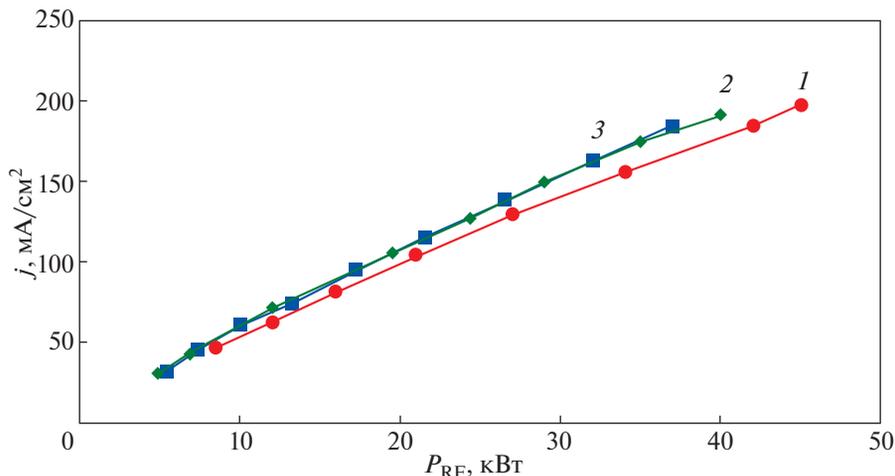


Рис. 13. Плотность тока положительных ионов на зонд j в зависимости от мощности ВЧ-генератора P_{RF} для ВЧ-драйвера с экраном с формованными щелями: 1 – с широкой антенной, показанной рис. 26-1, 2 – с узкой антенной и ферритами, показанной на рис. 26-3, 3 – с узкой антенной, показанной на рис. 26-3 без ферритов.

увеличивает индуктивность антенны больше других. Из-за этого, для достижения характерных ВЧ-мощностей, требуется больше повышать напряжение на антенне.

Тепловые нагрузки. Результаты испытаний генератора в режиме длинных импульсов показали, что защитный экран обеспечивает необходимую защиту керамики. Видимых деформаций экрана или эрозии керамики не наблюдалось. Временная зависимость подводимых и отводимых мощностей представлена на рис. 14. В данном импульсе достигнута мощность 30 кВт при напряжении на антенне 12.8 кВ с широкой конфигурацией антенны. При этом без плазмы мощность потерь составила 16 кВт. Это соответствует оценочной эффективности 47%. Из зависимости видно, что

мощность охлаждения задней стенки слабо различается в импульсе с плазмой и без плазмы. Следовательно, плазма на заднюю стенку ВЧ-драйвера летит слабо, и она практически не нагревается электромагнитной волной. Мультипольная структура магнитного поля на задней стенке ВЧ-драйвера значительно снижает поток заряженных частиц на нее. Плазма разряда в основном нагревает боковую поверхность защитного экрана. Характерное время нагрева ~18 с.

На рис. 15 представлено фотоизображение, полученное с помощью тепловизора после 30 секундного ВЧ-импульса мощностью 30 кВт. Экран охлаждается эффективно, максимальная температура составляет 60°C.

