

УДК 533.9.082.5

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГЕЛИКОННОМ РАЗРЯДЕ

*Д.О. Шуровский, Д.С. Кутузов, Е.А. Бунин, А.Е. Сухов, Е.Ю. Брагин**НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

В статье представлены измерения параметров плазмы геликонного разряда с помощью оптических методов диагностики на установке ПН-3. Дано описание состава диагностического комплекса. Рассмотрены методы измерения параметров плазмы, включающие эмиссионную спектроскопию и лазерно-индуцированную флуоресценцию, и способы обработки результатов измерений. Приведены результаты измерений параметров плазмы геликонного разряда с помощью оптических методов диагностики. Измерения проводились в экспериментах по исследованию зависимости параметров плазмы геликонного разряда от величины магнитной индукции и профиля магнитного поля под антенной. Рабочим газом служил аргон. Методами оптической эмиссионной спектроскопии измерялось радиальное распределение электронной температуры для разных участков плазменного столба. Для определения локальной концентрации однократно заряженного иона аргона Ar II применялся метод лазерно-индуцированной флуоресценции с использованием состояний $3d^2G_{9/2}$ и $4p^2F_{7/2}$. По итогам работы определены оптимальное с точки зрения профиля плазменного столба и плотности плазмы значение магнитного поля под ВЧ-антенной, составившее 900—1000 Гаусс, и конфигурация магнитного поля установки — магнитная ловушка.

Ключевые слова: геликонный разряд, эмиссионная спектроскопия, лазерно-индуцированная флуоресценция.

OPTICAL METHODS FOR HELICON DISCHARGE PLASMA PARAMETERS MEASUREMENT

*D.O. Shurovskiy, D.S. Kutuzov, E.A. Bunin, A.E. Sukhov, E.Yu. Bragin**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The paper presents results of the helicon discharge plasma parameters measurements using optical diagnostic methods at the PN-3 facility. The description of the diagnostic complex is given. Plasma parameters measuring methods, including emission spectroscopy and laser-induced fluorescence, and methods for results processing are considered. The measurements were carried out in experiments to study the dependence of the helicon discharge plasma parameters on the magnitude of the magnetic induction and the profile of the magnetic field under the helicon antenna. The installation working gas was argon. Optical emission spectroscopy method was used to measure the electron temperature radial distribution for different parts of the plasma column. To determine the local concentration of singly ionized argon ion Ar II, we used the laser-induced fluorescence method using the $3d^2G_{9/2}$ and $4p^2F_{7/2}$ states. The optimal value of the magnetic field under the HF antenna, in terms of plasma profile and plasma density, was determined. Based on the results of the work it amounted to 900—1000 Gauss. The optimal configuration of magnetic field of the installation appears to be magnetic trap.

Ключевые слова: helicon discharge, emission spectroscopy, laser-induced fluorescence.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-97-104

ВВЕДЕНИЕ

Геликонный разряд широко используется в различных областях техники и технологии [1], в том числе и для создания плазменных двигателей [2]. Кроме импульсных и стационарных плазменных двигателей, в настоящее время всё большее внимание уделяется созданию безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БРПД) [3] для межпланетных космических полётов. В НИЦ «Курчатовский институт» создана установка ПН-3, предназначенная для экспериментального исследования плазменных процессов в безэлектродных двигателях. Блок-схема двигателя включает зону генерации плазмы, где происходит ионизация рабочего вещества и образование первичной плазмы. Для генерации плазмы используются геликонные волны [4]. Наличие таких волн позволяет осуществлять резонансную накачку высокочастотной (ВЧ) электромагнитной энергии в плазму и эффективно взаимодействовать с электронного компонента плазмы, а для накачки могут быть использованы простые токовые антенны. Изучение процессов формирования разряда в этой зоне является важной задачей для моделирования параметров без-электродных двигателей. Зависимость параметров плазмы геликонного разряда от величины и конфигурации магнитного поля представляется важным направлением исследований. На установке ПН-3 была проведена серия экспериментов по исследованию зависимости параметров плазмы геликонного разряда от величины магнитной индукции и профиля магнитного поля. Определение параметров плазмы геликонного разряда с использованием оптических диагностик актуально, так как данные диагностики являются бесконтактными и не

подвержены влиянию мощных высокочастотных полей. Оптические диагностики включают эмиссионную спектроскопию и лазерно-индуцированную флуоресценцию. С помощью эмиссионной спектроскопии измерялось радиальное распределение электронной температуры и мониторинг исследуемых разрядов. Преимущество метода лазерно-индуцированной флуоресценции заключается в том, что он позволяет проводить локальные измерения плотности атомов и ионов без сканирования линии поглощения. Результаты сравнивались с измерениями, полученными с помощью СВЧ-интерферометра и зондов Ленгмюра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка ПН-3 (рис. 1) включает зону генерации плазмы, где происходит образование плазмы с помощью геликонного источника, зону нагрева и ускорения и магнитное сопло, в котором происходит

