

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-5-13>

УДК 62-97/-98; 004.021; 53.083.94

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА

**М. К. Скаков¹, Т. Р. Туленберген^{2,3*}, Б. Ж. Чектыбаев², И. А. Соколов^{2,3},
А. Ж. Миниязов², Г. К. Жанболатова², Р. Ж. Наурызбаев²**

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

³ НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: tulenbergenov@nnc.kz

В данной статье представлены экспериментальные данные по измерению электронной температуры и концентрации плазмы в радиальном направлении на плазменно-пучковой установке. Параметры плазмы определялись с помощью автоматизированной диагностической системы на основе электрического зонда для двух рабочих газов – водород и гелий. Определены зависимости электронной температуры и концентрации плазмы от изменения мощности электронного пучка и давления рабочего газа. Показано, что при увеличении мощности электронного пучка электронная температура в радиальном направлении не изменяется для обоих рабочих сред, а максимальная концентрация плазмы на установке зарегистрирована при наибольшем давлении газа ближе к центру пучка и составила $5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ для водорода и $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ для гелия.

Ключевые слова: диагностика плазмы, параметры плазмы, вольтамперная характеристика, электронная температура, концентрация плазмы, водород, гелий.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] приведен обзор стационарных линейных симуляторов плазмы, используемых для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью рабочей камеры применительно к термоядерным установкам и моделирования их пристеночной плазмы. Температура и плотность плазмы которых близки температуре и плотности плазмы SOL (scrape off layer) [2, 3]. В филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК разработана плазменно-пучковая установка для поддержки создания и эксплуатации Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ). Установка предназначена для испытаний образцов малых размеров, изучения их свойств и поведения поверхности при взаимодействии с плазмой. При взаимодействии плазмы с поверхностью образуются такие повреждающие факторы, как распыление атомов поверхности материала и эрозия, внедрение в поверхность инородных частиц или напыление, модификация рельефа поверхности, блистерообразование. Поэтому, при изучении этих процессов, которые оказывают непосредственное влияние на материалы, возникает необходимость в определении параметров плазмы в радиальном направлении на плазменно-пучковой установке.

Современные методы диагностики плазмы весьма разнообразны. На сегодняшний день общедоступным и надежным методом, позволяющий определять основные характеристики низкотемпературной плазмы, такие как концентрация плазмы и электронная температура, является диагностика на основе электрического зонда [4].

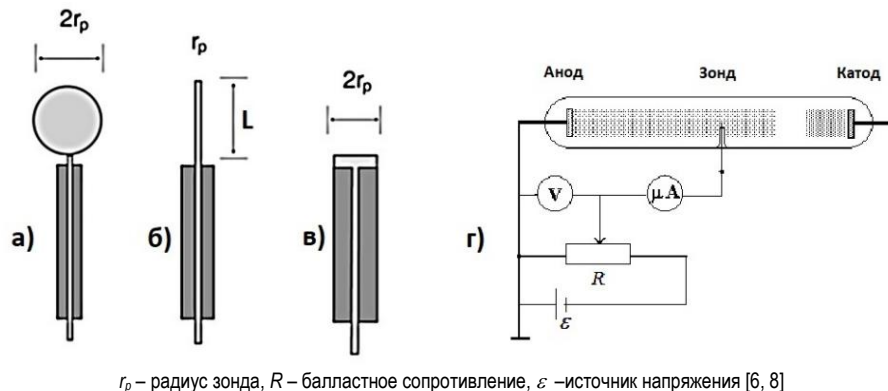
Как известно, зонд представляет собой металлический электрод, покрытый изоляцией с небольшой оголенной частью, контактирующей с плазмой (собирающая поверхность), и которая может иметь различную форму – цилиндрическую, плоскую, сферическую.

На практике, в основном, используют цилиндрические зонды, ввиду минимального влияния на возмущение плазмы и простого метода обработки экспериментальных данных. На рисунке 1 представлен схематичный вид зондов и наиболее часто используемая электрическая схема зондовых измерений в разряде постоянного тока, которая включает: измерительный зонд, опорный электрод, замыкающий зондовую цепь (здесь им служит анод разрядной трубки), регулируемый источник смещения напряжения зонда и измерительные приборы – микроамперметр (μA) и вольтметр (V) [4–8].

Теория, связывающая измерение тока с искомыми характеристиками плазмы, оказывается в общем случае сложной и не всегда позволяет проводить корректные измерения параметров плазмы. Однако, существует диапазон параметров эксперимента, в котором теория зондовых измерений оказывается не слишком сложной и содержит минимальное количество априорных предположений.

Таким образом, исходя из представленного выше материала, определение параметров плазмы на плазменно-пучковой установке с применением зондового метода является значимым, а разработанная нами автоматизированная диагностическая система позволяет усовершенствовать существующий подход к оценке низкотемпературной плазмы. В связи с этим, нами поставлена цель провести эксперименты по оценке параметров плазмы при условиях:

- в зависимости от изменения мощности электронного пучка (ЭП) при постоянном давлении газа;
- в зависимости от изменения давления рабочего газа при постоянной мощности ЭП;
- в зависимости от расстояния от центра оси установки при неизменном давлении и мощности ЭП.



r_p – радиус зонда, R – балластное сопротивление, ε – источник напряжения [6, 8]

Рисунок 1. Схематичный вид сферического (а), цилиндрического (б) и плоского зонда (в) и простейшая электрическая схема зондовых измерений (г)

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Метод электрического зонда

Метод заключается в измерении тока, протекающего через зонд, от разности потенциалов между зондом и опорным электродом, т.е. в снятии зондовой вольтамперной характеристики (ВАХ). Идеализированный вид зондовой ВАХ и электронная ветвь ВАХ в полулогарифмическом масштабе представлены на рисунке 2 [9].

