

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-21-27>

УДК 533.9.082

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ

А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов^{1,2}, Ә. Ж. Қайырбекова^{1,2*}, Т. Р. Туленбергенов^{1,2}, Ғ. Қ. Жанболатова¹

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

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

В работе представлена разработка тройного зонда, состоящего из трех вольфрамовых электродов диаметром 1 мм, предназначенного для применения на плазменно-пучковой установке (ППУ). Выбраны соответствующие измерительное оборудование и электрическая схема подключения. Зонд успешно прошел пуско-наладочные испытания, в ходе которых выявлены ключевые факторы, важные для точной интерпретации результатов и интеграции в диагностическую систему ППУ. Экспериментальные измерения параметров плазмы с использованием тройного зонда показали сопоставимые результаты с одиночным зондом: температура электронов составила 7 эВ, а концентрация плазмы – 10^{16} м^{-3} . Полученные результаты эксперимента подтверждают корректную работу разработанного зонда и его применение в экспериментах вследствие простоты обработки данных по сравнению с другими видами зондов.

Ключевые слова: тройной зонд Ленгмюра, низкотемпературная плазма, диагностика плазмы, вольт-амперная характеристика, функция распределения электронов по энергиям

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) становятся все более актуальными. Этот вид генерации в будущем позволит внести существенный вклад в решение проблемы устойчивого и безопасного производства энергии для обеспечения растущего мирового спроса [1]. Токамаки и линейные плазменные установки представляют собой перспективные системы для исследований и развития УТС. Неотъемлемой частью любых исследовательских или энергетических установок в этой области является система диагностики для исследования и измерения параметров плазмы.

Параметры плазмы играют важную роль при исследовании ее поведения и взаимодействия потоков энергии от нее с поверхностью конструкционных материалов термоядерного реактора. Важность этих исследований связана с условиями работы первой стенки и дивертора в реакторе под мощным воздействием потоков энергии со стороны плазмы. Для таких исследований используются в том числе линейные плазменные установки, позволяющие моделировать воздействие на материалы стенки реактора при заданных характеристиках потока плазмы. Эти плазменные установки, или линейные симуляторы, должны удовлетворять ряду требований, а именно: высокая плотность и однородность плазмы, отсутствие примесей и возможность стационарного режима работы. Принцип работы линейных симуляторов плазмы заключается в транспортировке интенсивного электронного пучка через газ низкого давления, где в присутствии магнитного поля реализуется пучково-плазменный разряд (ППР). Плазменно-пучковая установка (ППУ) удовлетворяет всем указанным требованиям [2–3].

На линейных симуляторах активно применяются методы зондовой диагностики. Например, электрические зонды Ленгмюра позволяют определить следующие параметры плазмы: плотность электронов n_e , электронную температуру T_e , потенциал плазмы U_{pl} , плавающий потенциал U_{pl} . Помимо этого дать оценку по функции распределения электронов по энергиям [4–9]. Электрические зонды Ленгмюра применяются во многих токамаках, таких как DIII-D [10], JT-60 [11], EAST [12, 13], KSTAR [14] и W7-X [15, 16], а также на линейных установках PISCES, NAGDIS-II, PSI, ЛЕНТА, ПР-2 [17].

Чаще всего в установках используются одиночные и двойные зонды [18–21]. Электрод одиночного зонда соединяется с источником пилообразного напряжения, находится под положительным или отрицательным потенциалом относительно плазмы, тем самым измеряя зависимость тока от прикладываемого напряжения. Двойной зонд состоит из двух электродов, обычно равных по площади, которые находятся в контакте с плазмой. В этом случае измеряют ток, протекающий в плазме между электродами, в зависимости от приложенного между ними напряжения. Основной особенностью при использовании одиночных и двойных зондов является необходимость подачи развертки напряжения на зонд для получения соответствующей вольт-амперной характеристики (ВАХ).