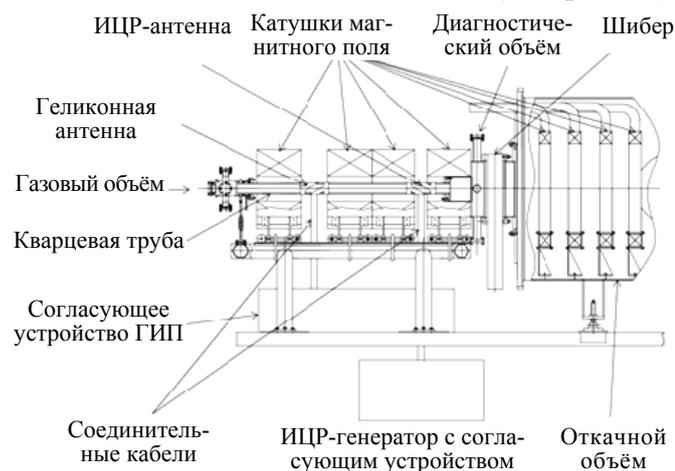


Рис. 1. Общий вид установки ПН-3

формирование истекающего плазменного потока. Магнитное поле связывает эти зоны в единый модуль, обеспечивает термоизоляцию плазменного потока от стенок и элементов конструкций. Элементы установки имеют модульную конструкцию, которая предусматривает возможность менять тип и расположение антенны, магнитную конфигурацию источника плазмы и магнитного сопла, мощность и частоту ВЧ-генератора. Длина установки составляет 6 м. Длина кварцевой трубы разрядной камеры плазмы составляет 1,5 м, внутренний диаметр 60 мм. Внутренний объём откачной камеры составляет 4,1 м³. Источником питания для геликонного источника плазмы служит генератор с воздушным охлаждением мощностью до 20 кВт и переменной выходной частотой от 3 до 30 МГц. Мощность вводится в объём установки посредством полувинтовой медной антенны длиной 20 см. Откачка камеры производится турбомолекулярным насосом ТМНГ-10000, который обеспечивает фоновое давление в источнике плазмы ниже $1 \cdot 10^{-5}$ торр. Рабочим газом является аргон, максимальный расход составляет 10 мг/с. В экспериментах, описываемых в статье, нагрев плазмы не проводился и ИЦР-антенна не использовалась.

Четыре катушки в откачном объёме предназначены для формирования профиля вытекающего плазменного потока. Четыре катушки, расположенные вокруг источника плазмы, позволяют формировать различные профили магнитного поля в разрядной камере с целью оптимизации параметров разряда. Максимальное поле в разрядной камере составляет 0,3 Тл.

ОПИСАНИЕ И СОСТАВ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК

Прозрачность кварцевой трубы даёт широкие возможности для оптических диагностик, позволяет снимать как продольные, так и радиальные распределения плазменных параметров по всей этой области.

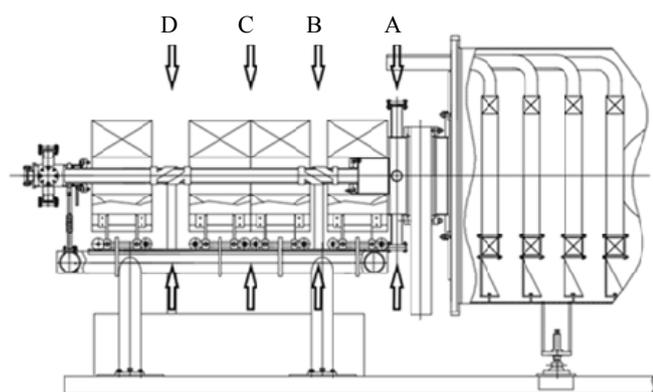


Рис. 2. Сечения, в которых проводились измерения методом ОЭС

Измерения параметров плазмы оптическими методами проводились в двух зонах установки. Первая зона располагается в районе прозрачной кварцевой трубы (рис. 2, сечения В, С, D), где с помощью методов оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) проводились измерения плазменных параметров и мониторинг исследуемых разрядов. Вторая зона располагается в диагностическом объёме (см. рис. 2, сечение А), где проводилось измерение плотности плазмы методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [5].