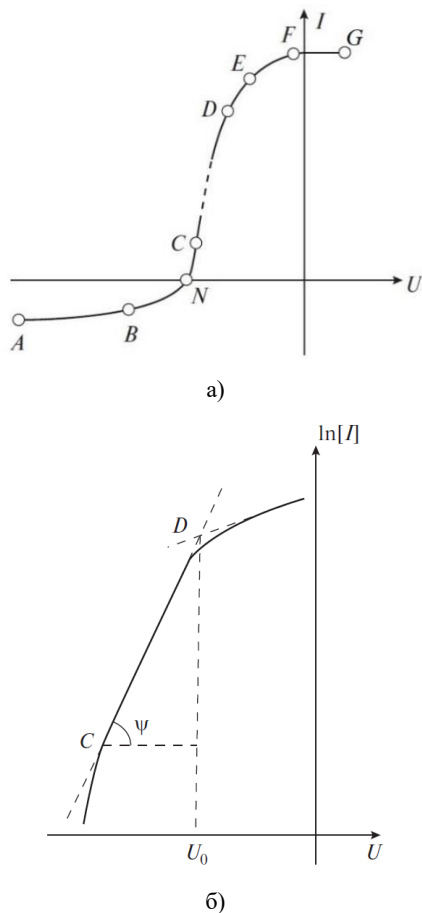


Рисунок 2. Идеализированный вид зондовой ВАХ (а) и электронная ветвь ВАХ (б) в полулогарифмическом масштабе [9]

Качественная и количественная интерпретации ВАХ описаны в работах [4-11]. Согласно [5-9], ВАХ зонда состоит из трех областей: область ионного тока насыщения (AB), переходная область (BC) и область (CF), где электронный ток преобладает над ионным. Область ионного тока насыщения, или ионная ветвь, характеризуется отрицательным потенциалом зонда, при котором электроны отталкиваются, а положительные ионы притягиваются. Переходная область характеризуется наличием плавающего потенциала зонда (точка N), при котором токи электронов и положительных ионов становятся сопоставимы и результирующий ток на зонд равен 0. Область электронного тока насыщения характеризуется уже положительным потенциалом зонда, при котором электроны притягиваются, а положительные ионы отталкиваются.

Особенностью зондового метода является то, что эти характеристики определяются локально и при проведении серии экспериментов с помощью подвижного зонда будет получено пространственное распределение параметров плазмы (температура электронов T_e и концентрация плазмы n_0).

Для вычисления T_e используется участок CD (рисунок 2а), где можно пренебречь ионной составляющей тока, так как вклад ионов невелик. При представлении электронного тока в полулогарифмическом масштабе в зависимости от напряжения (рисунок 2б) температура электронов определяется по формуле:

$$T_e = \frac{1}{\frac{d \ln(I)}{dU}} = \frac{1}{\lg \psi}. \quad (1)$$

После нахождения T_e можно рассчитать концентрацию плазмы n_0 .

Для вычисления концентрации плазмы широко применяют формулу Бома для ионного тока насыщения (I_i) [7-9]:

$$I_i = 0,4en_0S\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (2)$$

где e – заряд электрона, n_0 – концентрация плазмы, S – площадь зонда; k – постоянная Больцмана

($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); M_i – масса иона, T_e – температура электронов.

Однако, согласно [8], ток электронов (I_e) при потенциале зонда, равном потенциалу плазмы (U_0) (рисунок 26), позволяет определить концентрацию плазмы по формуле:

$$n_0 = \frac{4I_e}{eV_{eS}}, \quad (3)$$

где I_e – электронный ток, который определяется по ВАХ в точке, соответствующей найденному потенциалу плазмы; V_e – скорость электрона, определяемая по формуле (4):

$$V_e = \sqrt{\frac{2eT_e}{m_e}}. \quad (4)$$

где m_e – масса электрона.

Экспериментальная часть

Оценку локальных параметров плазмы в режиме реального времени с применением разработанной нами автоматизированной диагностической системы проводили на пучково-плазменной установке (ППУ) [10–12].

Общая схема установки приведена на рисунке 3.

Принцип работы установки основан на способе ионизации газа бесстолкновительным взаимодействием электронным пучком, позволяющий получать стационарную низкотемпературную плазму в большом объеме называемой пучково-плазменным разрядом (ППР) в магнитном поле. Возникновение ППР, прежде всего, происходит вследствие развития пучковой неустойчивости в результате чего, происходит возбуждение электронным пучком колебаний и волн в плазме. Поддержание ППР в магнитном поле обусловлено ионизацией газа «плазменными» электронами, ускоренными в поле высокочастотных колебаний, возбуждаемых электронным пучком в плазме [13].