В настоящее время для диагностики плазмы активно используется тройной зонд Ленгмюра. Его преимущество заключается в том, что нет необходимости построения ВАХ, как при использовании одиночных и двойных зондов, с помощью электрической развертки напряжения. Подходящего тройного зонда для ППУ нет. Исходя из этого, с учётом важности и актуальности работ, определена цель настоящей работы: разработать тройной зонд Ленгмюра для измерения параметров плазмы на ППУ.

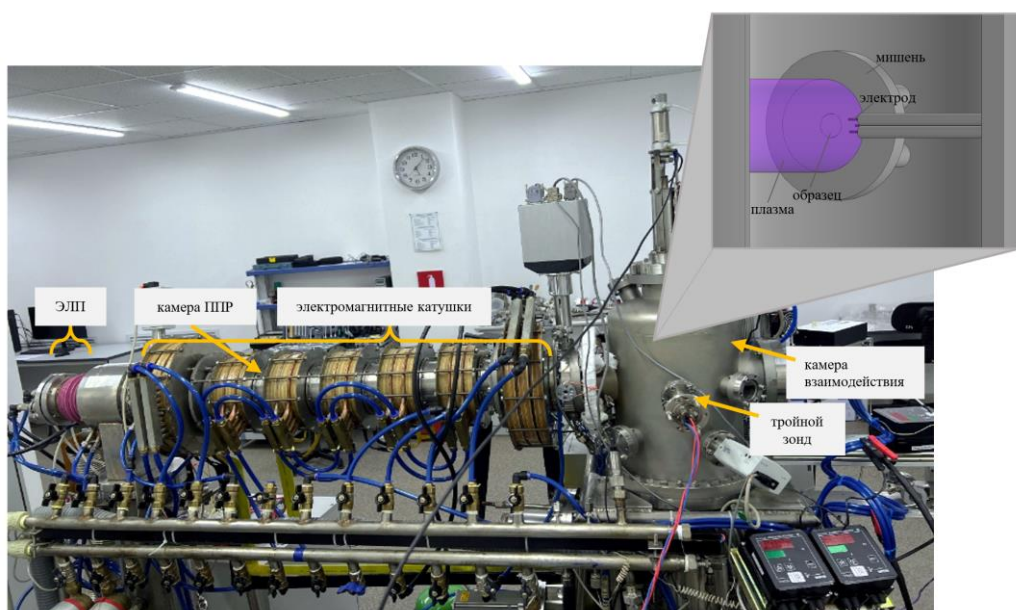


Рисунок 1. Общий вид основных элементов ППУ

Решались следующие задачи: разработать и испытать тройной зонд, который будет обеспечивать одновременные измерения температуры и концентрации электронов с возможностью пересчета электрических параметров зондовой цепи в локальные параметры плазмы через простые соотношения.

1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Облучение материала плазмой происходит в камере взаимодействия ППУ, которая имеет ряд боковых фланцев. Они, в свою очередь, позволяют проводить монтаж диагностических приборов, визуальное наблюдение и оптическую спектроскопию плазмы. На одном из боковых фланцев CF40 установлен тройной зонд, как показано на рисунке 1.

Конструкция тройного зонда

На основе аналитического обзора литературы [22–26] для разработки тройного электростатического зонда выбраны две конструкции с разным расположением электродов, показанные на рисунке 2. Выбор оптимальной конфигурации расположения электродов зонда связан с особенностями конкретной задачи. Поэтому большое внимание уделяется разработке электрических схем зондовых диагностик и расположению зонда для проведения достоверных измерений параметров плазмы. Как видно из рисунка 2, зонд состоит из трех идентичных измерительных вольфрамовых электродов определенной длины с изоляторами из керамической трубки. Материалы зонда выбраны с учетом механической прочности, температуры плавления, шероховатости поверхности и электрической проводимости. Диаметр каждого электрода составляет 1 мм, длина каждого электрода – 4 мм.