Оптические диагностики представлены системой ОЭС и системой ЛИФ. Система ОЭС состоит из трёх спектральных каналов, каждый канал включает спектрограф Avaspec-mini. Спектрографы работают в различных спектральных диапазонах: ближний УФ 235—360 нм, УФ/видимый 345—505 нм, видимый/ближний ИК 500—735 нм. Основой спектрографов является ПЗС-линейка на 3648 пикселей, приборы изготовлены по схеме Черни—Тернера. На всех трёх спектрографах установлена щель 10 мкм. Время интеграции может варьироваться от 2 мкс до 10 мин. Генератор импульсов Актаком AWG-4110 обеспечивает синхронизацию измерений с началом разряда и позволяет осуществлять регистрацию спектров в строго определённые моменты времени. Регистрация сигнала осуществляется с помощью компьютера с установленной программой AvaSoft 8, позволяет управлять спектрографами Avaspec-mini. Программа позволяет осуществлять сбор и обработку полученной спектральной информации, учитывать фоновую засветку изучаемого объёма, создавать графические зависимости светимости от времени и длины волны. Спектрографы подключены посредством оптического волокна к коллиматору, который проводит сбор излучения из объёма установки. Система сбора смонтирована на оптическом столе с направляющими рельсами. Коллиматор закреплён на платформе, точность хода которой в вертикальном направлении составляет 0,1 мм, что позволяет проводить сканирование плазмы по хордам. Наличие сигналов интенсивности излучения на различных хордах позволяет получить радиальное распределение электронной температуры для разных участков плазменного столба с помощью преобразования Абеля, выполненного по методу Пирса [6]. Данные спектроскопической диагностики позволяют определять температуру электронного возбуждения методом относительных интенсивностей для частиц с одинаковым зарядом. В экспериментах рабочим газом установки является аргон. Для интерпретации результатов измерений использовалась база атомно-молекулярных данных NIST [7] для аргона.

На рис. 3 показан типичный спектр излучения плазмы в сечении В при давлении $P = 5,5 \cdot 10^{-2}$ торр, составленный по данным трёх каналов регистрации. В спектре излучения преобладает линейчатый спектр ArII. Линии ArIII, ArI также присутствуют в меньших количествах. На рис. 4 показан профиль светимости по диаметру кварцевой трубки.

Для определения температуры электронов методом относительных интенсивностей использовались

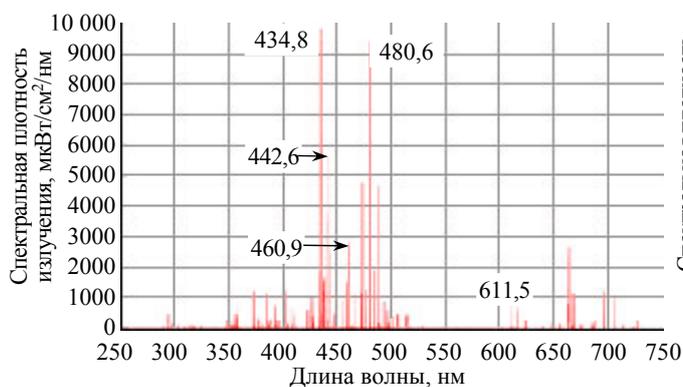


Рис. 3. Спектр излучения плазмы в сечении В, отдельно указаны наиболее интенсивные линии и линии, использованные в схеме ЛИФ

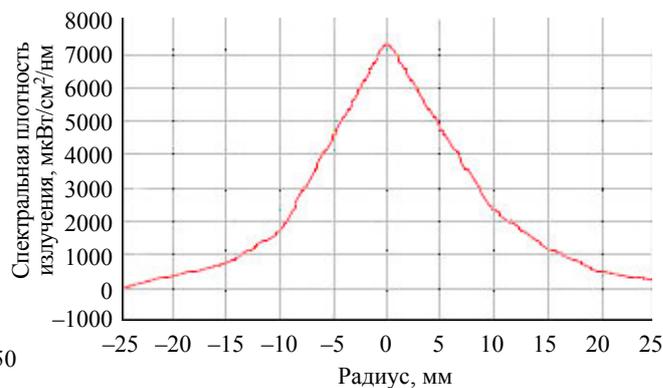


Рис. 4. Хордовый профиль плотности излучения линии 434,8 нм по радиусу кварцевой трубки

интенсивности линий одного типа, а именно ионов аргона ArII [8]:

$$\frac{I''}{I'} = \frac{A'' q'' \lambda'}{A' q' \lambda''} \exp\left(-\frac{E'' - E'}{T_e}\right).$$

Здесь I'' и I' — интенсивности линий; A'' и A' — вероятности спонтанного перехода; q'' и q' — статистические веса состояний; λ'' и λ' — длины волн используемых линий; E'' и E' — энергия уровней, с которых осуществляется переход.

В обработке участвовало более 70 линий иона ArII. Предпочтение отдавалось тем парам линий, энергетическое расстояние между исходными уровнями которых было 1 эВ и более. В наших условиях использование данного метода для аргона допустимо [9].