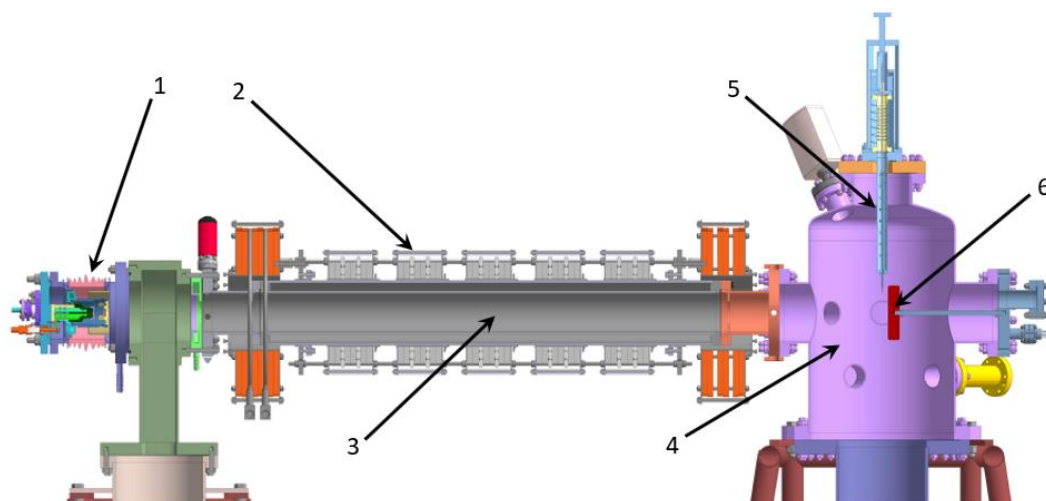
Для оценки локальных параметров плазмы на ППУ применялась автоматизированная система диагностики плазмы, в состав которой входят подвижный цилиндрический зонд Ленгмюра, пикоамперметр Keithley 6487 с собственной электрической разверткой напряжения в диапазоне ± 505 В и программное обеспечение с разработанным алгоритмом для автоматического расчета параметров плазмы.

Измерительный вольфрамовый электрод зонда с площадью собирающей поверхности $4,908 \text{ мм}^2$ имеет длину 3 мм и диаметр 0,5 мм. В качестве опорного электрода служит стенка вакуумной камеры.

Движение зонда обеспечивается пневмоцилиндром с регулируемой скоростью хода поршня на расстояние от 0 мм до 25 мм от центра оси ППР. Для управления пневмоцилиндром используется пятипозиционный трехходовой электропневмораспределитель с электромагнитным управлением (24 В, постоянный ток). Сигнал для управления положением электрода подается с аналогового модуля вывода информационно-измерительной системы (ИИС) ППУ. Для регистрации положения зонда используется датчик на базе реостата с общим сопротивлением 1 кОм, сигнал с которого подается на модуль аналогового ввода ИИС ППУ.

Пикоамперметр Keithley 6487 приспособлен для снятия ВАХ слаботочных устройств и позволяет передавать до 1000 отсчетов/сек. Интеграция пикоамперметра Keithley 6487 с функцией развертки в ППУ проведена с помощью программного комплекса, которая включает в себя следующие возможности:

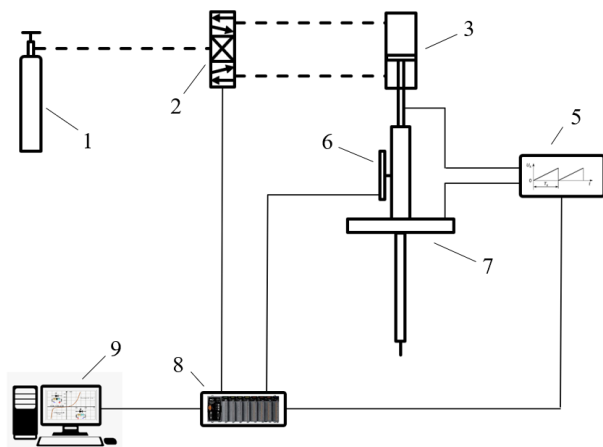
- удаленное управление и регистрация значений тока и напряжения с зонда Ленгмюра;
- задавать значение напряжения развертки прибора в его рабочем диапазоне;
- запуск развертки от указанного значения положения электрода зонда Ленгмюра.



1 – электронная пушка; 2 – электромагнитная система; 3 – газоразрядная камера;
4 – камера взаимодействия; 5 – зонд Ленгмюра; 6 – приемный коллектор

Рисунок 3. Расположение зонда Ленгмюра

Структурная схема автоматизированной системы зондовой диагностики приведена на рисунке 4.



1 – баллон с азотом (N_2); 2 – пневмораспределитель; 3 – пневмоцилиндр; 5 – блок развертки (Keithley 6487); 6 – датчик положения электрода зонда Ленгмюра; 7 – зонд Ленгмюра; 8 – информационно-измерительная система; 9 – персональный компьютер

Рисунок 4. Структурная схема автоматизированной системы зондовых измерений

Измерение локальных параметров плазмы проводилось ближе к центру оси плазменного пучка на расстоянии 5, 9 и 11 мм от центральной оси ППР. На рисунке 5 показано расположение зонда Ленгмюра в камере взаимодействия и точки измерения локальных параметров плазмы.