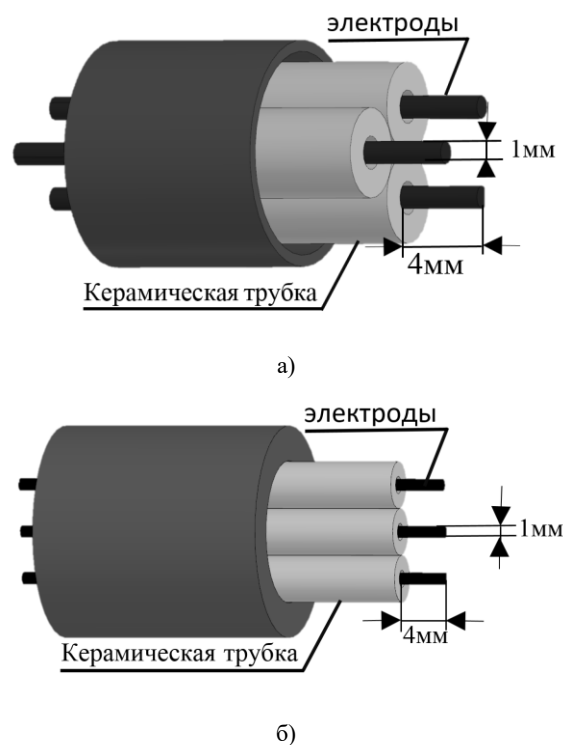
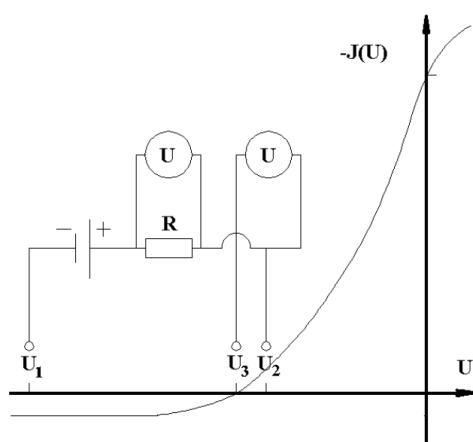


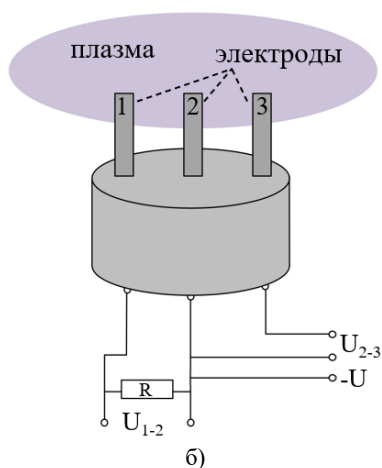
Рисунок 2. Схема измерительного участка тройного зонда с расположением электродов в виде треугольника (а) и в один ряд (б)

Схема включения зонда

Электрическая схема измерения и подключения тройного зонда представлена на рисунке 3 [26].



а)



б)

Рисунок 3. Потенциалы на электродах тройного Ленгмюровского зонда (а) и электрическая схема подключения тройного зонда (б)

Для корректного подключения тройного зонда и получения необходимых данных использовались следующие приборы и оборудование:

- блок питания КЕРСО для подачи нужного потенциала;
- резистор сопротивлением 93 Ом для ограничения тока и защиты зонда;
- осциллограф TPS2012В для регистрации сигналов тока и напряжения;
- мультиметр Uni-T для измерения значений тока и напряжения.

При использовании тройного зонда вся схема измерения должна быть заземлена. До начала эксперимента два электрода 1 и 2 находятся под постоянным потенциалом. Третий электрод оказывается под плавающим потенциалом плазмы. В результате между вторым и третьим электродами возникает разность потенциалов, равная $U_{2,3}$.

Токи, протекающие по трем электродам тройного зонда, будут равны [23]:

$$I_1 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_1}{kT_e}\right), \quad (1)$$

$$I_2 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_2}{kT_e}\right), \quad (2)$$

$$I_3 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_3}{kT_e}\right). \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_3 и U_1, U_2, U_3 – токи и потенциалы на электродах зонда; I_{e0} – электронный ток насыщения; I_{i0} – ионный ток насыщения; e – элементарный заряд, Кл; k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T_e – температура электронов, эВ.