Использование линий частиц разной кратности ионизации: однократных ArII и атомов ArI:

$$\frac{I_{II}}{I_I} = \frac{\epsilon_{II}^A}{\epsilon_I^A} 2 \frac{A_2 g_2 \lambda_1}{A_1 g_1 \lambda_2} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \frac{1}{n_e} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1 + I_1}{k T_e} \right)$$

и двукратных ArIII и однократных ArII ионов:

$$\frac{I_{III}}{I_{II}} = \frac{\epsilon_{III}^A}{\epsilon_{II}^A} 2 \frac{A_3 g_3 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_3} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \frac{1}{n_e} \exp\left(-\frac{E_3 - E_2 + I_2}{k T_e} \right)$$

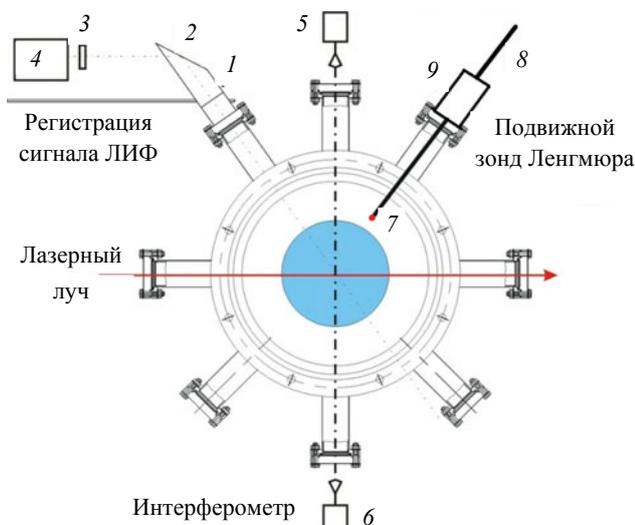


Рис. 5. Расположение систем в диагностическом объёме (сечение А): 1 — патрубок наблюдения системы ЛИФ; 2 — зеркало; 3 — интерференционный фильтр; 4 — ФЭУ; 5 — источник СВЧ-сигнала системы интерферометрии; 6 — приёмник системы интерферометрии; 7 — ленгмюровский зонд; 8 — линия управления линейным транслятором; 9 — линейный транслятор зонда

NT342A-SH с накачкой третьей гармоникой Nd:YAG-лазера, работающий с частотой 20 Гц. Ширина лазерной линии составляет 5 см^{-1} , что позволяет проводить измерения концентрации без сканирования линии поглощения. Пиковая энергия лазерного импульса оптического параметрического генератора (ОПГ) достигается на длине волны 450 нм и составляет 5 мДж. Энергия лазерного импульса на рабочих длинах волн λ_{laser} , 611,5 и 440,1 нм составляет 1,5 и 3 мДж соответственно. Характерная длительность импульса

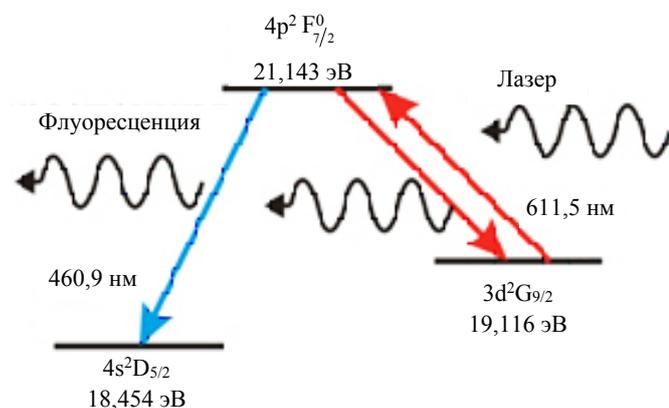


Рис. 6. Спектроскопическая схема ЛИФ

позволило бы уточнить полученный результат. Сложность заключается в том, что основная масса линий атома аргона не видна на используемых каналах спектрографа, а интенсивность линий двукратного иона аргона ArIII крайне низка.

Для определения радиального распределения плотности атомов и ионов плазмы используется система ЛИФ. Диагностика расположена в диагностическом объёме установки. Ее пространственное разрешение составляет 1 см по лазерной линии, частота измерений 1—20 Гц, диапазон измеряемых плотностей не более 10^{14} см^{-3} . Геометрия системы позволяет получать радиальное распределение концентрации атомов и ионов плазмы. При изменении направления ввода лазерного излучения возможно получение аксиального распределения концентрации атомов и ионов плазмы. Схема расположения аппаратуры показана на рис. 5.

Основой системы диагностики ЛИФ служит оптико-параметрический генератор EXPLA NT342A-SH с накачкой третьей гармоникой Nd:YAG-лазера, работающий с частотой 20 Гц. Ширина лазерной линии составляет 5 см^{-1} , что позволяет проводить измерения концентрации без сканирования линии поглощения. Пиковая энергия лазерного импульса оптического параметрического генератора (ОПГ) достигается на длине волны 450 нм и составляет 5 мДж. Энергия лазерного импульса на рабочих длинах волн λ_{laser} , 611,5 и 440,1 нм составляет 1,5 и 3 мДж соответственно. Характерная длительность импульса 5 нс. Флуоресцентное излучение собирается фокусной линзой 200 мм и отображается на ФЭУ.