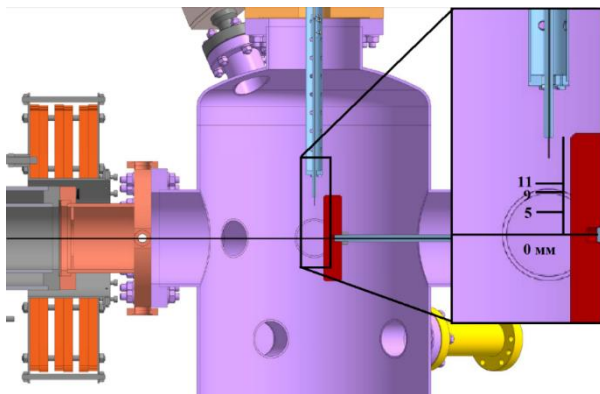


Рисунок 5. Расположение зонда Ленгмюра в камере взаимодействия и точки измерения локальных параметров плазмы

Водород и гелий широко используются в исследованиях по взаимодействию плазмы с кандидатными материалами. В большинстве современных экспериментальных термоядерных устройств в качестве топлива используется смесь дейтерия и трития. Так как дейтерий и тритий дорогостоящие газы, поэтому в основном используют водород с учетом того, что изотопический эффект мал. Гелий используется так как является продуктом термоядерной реакции. Для определения параметров плазмы в радиальном направлении были проведены эксперименты согласно

условиям, приведенным в таблице 1. Диапазон электрической развертки напряжения на зонде Ленгмюра был задан от -300 В до +100 В во всех экспериментах с шагом 1 В.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов на ППУ в среде водорода и гелия

Параметры эксперимента	Значение
Диапазон мощности электронного пучка, Вт	2–320
Диаметр электронного пучка, мм	~3
Диапазон давления рабочего газа в режиме ППР, Па	~ 0,013–0,13
Напряженность магнитного поля на оси ППР, Тл	0,1
Рабочий газ	H_2 , He

Измерение одиночным зондом радиального распределения на расстоянии менее 5 мм было ограничено областью первичного электронного пучка, где происходил перегрев зонда в результате термоэмиссии с его поверхности.

Для определения наличия примесей в рабочих газах проводился масс-спектрометрический анализ в камере взаимодействия в режиме онлайн с регистрацией значений парциальных давлений молекул в диапазоне атомных масс от 1 а.е.м. до 45 а.е.м. с помощью квадрупольного масс-спектрометра CIS100 с использованием программного обеспечения RGA 3.0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Масс-спектрометрический анализ показал, что при использовании рабочего газа – водород, в камере взаимодействия преобладают молекулы водорода (2 а.е.м.) со значением парциального давления $\sim 3,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Молекулы воды (18 а.е.м.) и азота (28 а.е.м.) находятся на уровне фона. А при использовании гелия в качестве рабочего газа, установлено, что в камере взаимодействия преобладают молекулы гелия (4 а.е.м.) со значением парциального давления $\sim 3,19 \cdot 10^{-3}$ Па. Молекулы воды (18 а.е.м.) и азота (28 а.е.м.) также находятся на уровне фона.

При проведении экспериментальных работ с помощью автоматизированной системы были получены среднearифметические значения температуры электронов (T_e) и концентрации плазмы (n_0) в зависимости от мощности электронного пучка в среде водорода и гелия при давлении рабочего газа в камере взаимодействия 0,13 Па. На рисунке 6 показана схема измерения параметров плазмы во время эксперимента.

В результате полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости параметров плазмы от мощности электронного пучка в радиальном направлении. Графики зависимости параметров плазмы от мощности электронного пучка в среде водорода и гелия показаны на рисунках 7 и 8, соответственно.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА

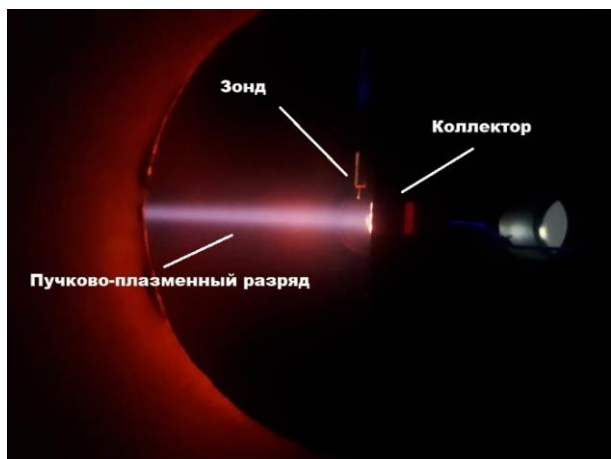


Рисунок 6. Измерение параметров водородной плазмы во время эксперимента с применением автоматизированной системы на расстоянии 5 мм от центра пучка

Из графиков видно, что при увеличении мощности электронного пучка от 2 Вт до 320 Вт температура электронов увеличилась с 2,2 эВ до 5,5 эВ в среде водорода и с 2,8 эВ до 10 эВ в среде гелия, а концен-

трация плазмы при достижении мощности до 50 Вт достигла насыщения до значения $\sim 3,13 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ в среде водорода и до значения $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ в среде гелия при мощности 150 Вт.