Разделив уравнение (2) на уравнение (3), применив математические операции и учитывая, что $I_{e0} = -I_{i0}$ [23], получим выражение, по которому можно определить температуру электронов [27, 28]:

$$kT_e = \frac{eU_{2-3}}{\ln 2} = \frac{e(U_2 - U_3)}{\ln 2} = \frac{e(U_2 - U_{плав.})}{\ln 2}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T_e – температура электронов, эВ.

На основе известного значения электронной температуры из уравнения (5) вычисляется концентрация электронов [23]:

$$n_e = \frac{-I_{i0}}{eS \sqrt{\frac{eT_e}{M_i}} \left(\exp\left(\frac{U_{2-3}}{T_e}\right) - 1 \right)}, \quad (5)$$

где e – элементарный заряд, Кл; S – площадь электрода зонда, m^2 ($S = S_1 = S_2 = S_3$); M_i – масса иона, кг; T_e – температура электронов, эВ; U_{2-3} – разность потенциалов между электродами 2 и 3; I_{i0} – ионный ток насыщения. Поскольку электроды 1 и 2 имеют одинаковые значения потенциала, но с противоположными знаками, разность потенциалов между ними позволяет определить ионный ток насыщения I_{i0} в тройном зондовом методе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная часть

После монтажных работ производилось вакуумирование полостей камер ППУ форвакуумными насосами до давления 10^{-2} Торр, затем турбомолекулярными насосами до вакуума порядка 10^{-6} Торр. После достижения стационарного давления запускалась ЭЛП и электромагнитная система фокусировки ППР для формирования электронного пучка. Далее в камеры ППУ напускался водород, и установка переходила в режим ППР, генерируя плазму.

Эксперименты для водородной плазмы проводились в соответствии с условиями, описанными в таблице 1.

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ
ТРОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ**

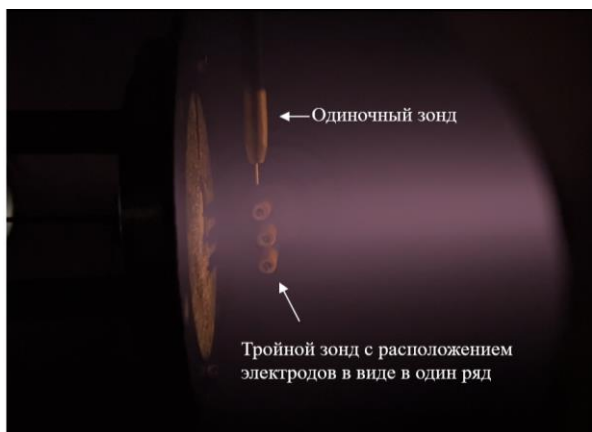
Таблица 1. Условия проведения экспериментов на ППУ в среде водорода

Параметры эксперимента	Значение
Ускоряющее напряжения, В	500–3500
Отрицательный потенциал в коллекторе, В	заземлен
Диапазон давление рабочего газа, мТорр	1–5
Диаметр электронного пучка, мм	≤5
Напряженность магнитного поля на оси ППР, Тл	0,1
Рабочий газ	H ₂
Расстояние электрода зонда от центра оси, мм	0–1

На рисунке 4 представлено расположение и процесс измерения характеристик плазмы тройного и одиночного зондов в камере взаимодействия.