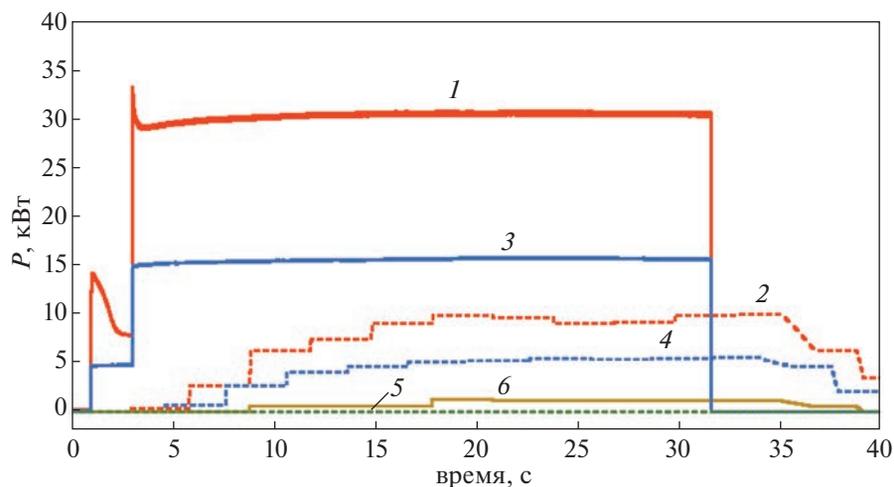


Рис. 14. Оциллограммы мощностей, подаваемых с ВЧ-генератора (1 — с ВЧ-разрядом, 3 — без ВЧ-разряда), и мощностей, уносимых водкой с элементов драйвера: 2 — с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ-разрядом, 4 — с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ-разряда, 5 — с задней стенки защитного экрана без ВЧ-разряда, 6 — с задней стенки защитного экрана с ВЧ-разрядом для ВЧ-драйвера с экраном с формованными щелями.

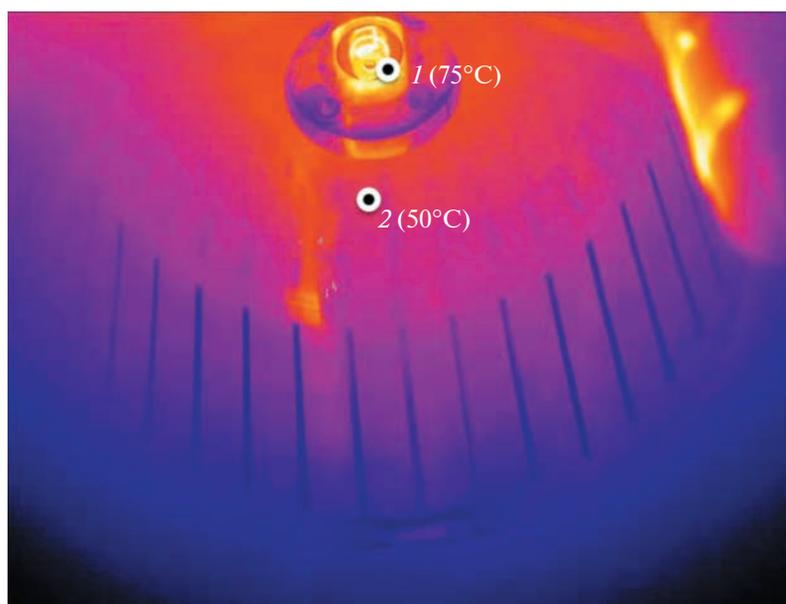


Рис. 15. Фотоизображение нагрева элементов экрана с формованными щелями к концу импульса 30 кВт, 30 с (измерения тепловизором): 1 — узел поджига, 2 — задняя стенка защитного экрана.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЧ-МОЩНОСТИ

В табл. 1 приведены характеристики драйверов, описанных выше в режиме коротких импульсов. В первой колонке табл. 1 указан экран, во второй колонке приведена максимальная ВЧ-мощность, вложенная в плазму при использовании этого экрана и указано напряжение на ВЧ-антенне. В третьей колонке показана плотность ионного тока на зонд, в четвертой колонке указана эффективность вклада ВЧ-мощности в

плазму, в пятой колонке приведена энергетическая эффективность драйвера.

Максимальная эффективность 59% достигается с тонким экраном. Из-за малой толщины боковой стенки и простой структуры щелей, ВЧ электромагнитное поле легко проникает внутрь плазменной камеры и ионизует газ. Ионы из этой области попадают на выход ВЧ-драйвера и формируют поток ионов. Энергетическая эффективность паяного экрана и экрана с формованными щелями меньше 58 и 47% соответствен-

Таблица 1. Основные параметры ВЧ-драйверов при использовании различных защитных экранов

Экран	Максимальная мощность/напряжение на антенне	Плотность тока/ток на выходе ВЧ-драйвера	Эффективность вклада мощности в плазму	Энергетическая эффективность драйвера [А/кВт]	
				На ВЧ-мощность	На мощность, вложенную в плазму
Тонкий	64 кВт / 10.8 кВ	470 мА / 105 А	59%	1.64	2.78
Паяный	55 кВт / 10.4 кВ	248 мА / 57 А	58%	1.04	1.79
С формованными щелями	45 кВт / 10.5 кВ	198 мА / 50 А	47%	1.11	2.36

но. Это может быть связано с z-образной структурой ламелей (см. рис. 3). Эта структура увеличивает общую толщину боковой стенки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны и экспериментально исследованы три конфигурации ВЧ-драйвера. Тонкий экран обеспечивает получение плазмы с высокой плотностью тока на зонд 470 мА/см² при ВЧ-мощности 64 кВт и позволяет работать с импульсами длительностью не менее 30 с. Измерения показали, что в импульсе длительностью 30 с температура данного экрана не выходила на стационарный режим, мощность охлаждения медленно возрастала. Максимальная температура ламелей экрана в импульсе ВЧ-разряда длительностью 30 с составила 350°C.