В качестве рабочей схемы для ЛИФ-методики была выбрана спектроскопическая схема (рис. 6), при которой накачка проводится из метастабильного состояния $3d^2 G_{9/2}$ в состояние $4p^2 F_{7/2}$ на линии $\lambda_{\text{laser}} = 611,5 \text{ нм}$, а регистрация флуоресцентного сигнала ведётся на линии $\lambda_{\text{FLU}} = 460,9 \text{ нм}$ (переход $4p^2 F_{7/2} \rightarrow 4s^2 D_{5/2}$). Для интерпретации сигналов флуоресценции использована столкновительно-излучательная модель [10]. Модель рассматривает шесть уровней аргона ArII и разработана для

применения схемы с накачкой на $\lambda_{\text{laser}} = 611,5$ нм, а регистрация флуоресцентного сигнала ведётся на линии $\lambda_{\text{FLU}} = 461$ нм. Полученный сигнал ЛИФ обладает хорошим соотношением сигнал/шум (более 10) и легко идентифицируется (рис. 7). В сечении также располагаются подвижный зонд Ленгмюра и СВЧ-интерферометр.

Регистрация сигнала ЛИФ проводится с помощью ФЭУ 11526-110-NF, усилителя С5594 и интерференционного фильтра на 610 нм с $\Delta\lambda = 10$ нм. Запись сигнала проходит с использованием модуля АЦП ADC10D 1000/1500, работающего в связке с FPGA XC2C32_7VQG44.

Дополнительно для мониторинга стабильности разряда был использован оптический монохроматор МДР-23 с решёткой 1200-II (от 300 до 1000 нм, максимум чувствительности 500 нм). Монохроматор выполнен по асимметричной схеме Фасти со сферическими зеркальными объективами. На рис. 8 показана зависимость светимости разряда на длине волны 440,1 нм от времени разряда. Детально исследовались преимущественно те серии импульсов, которые демонстрировали воспроизводимость параметров плазмы. Измерения параметров плазмы методами ОЭС и ЛИФ проводились через 1,5 с после инициации разряда.

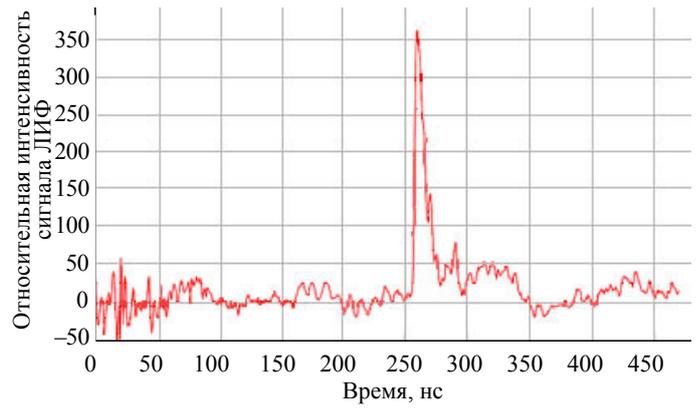


Рис. 7. Характерный вид сигнала ЛИФ

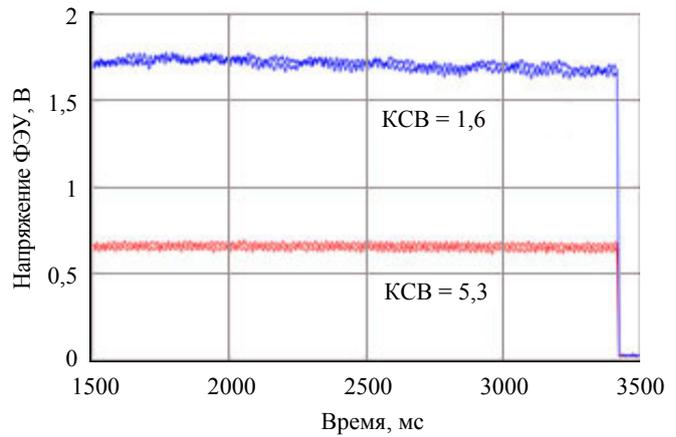


Рис. 8. Интенсивность светимости линии 440,1 нм иона аргона ArII при двух значениях коэффициента стоячей волны, характеризующих вводимую и поглощённую мощность

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА

Проводились исследования зависимости параметров плазменного потока от профиля магнитного поля и величины магнитного поля под антенной. Магнитное поле служит для эффективного создания и нагрева плазменного потока, а также для термоизоляции плазменного потока от стенок кварцевой трубы. Безэлектродный плазменный двигатель можно разделить на две области — геликонный источник плазмы (ГИП) и магнитное сопло. В ГИП происходит создание и нагрев плазмы, в магнитном сопле — ускорение плазменного потока, его срыв с силовых линий, что приводит к созданию тяги и удельного импульса.