а)



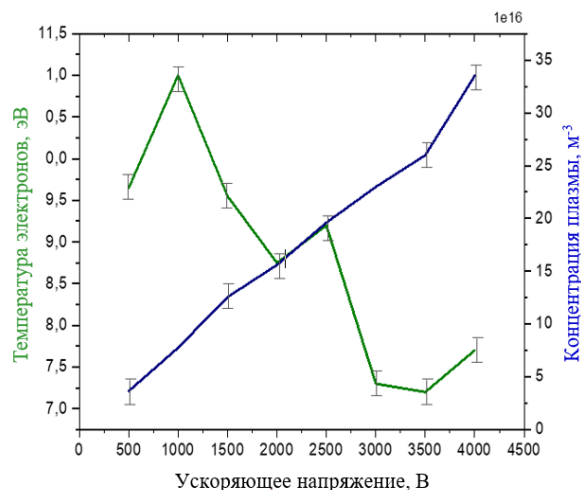
б)

Рисунок 4. Плазменный разряд с расположением электродов зонда в виде треугольника (а) и в один ряд (б)

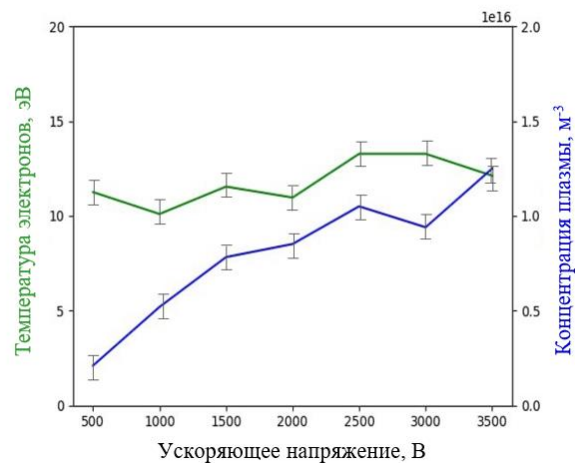
При проведении пусконаладочных работ (ПНР) на ППУ обнаружено, что конструкция тройного зонда с расположением электродов в виде треугольника (рисунок 4а) не позволила получить экспериментальные данные. Так как электроды расположены слишком близко, возник эффект взаимного влияния токов. Дальнейшие ПНР проводились с использованием тройного зонда с расположением электродов в ряд.

Анализ полученных данных

В ходе экспериментов получены зависимости параметров плазмы от напряжения ЭЛП. На рисунке 5 представлены графики, показывающие результаты измерений, выполненных с помощью одиночного (а) и тройного зонда (б).



а)



б)

Рисунок 5. Графики зависимости параметров плазмы от напряжения ЭЛП, полученные с помощью одиночного (а) и тройного зонда (б)

На рисунке 5б видно, что при увеличении напряжения с 500 В до 3500 В для давления $1,1 \cdot 10^{-3}$ в плазме значения T_e и n_e , полученные с помощью тройного зонда, увеличиваются. Рост T_e может быть обусловлен увеличением кинетической энергии электронов с повышением напряжения источника ЭЛП. Согласно теории зонда следует, что параметр n_e зависит от kT_e , т.к. при высокой температуре электроны имеют большую кинетическую энергию, что увеличивает вероятность их взаимодействия с зондом. Соответственно, чем выше температура, тем больше количество электронов с достаточной энергией для достижения зонда. Это влияет на распределение электронов и,

следовательно, на измеренные параметры плазмы, такие как плотность и ток электронов. Увеличение n_e вызвано увеличением скорости ионизации в разрядной плазме при увеличении напряжения. Это приводит к изменению тока ионного насыщения, зависящему от плотности. Таким образом, ток ионного насыщения зависит от количества ионов, которые достигают зонда. Когда концентрация плазмы (точнее электронов) увеличивается, возрастает вероятность столкновений и ионизации, что приводит к повышению количества ионов, движущихся к поверхности зонда. В результате ток ионного насыщения, который определяется количеством ионов, достигающих зонда, также увеличивается.

В результате при увеличении входной мощности в системе плазменного разряда повышается температура электронов, что приводит к большему числу ионизационных событий и, следовательно, к большей вероятности ионизации, особенно при низких давлениях газа. Ниже в таблице 2 приведены данные по T_e и n_e в условиях давления газа при постоянной мощности электронного пучка 30 Вт.