Также были построены графики зависимости температуры электронов (T_e) и концентрации плазмы (n_0) от давления рабочего газа в камере взаимодействия в среде водорода и гелия при мощности электронного пучка ~ 93 Вт в радиальном направлении. Графики зависимости параметров плазмы от давления рабочего газа в среде водорода и гелия показаны на рисунках 9 и 10, соответственно.

Из графиков видно, что при увеличении давления рабочего газа от $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па до $13 \cdot 10^{-2}$ Па температура электронов уменьшилась с 6,2 эВ до 3,2 эВ в среде водорода и с 10,5 эВ до 6,2 эВ в среде гелия, а концентрация плазмы увеличилась от $\sim 0,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ до $\sim 3,3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ в среде водорода и от $\sim 2,1 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ до $\sim 3,6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ в среде гелия.

На рисунке 11 приведены графики изменения параметров плазмы в радиальном направлении в среде гелия и водорода.

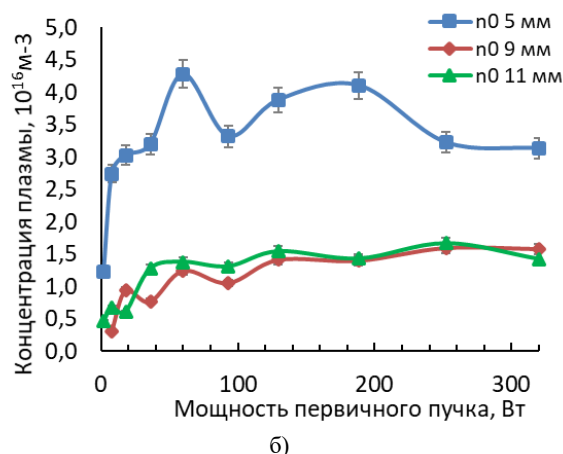
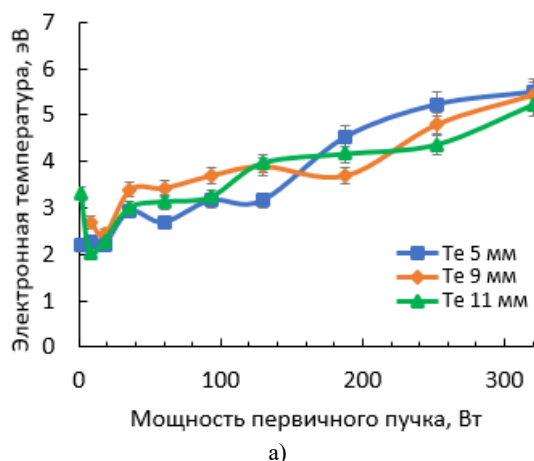


Рисунок 7. Зависимость температуры электронов T_e (а) и концентрации плазмы n_0 (б) от мощности электронного пучка в среде водорода

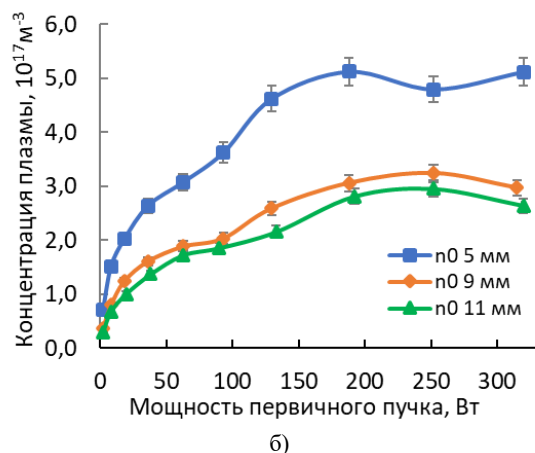
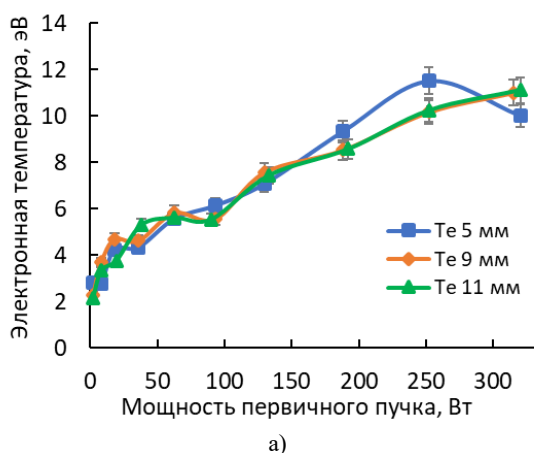


Рисунок 8. Зависимость температуры электронов T_e (а) и концентрации плазмы n_0 (б) от мощности электронного пучка в среде гелия

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ
НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА**