Проводилась серия экспериментов по исследованию зависимости параметров плазменного потока от величины магнитного поля под антенной. Каждая катушка имеет отдельный источник питания. Ток, протекающий в магнитных катушках, изменялся таким образом, чтобы конфигурация магнитного поля оставалась прежней, а величина магнитного поля менялась в диапазоне от 400 до 1400 Гс. При фиксированном газовом потоке и вводимой в плазму мощности индукция магнитного поля менялась в сторону увеличения с шагом 100 Гс. Методом ЛИФ проводились измерения концентрации ионов аргона ArII в центральной зоне плазменного шнура, в сечении диагностического объёма (сечение А). Результаты показаны на рис. 9.

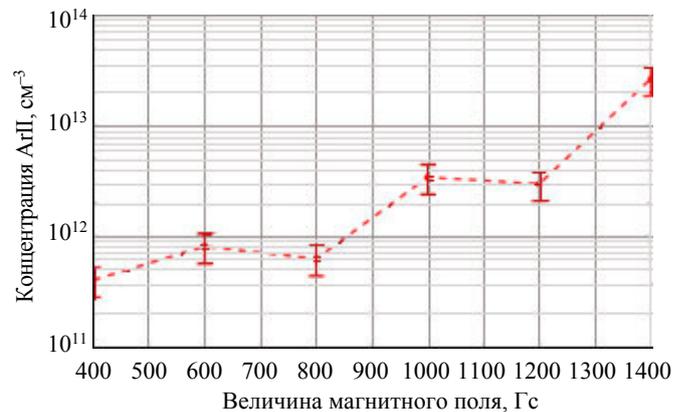


Рис. 9. Зависимость концентрации ArII от величины магнитного поля

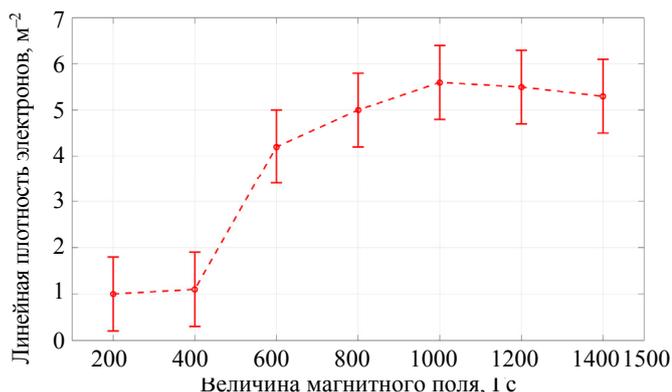


Рис. 10. Линейная плотность электронов, полученная при измерении СВЧ-интерферометром

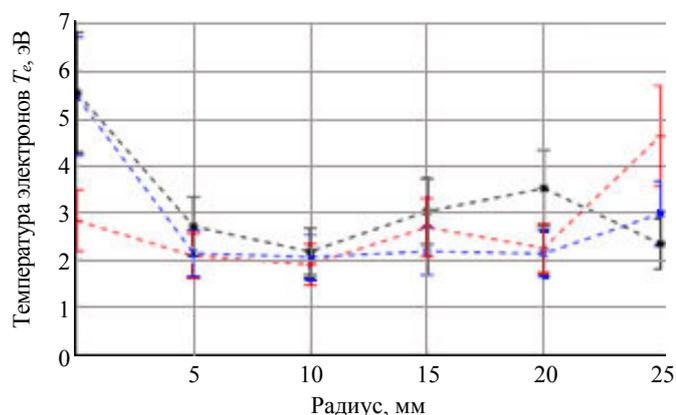


Рис. 11. Распределение T_e по радиусу при различных величинах магнитного поля под ВЧ-антенной: --- — 1200, --- — 800, --- — 400 Гс

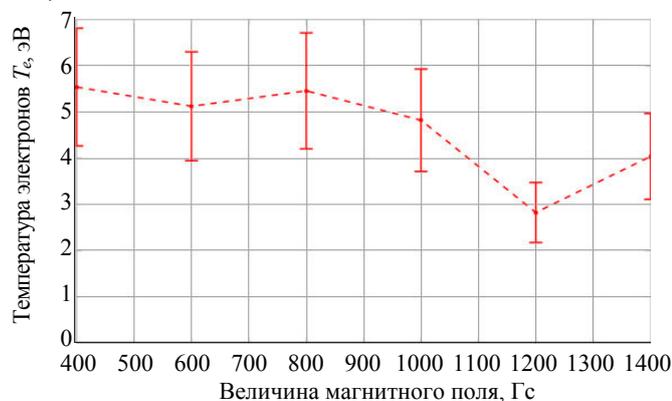


Рис. 12. Зависимость температуры электронов на оси станда под ВЧ-антенной от величины магнитного поля под антенной