Таким образом, ВЧ-драйверы с паяным экраном и экраном с формованными щелями подходят для стационарной работы ионного источника. Достигнутая плотность ионного тока с паяным экраном составила 248 мА/см² при ВЧ-мощности 55 кВт. Достигнутая плотность тока с экраном с формованными щелями составила 198 мА/см² при 45 кВт. Эти экраны выходят на стационар по мощности охлаждения за характерное время около 15 с. Эффективность вклада мощности для ВЧ-драйвера с паяным экраном составляет 58%, для экрана формованными щелями – 47%.

Результаты проведенных калориметрических измерений показали хорошее совпадение с ВЧ-мощностью, измеряемой на выходе ВЧ-генератора для драйверов с паяным экраном и тонким экраном. Проведенные эксперименты показали, что поток мощности на заднюю стенку ВЧ-драйвера значительно снижен за счет применения мультиполюсного магнитного поля.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Работа выполнена в рамках федерального проекта комплексной программы РТТН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sotnikov O., Ivanov A., Belchenko Yu., Gorbovsky A., Deichuli P., Dranichnikov A., Emelev I., Kolmogorov V., Kondakov A., Sanin A., Shikhovtsev I.* // Nuclear Fusion. 2021. V. 61. № 11. 116017.
2. *Shikhovtsev I., Abdrashitov G., Belchenko Yu., Belov V., Davydenko V., Gorbovsky A., Ivanov A., Kapitonov V., Kondakov A., Mishagin V., Sanin A., Sotnikov O., Shubin E.* // AIP. Conf. Proc. 2018. V. 2052. 040016.
3. *Prokhorov I.A., Abdrashitov G.F., Averbukh I.I., Belov V.P., Davydenko V.I., Ivanov A.A., Kapitonov V.A., Kolmogorov V.V., Kondakov A.A., Shikhovtsev I.V., Sorokin A.V., Tkachev A.A.* // Fusion Science and Technology. 2013. V. 63 (1T). P. 349.
4. *Fasel D., Andrebe Y., Dubray J., Karpushov A., Kolmogorov V., Marletaz B., Marmillod P., Muehle L., Perez A., Shikhovtsev I., Siravo U.* // Fusion Engineering and Design. 2017. V. 123. P. 331.
5. *Sorokin A., Belov V., Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Podyminogin A., Shikhovtsev I., Shulzhenko G., Stupishin N., Tiunov M.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 02B108.
6. *Speth E., Ciric M., Feist J.H., Frank P., Heinemann B., Kraus W., Probst F., Riedl R., Trainham R., Vollmer O., Wilhelm R.* // Fusion Engineering and Design. 1999. V. 46. Iss. 2–4. P. 383.
7. *McNeely P., Äkäslompolo S., Auerweck W., Drider Y., Ford O.P., Hartmann D.A., Heinemann B., Heinrich S., Hopf C., Kairys R., Obermayer S., Riedl R., Rong P., Rust N., Schroeder R., Wolf R.C.* // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 161. 111997.
8. *Marcuzzi D., Agostinetti P., Dalla Palma M., Falter H.D., Heinemann B., Riedl R.* 2007. V. 82. Iss. 5–14. P. 798.
9. *Heinemann B. et al.* // New J. Phys. 2017. V. 19. 015001.
10. *Yuming Gu, Yahong Xie, Jianglong Wei, Yongjian Xu, Jun Li, Caichao Jiang, Lizhen Liang, Yuanlai Xie, Chundong Hu* // Rev Sci Instrum. 2019. V. 90. 113315.
11. *Sen P.* Principles of electric machines and power electronics. N.Y.: John Wiley & Sons, 1997. P. 64.
12. *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей. СПб.: Лань, 2009.
13. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы / Уч. для радиотехнических вузов и факультетов. М.: Сов. радио, 1963.
14. *Воинов В.А., Гаврисенко Д.Ю., Кондаков А.А., Сотников О.З., Финашин Р.А.* // Сибирский физический журнал. 2022. V. 17. № 3. P. 5.