Таблица 2. Температура и концентрация электронов от давления газа при различных значениях

U, кВ	P, Торр	Одиночный зонд		Тройной зонд	
		T_e , эВ	n_e , м ⁻³	T_e , эВ	n_e , м ⁻³
2	1,3·10 ⁻³	7	1,26·10 ¹⁶	7	1,0·10 ¹⁶
2	4,4·10 ⁻³	7	3,07·10 ¹⁵	7,3	2,4·10 ¹⁵

При увеличении давления газа при постоянной входной мощности величина n_e уменьшается. Это может быть обусловлено тем, что вследствие увеличения давления газа внутри плазменной камеры плазма в разряде охлаждается, в результате чего уменьшаются сила тока ионного насыщения и плотность электронов n_e .

При высоком давлении и относительно малой входной мощности упругие столкновения могут приводить к уменьшению скорости ионизации. Также при высоком давлении высокоэнергетичный «хвост» функции распределения электронов «истощается», количество электронов с энергией, достаточной для осуществления процессов столкновительной ионизации, уменьшается, что ведет к снижению плотности электронов n_e . Это «истощение хвоста» функции распределения электронов по энергиям может быть вызвано также быстрой диффузией и рекомбинацией высокоэнергетичных электронов на стенках камеры [29, 30]. Однако во втором эксперименте значения электронной температуры и плотности, полученные в зондовых измерениях на ППУ хорошо совпадают с данными одиночного зонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы реализована конструкция тройного зонда, состоящая из трех изолированных вольфрамовых электродов диаметром 1 мм с учетом эксплуатации вакуумной техники. Так-

же произведен подбор измерительного оборудования и реализована электрическая схема включения подходящая для ППУ. На ППУ проведен монтаж разработанного зонда и пуско-наладочные работы. Необходимо отметить, что в процессе реализации задач выявлены несколько факторов (расстояние между электродами, ионизации атомов газа), которые необходимо учитывать для правильной интерпретации результатов измерений и при дальнейшем внедрении тройного зонда в диагностическую систему ППУ.

Получены первые результаты экспериментов по определению параметров плазмы методом тройного зонда. Значения электронной температуры составило 7 эВ, а концентрация плазмы 10^{16} м⁻³. Таким образом разработанный тройной зонд позволяет измерять параметры плазмы без развертки напряжения, как при использовании одиночных и двойных зондов. Это существенно упрощает процесс диагностики плазмы. Можно утверждать, что разработанный зонд функционирует корректно и будет модернизирован для проведения дальнейших экспериментальных работ.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахском материаловедческом токамаке КТМ».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>.
2. Патент РК № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК. – № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5.– 3 с. [Patent RK No. 2080. Imitatsionnyy stend s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovich D.A., Tulenbergenov T.R. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' RGP NYaTs RK. – No. 2016/0108.2; zayavl. 29.02.2016; opubl. 15.03.2017, Byul. No. 5.– 3 p. (In Russ.)]
3. Chektybayev B.Zh., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyazov A.Zh., Zhanbolatova G.K., Nuryzbayev R.Zh. Measurement of plasma parameters in the PBI using the Langmuir probe // Fusion Engineering and Design. –2024.– Vol. 205.– P. 114546. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114546>
4. Bhattarai Sh., Nath Mishra L. 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>.
5. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. Measurement of electron energy distribution in low-pressure RF discharges // Plasma Sources Science and Technology. – 1992. –Vol. 1. –P. 36. – <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/1/006>
6. Crowley B., Dietrich S.A. Langmuir probe system incorporating the Boyd–Twiddy method for EEDF measurement applied to an inductively coupled plasma source //