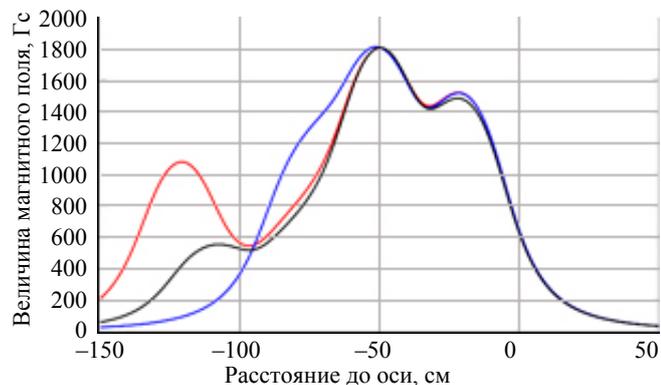


Рис. 13. Профили магнитного поля установки. Антенна находится в точке $x = -90$ см: — ловушка; — растущая; — полка

С ростом поля наблюдается увеличение концентрации ионов. Рост концентрации плазмы подтверждается также данными СВЧ-интерферометра, с помощью которого измерялась линейная концентрация электронов в сечении А (рис. 10). С учётом того, что концентрация двукратно заряженного иона аргона Ar^{III} мала (на спектрах его линии практически отсутствуют), можно приравнять с небольшими поправками значения электронной концентрации к концентрации однократно заряженных ионов аргона Ar^{II} . Увеличение концентрации плазмы при возрастании величины магнитного поля объясняется уменьшением коэффициента поперечной диффузии [11].

Методом ОЭС получено распределение T_e по радиусу при различных значениях величины магнитного поля (рис. 11).

При анализе результатов, полученных при измерении плотности плазмы методом ЛИФ, зондами Ленгмюра и СВЧ-интерферометром, была определена зависимость плотности плазмы от индукции магнитного поля. При достижении величины 800—1000 Гс плотность плазмы увеличивается, а при дальнейшем увеличении изменяется незначительно. Температура электронов на оси станда (рис. 12), измеренная с помощью ОЭС, слабо зависит от величины магнитной индукции под антенной, при высоких полях наблюдается её уменьшение. На основе проведённых измерений было сделано заключение, что диапазон оптимальной величины магнитного поля под антенной лежит в пределах 900—1000 Гс.

Одним из ключевых факторов, влияющих на параметры плазменного потока, является конфигурация магнитного поля. Целью исследований является определение зависимости параметров плазмы, создаваемой геликонным источником, от профиля магнитного поля. Оптимизация конфигурации магнитного поля позволяет увеличить эффективность протекающих в безэлектродном плазменном двигателе физических процессов и увеличить итоговый КПД двигателя. Были выбраны три конфигурации магнитного поля: конфигурация с нарастающим магнитным полем; магнитная пробочная ловушка; плоская конфигурация магнитного поля («полка»). При проведении измерений для всех конфигураций величина поля под антенной и в диагностическом объёме, а также пробочное отношение были одинаковыми. На рис. 13 показаны три конфигурации поля. Зависимость параметров плазмы от величины магнитного поля также измерялась с помощью СВЧ-интерферометра и зондов Ленгмюра.

Методом ЛИФ была измерена концентрация ArII при различных конфигурациях поля под антенной (см. таблицу).

Концентрация ArII при различных конфигурациях поля под антенной

Конфигурация	Ловушка	Полка	Растущая
Концентрация аргона Ar II, см ⁻³	$3,9 \cdot 10^{12} \pm 1 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{11} \pm 1,5 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11} \pm 0,4 \cdot 10^{11}$

На рис. 14 показаны радиальные значения электронной температуры для различных конфигураций магнитного поля, полученные с помощью ОЭС.

Концентрация ArII, измеренная методом ЛИФ, имеет наибольшее значение при конфигурации магнитной пробочной ловушки по сравнению с двумя другими магнитными конфигурациями. Кроме того, профиль плотности плазмы при конфигурации магнитной пробочной ловушки по данным зондовых измерений имеет более пикированный профиль. Чем дальше силовая линия от оси, тем больше угол её наклона в магнитном сопле, а значит, частицы будут срывать с данной линии под большими углами. Таким образом, чем больше частиц будет находиться на «внутренних» (более близких к оси) силовых линиях, т.е. чем уже будет радиальный профиль плазмы на входе в магнитное сопло, тем меньше будет угол срыва плазменного потока и итоговая эффективность двигателя выше.

Учитывая изложенные результаты, оптимальным профилем магнитного поля для установки ПН-3 под антенной была выбрана пробочная ловушка и проверена экспериментально со следующим распределением поля по оси (рис. 15).