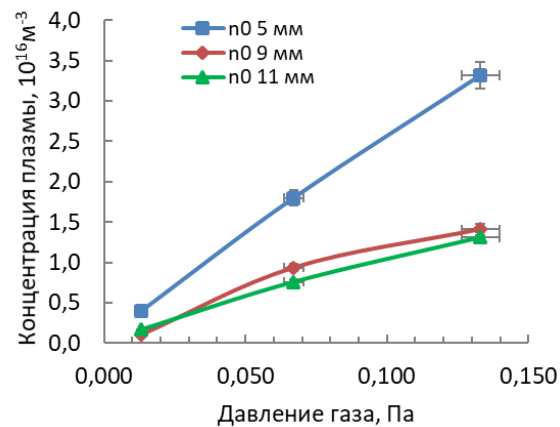
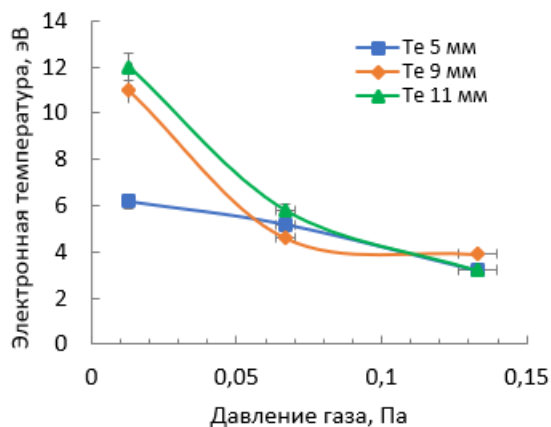


Рисунок 9. Зависимость температуры электронов T_e (а) и концентрации плазмы n_0 (б) от давления рабочего газа в среде водорода при мощности электронного пучка ~ 93 Вт

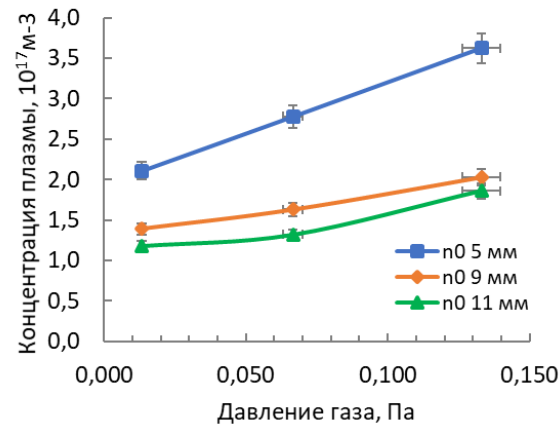
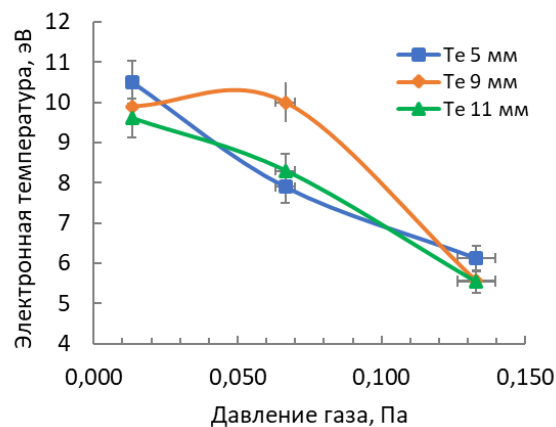


Рисунок 10. Зависимость температуры электронов T_e (а) и концентрации плазмы n_0 (б) от давления рабочего газа в среде гелия при мощности электронного пучка ~ 93 Вт

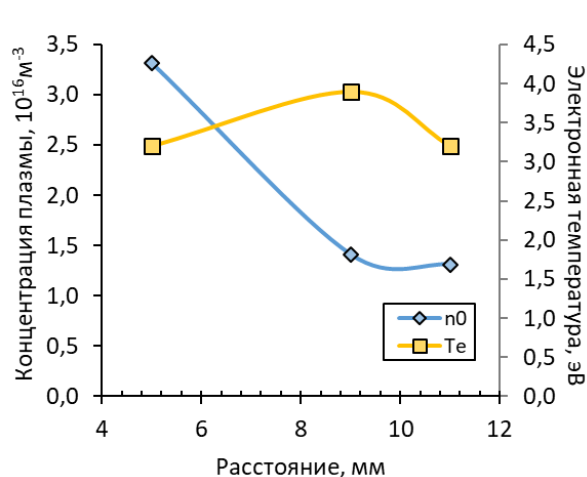
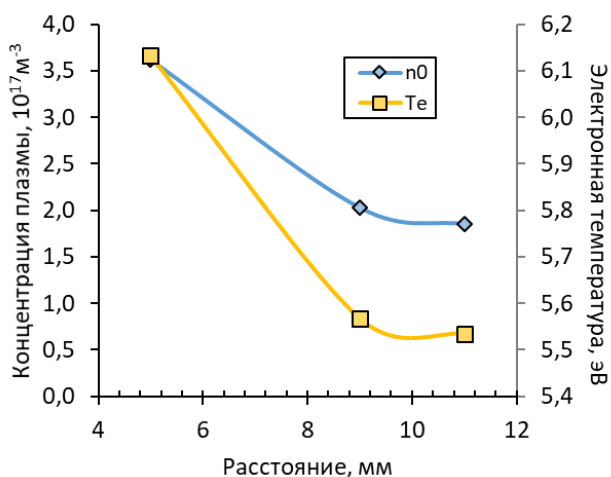


Рисунок 11. Распределение концентрации плазмы (n_0) и температуры электронов (T_e) в радиальном направлении при давлении газа $13 \cdot 10^{-2}$ Па и мощности электронного пучка 93 Вт в среде гелия (а) и водорода (б)

Из графиков видно, что в радиальном направлении в среде гелия электронная температура (T_e) и концентрация плазмы (n_0) на расстоянии от 5 мм до 9 мм снижаются от 6,2 эВ и $3,6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ до 5,6 эВ и $2,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии от 9 мм до 11 мм не изменяется, а в радиальном направлении в среде водорода концентрация плазмы (n_0) на расстоянии от 5 мм до 9 мм снижается от $3,3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ до $1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии от 9 мм до 11 мм не изменяется. Электронная температура (T_e) на расстоянии от 5 мм до 9 мм сначала увеличивается от 3,2 эВ до 3,9 эВ, а затем уменьшается.