- Plasma Sources Science and Technology. – 2009. – Vol. 18. – P. 014010. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/1/014010>
7. Chen F.F. Langmuir probes in RF plasma: surprising validity of OML theory // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2009. – Vol. 18. – P. 035012. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/035012>
 8. Bang J.Y., Chung C.W., 2010 *Phys. Plasmas*
 9. Merlino R.L. Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics // *American Association of Physics Teachers*. – 2007. – Vol. 75. – P. 1078.
 10. Ovsyannikov A.A. Zhukov M.F. *Plasma diagnostics*. – Cambridge International Science Publishing: Cambridge, UK, 2000.
 11. Buchenauer D., Hsu W. L., Smith J. P., Hill D.N. Langmuir Probe Array for the DIII-D Divertor // *Review of Scientific Instruments*. – 1990. – Vol. 61. – P. 2873. <https://doi.org/10.1063/1.1141811>
 12. Asakura N., Shimizu K., Hosogane N., Itami K., Tsuji S., Shimada M. Recycling Enhancement with n_e and Q_{eff} in High-Density Discharges on JT-60U // *Nuclear Fusion*. – 1995. – Vol. 35. – P. 381
 13. Xu J. C. et al. Upgrade of Langmuir probe diagnostic in ITER-like tungsten mono-block divertor on experimental advanced superconducting tokamak // *Review of Scientific Instruments*. – 2016. – Vol. 87. – P. 083504. <https://doi.org/10.1063/1.4960181>
 14. Ming T. F. et al. Improvement of divertor triple probe system and its measurements under full graphite wall on EAST // *Fusion Engineering and Design*. – 2009. – Vol. 84. – P. 57. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.10.005>
 15. Bak J. G., Lee S.G., Kim J.Y. Electrical Probe Diagnostics for KSTAR // *Contributions to Plasma Physics*. – 2010. – Vol. 50. – P. 892. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201010151>
 16. Hammond K. C. et al. Drift effects on W7-X divertor heat and particle fluxes // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 2019. – Vol. 61. – P. 125001. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab4825>
 17. Pandey S., Carls A. Pop-up Langmuir probe diagnostic in the water cooled divertor of Wendelstein 7-X // *Review of Scientific Instruments*. – 2024. – Vol. 95(4). – P. 043503. <https://doi.org/10.1063/5.0188738>
 18. Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Миниязов А.Ж., Кайырды Г.К., Ситников А.А. Обзор по линейным ускорителям // *Вестник НЯЦ РК*. – 2019. – Вып. 4. – С. 59–67 [Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyazov A.Zh., Kayyrdy G.K., Sitnikov A. A. The linear accelerators review // *NNC RK Bulletin*. – 2019. Issue 4. – P. 59–67. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-59-67>
 19. Jang S. H., Kim G. H., Chung C. W. In situ method for real time measurement of dielectric film thickness in plasmas // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 107. – P. 023303.
 20. Sobolewski M. A. Measuring the ion current in high-density plasmas using radio-frequency current and voltage measurements // *J. Appl. Phys.* – 2001. – V. 90. – P. 2660–2671.
 21. Mehs D. M., Niemczyk T. M. Plasma models applicable to low pressure discharges // *Spectrochim. Acta. Pt B*. – 1981. – Vol. 36. – P. 965–971.
 22. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. [Rayzer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada*. – Dolgoprudnyy: Intellect, 2009. (In Russ.)]
 23. Qayyum A., Ahmad N., Ahmad S., Deeba F., Ali R., Hussain S. Time-resolved measurement of plasma parameters by means of triple probe // *Review of Scientific Instruments*. – 2013. – Vol. 84. – P. 123502. <https://doi.org/10.1063/1.4838658>.
 24. Naz M.Y. Ghaffar A. Double and triple Langmuir probes measurements in inductively coupled nitrogen plasma // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2011. – Vol. 114. <https://doi.org/10.2528/PIER10110309>.
 25. Chen Sin-Li., Sekiguchi T. Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe // *Journal of Applied Physics*. – 1965. – Vol. 36. – № 8. <https://doi.org/10.1063/1.1714492>
 26. Bondarenko D. et al. Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods // *Engineering Science and Technology*. – 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.015>
 27. Roussel R., Andonian G., Hansel C., Lawler G., Lynn W., Majernik N., Robles R., Sanwalka K., Wisniewski E., Rosenzweig J. Externally Heated Hollow Cathode Arc Plasma Source for Experiments in Plasma Wakefield Acceleration // *Instruments*. – 2019. – Vol. 3. – P. 48.
 28. Amrollahi R., Mirzaei H.R., Ghasemi M. Optimizing the Plasma startup through ECR plasma pre-ionization in Taban Tokamak via Triple Langmuir probe // *Fusion Engineering and Design*. – 2020. – Vol. 150. – P. 111362. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111362>
 29. Qin Y. Improved treatment of triple-probe data for determination of electron temperature // *Review of Scientific Instruments*. – 2005. – Vol. 76(11). – P. 116102. <https://doi.org/10.1063/1.2130935>
 30. Yong-ik S., Lim H. B., Houk R. S. Diagnostic studies of low-pressure inductively coupled plasma in argon using a double Langmuir probe // *J. Anal. Atom. Spectrometry*. – 2002. – Vol. 17. – P. 565–569.
 31. Itagaki N., Iwata S., Muta K., et al. Electron-temperature dependence of nitrogen dissociation in 915 MHz ECR plasma // *Thin Solid Films*. – 2003. – Vol. 435. – P. 259–263.