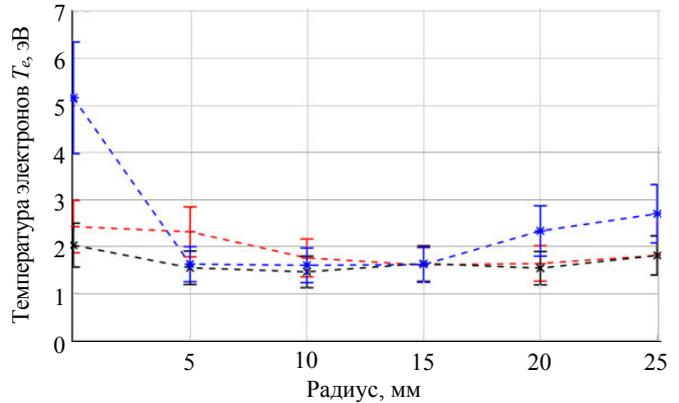


Рис. 14. Распределение температуры электронов T_e по радиусу при различных конфигурациях в сечении С: --- — ловушка, ---- — растущая, ---- — полка

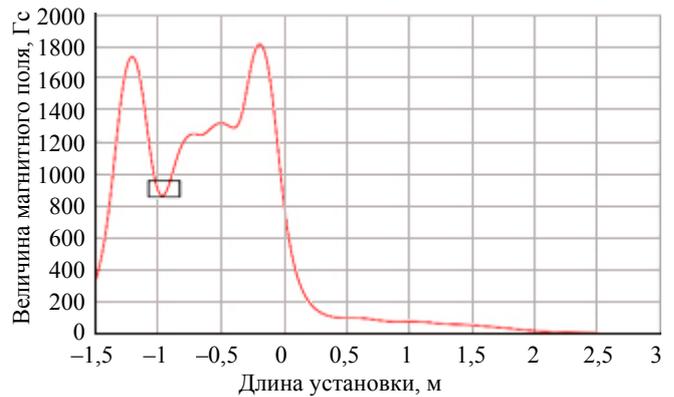


Рис. 15. Распределение магнитного поля вдоль оси установки при оптимальной конфигурации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ПН-3 были проведены эксперименты по исследованию зависимости параметров плазмы от величины магнитной индукции и профиля магнитного поля. Для измерения параметров плазмы созданы две системы оптических диагностик — ОЭС и ЛИФ. В результате проведенных исследований параметров плазмы геликонного разряда было продемонстрировано, что величина индукции магнитного поля является оптимальной при достижении величины 900—1000 Гс с точки зрения плотности плазмы и профиля плазменного потока. Оптимальным профилем магнитного поля является пробочная ловушка, распределение поля по оси показано на рис. 15. Таким образом, при выбранной конфигурации магнитного поля наблюдается «ровный» симметричный острый радиальный профиль плазмы, значительно уменьшились шумы сигналов, снизился эффект перезарядки в магнитном сопле. Также это может свидетельствовать о высокой степени ионизации плазменного потока. С учётом всего сказанного выбранная конфигурация магнитного поля является одной из оптимальных, и её следует использовать при дальнейших исследованиях плазменных процессов в безэлектродных плазменных двигателях.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке работы д.ф.-м.н. И.В. Москаленко и В.А. Жильцову, а также всему коллективу установки ПН-3.

Работа проведена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-2100Z.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boswell R.W., D. Henry.** — Applied Physics Letters, 1985, vol. 47, p. 1095.
2. **Charles C.** — J. Phys. D: Appl. Phys., 2009, vol. 42, p. 163001.
3. **Bathgate S.N. et al.** — Plasma Sci. Technol., 2017, vol. 19, 083001 (24 p.).
4. **Boswell R.W.** Plasma production using standing helicon wave. — Physics Letters, 1970, vol. 33, № 7, p. 457—458.
5. **Schweer B., Bogen P., Hintz E., Rusbüldt D., Goto S., Steuer K.H.** Application of laser-induced fluorescence to the measurement of the release, the transport and the ionization of Ti-atoms at the ASDEX divertor plates. — J. Nucl. Mater., 1982, vol. 111/112, p. 71—74.
6. **Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А.** Методы диагностики высокотемпературной плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1974. 160 с.
7. **National Institute of Standards and Technology.** Atomic Spectra Database; <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
8. **Хаддлстоун Р., Леонард С.** Диагностика плазмы. — М.: Мир, 1967. 516 с.
9. **Jonkers J.** On difference between ionizing helium and argon at atmospheric pressure. — Plasma Sources Science and Technology, 2003, vol. 12, № 1, p. 30—38.
10. **Кутузов Д.С., Москаленко И.В., Брагин Е.Ю., Жильцов В.А., Янченков С.В.** Измерение параметров плазмы в пробочной ловушке методом лазерно-индуцированной флуоресценции. — Физика плазмы, 2018, т. 44, № 9, с. 698—705.
11. **Чен Ф.** Введение в физику плазмы, — М.: Мир, 1987. 399 с.



Демид Олегович Шуровский, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Дмитрий Сергеевич Кутузов, научный сотрудник, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Кутузов Дмитрий Сергеевич, 89163111547
Kutuzov_DS@nrcki.ru, iloris@mail.ru



Евгений Андреевич Бунин, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Андрей Евгеньевич Сухов, младший научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Евгений Юрьевич Брагин, научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 15 января 2022 г.

После доработки 16 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 97—104.