Уменьшение влияния случайной погрешности на оценку нами осуществляется путем трехкратного измерения тока при одинаковых условиях и вывода среднеарифметического значения. При измерении тока из плазмы возникают шумы, что относится к систематической погрешности, снижение влияния нами проводится путем предварительного сглаживания массива данных со значениями зондовых токов и напряжений методом скользящего среднего, т.к. он является наиболее распространенным и простым методом сглаживания. Таким образом, с учетом погрешностей приборов (не более 1%), округления (не более 0,01%), метода и вычислений (не более 5%) и субъективной погрешности общая суммарная погрешность составляет не более 10%, что вполне допустимо при оценке параметров плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате с помощью автоматизированной системы зондовой диагностики на плазменно-пучковой установке получен массив экспериментальных значений зондовых токов и напряжений. Установлен характер изменений температуры электронов (T_e) и концентрации плазмы (n_0) в радиальном направлении в среде водорода и гелия в зависимости от мощности электронного пучка и давления рабочего газа в камере взаимодействия плазменно-пучковой установки.

Установлено, что электронная температура в среде водорода увеличивается в радиальном направлении при низком давлении рабочего газа, а концентрация плазмы увеличивается только при повышенном давлении. В среде гелия электронная температура в радиальном направлении при изменении давления рабочего газа почти не изменяется, а концентрация плазмы имеет более высокие значения ближе к центру плазменного пучка.

Таким образом, полученные зависимости позволяют анализировать и устанавливать соответствие между параметрами плазменного воздействия на материалы и характером процессов на их поверхности, а также в объеме, и изучать динамику развития этих процессов от длительности облучения, типов и параметров разряда на плазменно-пучковой установке.

Данная работа выполнена в рамках грантового финансирования Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP13068552).

ЛИТЕРАТУРА

1. Туленберген Т.Р., Соколов И.А., Миниязов А.Ж., Кайырды Г.К., Ситников А.А. Обзор по линейным ускорителям // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – № 4. – С. 59–67. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-59-67>.
2. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках: Учеб. пособие под ред. Курнаева В.А. М: МИФИ, 2007. 368 с.
3. S.K. Erents, P.C. Stangeby, B. LaBombard, J.D. Elder, W. Fundamenski, Simple relations between scrape-off layer parameters of high recycling divertors Part I: The relation between 'upstream' density and temperature // Nuclear Fusion. – Vol. 40. – No. 3. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/40/3/301>
4. Орлов К.Е. Диагностика низкотемпературной плазмы: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 110 с.
5. Демидов В. И., Колоколов Н. Б., Кудрявцев А. А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. Энергоатомиздат, 1996.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд. переработанное и дополненное. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009 – 311–336 с.
7. Шотт Л. Электрические зонды. В кн. Методы исследования плазмы. Пер. с англ. Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М: Мир. 1971.
8. Shankar Bhattarai et al. Theoretical Study of Spherical Langmuir Probe in Maxwellian Plasma // International Journal of Physics. – 2017. – Vol. 5. – No. 3. – P. 73–81 <https://doi.org/10.12691/ijp-5-3-2>.
9. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. Москва: Атомиздат; 1969.
10. Установка для моделирования взаимодействия плазмы с кандидатными материалами термоядерного реактора. Патент РК на полезную модель № 2221; опубл. 15.06.2017, Бюл. № 11. М.К. Скаков, Б.К. Рахадиллов, Т.Р. Туленберген.
11. Т.Р. Туленберген, А.Ж. Миниязов, И.А. Соколов, Г.К. Кайырды, Роль имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой в исследованиях плазменно-поверхностного взаимодействия // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – №. 4. – С. 51–58.
12. Miniyaov A.Z., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Zhanbolatova G.K., Bukina O.S. et al. Investigation of tungsten surface carbidization under plasma irradiation // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2064. – P. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012053>
13. E. G. Shustin, Beam-Plasma Discharge in Space and in a Lab // Plasma Phys. Rep. – 2021. – Vol. 47. – P. 518–530. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21060143>