**ПЛАЗМАЛЫ-ШОҚТЫҚ ҚОНДЫРҒЫДА ҮШТІК ЛАНГМЮР ЗОНДЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ
ДИАГНОСТИКА ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ СЫНАУ**

А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов^{1,2}, Ә. Ж. Қайырбекова^{1,2*}, Т. Р. Туленбергенов^{1,2}, Ғ. Қ. Жанболатова¹

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ «Семей қаласындағы Шақарым атындағы университет» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

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

Жұмыста плазмалы-шоқтық қондырғыда (ПШҚ) пайдалануға арналған диаметрі 1 мм болатын үш вольфрам электродтарынан тұратын үштік зондтың құрастырылуы ұсынылған. Тиісті өлшеу жабдығы мен электрлік қосылу схемасы таңдалынды. Зонд іске қосу сынақтарын сәтті аяқтады, оның барысында нәтижелерді дәл түсіндіру және ПШҚ диагностикалық жүйесіне интеграциялау үшін маңызды негізгі факторлар анықталды. Үштік зонд арқылы плазма параметрлерін эксперименттік өлшеу дара зондпен салыстырмалы нәтижелерді көрсетті: электрон температурасы 7 эВ және плазма концентрациясы – 10^{16} м^{-3} болды. Алынған эксперименттің нәтижелері әзірленген зондтың дұрыс жұмысын және оны зондтардың басқа түрлерімен салыстырғанда деректерді өңдеудің қарапайымдылығына байланысты эксперименттерде қолдануды растайды.

Түйін сөздер: үштік Ленгмюр зонды, төмен температуралы плазма, плазмалық диагностика, вольт-амперлік сипаттама, электрон энергиясын бөлу функциясы.

**DEVELOPMENT AND TESTING OF A SYSTEM DIAGNOSTIC BASED ON
A TRIPLE LANGMUIR PROBE IN A PLASMA-BEAM INSTALLATION**

A. Zh. Miniyazov¹, I. A. Sokolov^{1,2}, A. Zh. Kaiyrbekova^{1,2*}, T. R. Tulenbergenov^{1,2}, G. K. Zhanbolatova¹

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ NP JSC “Shakarim University of Semey City”, Semey, Kazakhstan

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

The paper presents the development of a triple probe consisting of three tungsten electrodes with a diameter of 1 mm, intended for applications on a plasma beam installation (PBI). The appropriate measuring equipment and electrical wiring diagram have been selected. The probe has successfully passed the commissioning tests, during which key factors were identified that are important for accurate interpretation of the results and integration into the diagnostic system of the PBI. Experimental measurements of plasma parameters using a triple probe showed comparable results with a single probe: the electron temperature was 7 eV, and the plasma concentration was – 10^{16} m^{-3} . The experimental results obtained confirm the correct operation of the developed probe and its use in experiments due to the simplicity of data processing compared with other types of probes.

Keywords: triple probe Langmuir, low-temperature plasma, plasma diagnostics, volt-ampere characteristic, electron energy distribution function.