REFERENCES

1. Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyafov A.Zh., Kayyrdy G.K., Sitnikov A.A. Obzor po lineynym uskoritelyam // Vestnik NYaTs RK. – 2019. No. 4. – P. 59–67. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-59-67>.
2. Zhdanov S.K., KurnaeV V.A., Romanovskiy M.K., Tsvetkov I.V. Osnovy fizicheskikh protsessov v plazme i plazmennyykh ustanovkakh: Ucheb. posobie pod red. KurnaeV V.A. Moscow: MIFI, 2007. 368 p.
3. S.K. Erentsa, P.C. Stangeby, B. LaBombard, J.D. Elder, W. Fundamenski Simple relations between scrape-off layer parameters of high recycling divertors Part I: The relation between 'upstream' density and temperature // Nuclear Fusion. – Vol. 40. – No. 3. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/40/3/301>
4. Orlov K.E. Diagnostika nizkotemperaturnoy plazmy: Ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2005. 110 p.
5. Demidov V. I., Kolokolov N. B., Kudryavtsev A. A. Zondovye metody issledovaniya nizkotemperaturnoy plazmy. Energoatomizdat, 1996.
6. Rayzer Yu. P. Fizika gazovogo razryada. 3-e izd. pererabotannoe i dopolnennoe. – Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy dom "Intellekt", 2009 – 311–336 p.
7. Shott L. Elektricheskie zondy. V kn. Metody issledovaniya plazmy. Per. s angl. Pod red. V. Lokhte-Khol'tgrevena. Moscow: Mir. 1971.
8. Shankar Bhattarai et al. Theoretical Study of Spherical Langmuir Probe in Maxwellian Plasma // International Journal of Physics. – 2017. Vol. 5(3). P. 73–81. <https://doi.org/10.12691/ijp-5-3-2>
9. Kozlov O.V. Elektricheskiy zond v plazme. Moscow: Atomizdat; 1969.
10. Ustanovka dlya modelirovaniya vzaimodeystviya plazmy s kandidatnymi materialami termoyadernogo reaktora. Patent RK na poleznuyu model' No. 2221; opubl. 15.06.2017, Byul. No. 11. M.K. Skakov, B.K. Rakhadilov, T.R. Tulenbergenov.
11. T.R. Tulenbergenov, A.Zh. Miniyafov, I.A. Sokolov, G.K. Kayyrdy, Rol' imitatsionnogo stenda s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy v issledovaniyakh plazmenno-poverkhnostnogo vzaimodeystviya // Vestnik NYaTs RK. – 2019. No. 4. – P. 51–58.
12. Miniyafov A.Z., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Zhanbolatova G.K., Bukina O.S. et al. Investigation of tungsten surface carbideization under plasma irradiation // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2064. – P. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012053>
13. E. G. Shustin, Beam-Plasma Discharge in Space and in a Lab // Plasma Phys. Rep. – 2021. – Vol. 47. – P. 518–530. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21060143>

ЭЛЕКТРЛІК ЗОНДТЫ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ПЛАЗМА-СӘУЛЕЛІК ҚОНДЫРҒЫДА ЭЛЕКТРОНДЫҚ ТЕМПЕРАТУРАНЫ ЖӘНЕ ПЛАЗМА ТЫҒЫЗДЫҒЫН ӨЛШЕУ

**М. К. Скаков¹, Т. Р. Туленберенов^{2,3*}, Б. Ж. Чектыбаев², И. А. Соколов^{2,3},
А. Ж. Миниязов², Ғ. Қ. Жанболатова², Р. Ж. Наурызбаев²**

¹ *Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан*

² *ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

³ *«Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: tulenbergenov@nnc.kz

Бұл мақалада плазмалық-сәулелік қондырғыда радиалды бағытта электрон температурасы мен плазма концентрациясын өлшеу бойынша тәжірибелік деректер берілген. Плазма параметрлері екі жұмыс газы, сутегі және гелий үшін электрлік зонд негізіндегі автоматтандырылған диагностикалық жүйе арқылы анықталды. Электронның температурасы мен плазма тығыздығының электрон сәулесінің қуаты мен жұмыс газының қысымының өзгеруіне тәуелділігі анықталады. Электрондық сәуленің қуатының артуымен радиалды бағыттағы электрон температурасы екі жұмыс ортасы үшін де өзгермейтіні көрсетілген, ал қондырғыдағы максималды плазма концентрациясы центрге жақын ең жоғары газ қысымында тіркелген. сәуле және сутегі үшін $5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ және гелий үшін $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ құрады.

Түйінді сөздер: *плазмалық диагностика, плазма параметрлері, ток-кернеу сипаттамасы, электрон температурасы, плазма концентрациясы, сутегі, гелий.*

MEASUREMENT OF ELECTRON TEMPERATURE AND PLASMA DENSITY
ON A PLASMA-BEAM FACILITY USING ELECTRIC PROBE

M. K. Skakov¹, Tulenbergenov T. R.^{2,3*}, B. Zh. Chektybayev², I. A. Sokolov^{2,3},
A. Zh. Miniyazov², G. K. Zhanbolatova², R. Zh. Nauryzbaev²

¹ *National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

² *RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan*

³ *"Shakarim University" NCJSC, Semey, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: tulenbergenov@nnc.kz

This article presents experimental data on measuring the electron temperature and plasma concentration in the radial direction on a plasma-beam setup. The plasma parameters were determined using an automated diagnostic system based on an electric probe for two working gases, hydrogen and helium. The dependences of the electron temperature and plasma density on the change in the electron beam power and working gas pressure are determined. It is shown that with an increase in the power of the electron beam, the electron temperature in the radial direction does not change for both working media, and the maximum plasma concentration in the facility was recorded at the highest gas pressure closer to the center of the beam and amounted to $5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ for hydrogen and $5 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$ for helium.

Keywords: *plasma diagnostics, plasma parameters, current-voltage characteristic, electron temperature, plasma concentration, hydrogen, helium.*