

Получение и диагностика импульсных плазменных потоков*А. Б. Тажен, Ж. Р. Райымханов, М. К. Досболаев, Т. С. Рамазанов*

Импульсные плазменные ускорители широко применяются для получения высокотемпературных импульсных плазменных потоков для практического и прикладного применения. Основными параметрами импульсных ускорителей плазмы являются характеристики внешней электрической и магнитной цепи, а также структурные и энергетические свойства плазменного потока. В данной работе для диагностики импульсной плазмы, полученной в ИПУ-30, были применены тройной Ленгмюровский зондовый метод, калориметрические измерения плотности энергии плазмы, пояс Роговского и высокоскоростная съемка с помощью видеокамеры Phantom VEO710S. Были определены локальные параметры плазмы, такие как температура и концентрация электронов, плотность энергии плазмы, ток плазменного шнура, а также ток разряда при изменении напряжения накопительных конденсаторов и давления воздуха. Результаты с тройного зонда и пояса Роговского представлены в виде осциллограмм. Получены изображения формирования плазмы в разрядном промежутке и измерена скорость импульсного потока плазмы.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, импульсный плазменный поток, зондовая диагностика плазмы.

Ссылка: Тажен А. Б., Райымханов Ж. Р., Досболаев М. К., Рамазанов Т. С. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 463.

Reference: A. B. Tazhen, Zh. R. Rayimkhanov, M. K. Dosbolayev, and T. S. Ramazanov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (5), 463 (2019).

Введение

В настоящее время для получения высокотемпературной и достаточно плотной плазмы широкое применение находят импульсные плазменные ускорители. Такие устройства имеют ряд особенностей, которые делают их

более значимыми, например, как источники энергетических ионов, термоядерных нейтронов, жесткого рентгеновского излучения [1]. Ввиду этого импульсные плазменные ускорители эффективно используются в различных сферах: в термоядерной энергетике для исследования взаимодействия плазмы с кандидатными материалами первой стенки [2], в промышленности для модификации поверхностей (метод импульсного плазменного осаждения [3]), а также в качестве различных источников излучения, например, рентгеновского и ультрафиолетового [4].

Взаимодействие мощных потоков плазмы и заряженных частиц с материалами стенки во время работы токамака приводит к значительному повреждению открытых поверхностей, а также к нестабильности и загрязнению плазмы. Потеря равновесия плазмы и ее срыв на стенку сопровождается эрозией материала и выбросом пылевых частиц, содержащих три-

Тажен Айгерим Бегимханкызы, м.н.с., докторант.

Райымханов Жанибек Райымханулы, м.н.с., магистрант.

Досболаев Мерлан Кылышулы, в.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

Рамазанов Тлеккабул Сабитович, гл.н.с., профессор, д.ф.-м.н.

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики (НИИЭТФ).

Казахстан, 050040, г. Алматы, аль-Фараби, 71.

E-mail: aigerim_tzh@mail.ru, zhanikkaznu@gmail.com,

merlan@physics.kz, ramazan@physics.kz

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2019 г.

© Тажен А. Б., Райымханов Ж. Р., Досболаев М. К., Рамазанов Т. С., 2019

тий и активированный материал стенки [5]. Поэтому возникает необходимость периодической замены стенки. Остановка реактора снижает коэффициент использования установленной мощности и ухудшает экономические показатели. В работе [6] представлены хорошие обзорные экспериментальные работы и результаты численного моделирования по образованию и транспортировке пыли, а также по оценке роли пыли в современных термоядерных установках. Как показывают результаты сканирующей электронно-силовой микроскопии, пылевые частицы, извлеченные из объема реактора, в некоторых случаях имеют сферическую форму, либо накапливаются в виде кластеров, образованных из мелких пылевых частиц. Размеры таких частиц варьируются от нескольких сотен нанометров до нескольких десятков микрометров. Подобные многочисленные исследования проводятся по изучению эрозии материалов и образованию пыли в современных термоядерных установках [7–9]. Импульсные плазменные ускорители являются подходящими экспериментальными испытательными стендами, обеспечивающими реалистичную среду для моделирования процессов, протекающих в объеме современных токамаков. Плазменный ускоритель способен производить плазму с плотностью энергии $100\text{--}500 \text{ Дж/см}^2$. Такая энергия достигается потоком плазмы со скоростью $10\text{--}10^3 \text{ км/с}$. Параметры плазмы полностью соответствуют требованиям, ожидаемых в ИТЭР.

Еще одна сфера применения импульсных плазменных ускорителей относится к плазменной поверхностной инженерии. Метод осаждения слоев легкоплавких материалов с использованием импульсной плазмы получил название «Импульсное плазменное осаждение» [10]. Данный метод эффективен, в частности, для получения различных покрытий. Преимуществами импульсных методов являются увеличение внутренней энергии термодинамической системы, достижение высокой степени ионизации плазмы при синтезе, улучшение морфологии осажденных пленок [11].

Также следует отметить, что, по сравнению со стационарной плазмой, в импульсной

плазме процессы энергетического обмена протекают в течение короткого времени, таким образом, это позволяет продуктам синтеза быстро охлаждаться на сухом субстрате. Из этого следует, что синтез происходит внутри самой плазмы. К примеру, в работе [3] методом импульсного плазменного осаждения на медной подложке были получены слои нитрида алюминия AlN. Метод импульсного плазменного осаждения еще полностью не изучен, поэтому имеется множество исследований в этом направлении. К примеру, с помощью данного метода в работе [12] были получены пленки нитрида титана, которые обладают высокой твердостью. В работе [13] импульсный плазменный ускоритель применялся при изготовлении полупроводниковых наноструктур из пористого арсенида галлия (GaAs). Изучено влияние быстрого термического отжига на указанные свойства пористого нано-GaAs.

Сведения об основных параметрах импульсной плазмы представляют большой интерес в экспериментальном моделировании и исследовании процессов, в частности, взаимодействия высокотемпературных потоков плазмы с поверхностью материала. Основными параметрами плазменных ускорителей являются характеристики внешней электрической и магнитной цепи, а также структурные и энергетические свойства плазменного потока. В связи с этим в данной работе была проведена комплексная диагностика импульсного потока плазмы в экспериментальной установке ИПУ-30.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка ИПУ-30 представляет собой коаксиальный плазменный ускоритель [14, 15]. Питание ускорителя осуществляется конденсаторными батареями с общей емкостью 1,44 мФ. Плазма образуется и ускоряется между двумя коаксиальными концентрическими электродами, к которым подается высоковольтное напряжение через коммутирующее устройство в виде вакуумного разрядника. Диаметры внутреннего электрода – 55 мм, внешнего – 108 мм. Ускорение плазмы к выходу канала ускорителя происходит за счет продольной силы Ампера, которая

возникает, когда радиальная составляющая объемного тока в межэлектродном пространстве взаимодействует с собственным азимутальным магнитным полем.

Время жизни плазменного шнура в канале коаксиального ускорителя порядка 300 мкс. Рабочее напряжение ускорителя 3–6,5 кВ. Установка была собрана в Институте экспериментальной и теоретической физики (Казахстан, Алматы) в лаборатории пылевой плазмы и плазменных технологий специально для экспериментального моделирования эрозии материалов под воздействием высокотемпературной импульсной плазмы [16–18]. Принципиальная схема коаксиального ускорителя ИПУ-30 показана на рис. 1.

риментальной и теоретической физики (Казахстан, Алматы) в лаборатории пылевой плазмы и плазменных технологий специально для экспериментального моделирования эрозии материалов под воздействием высокотемпературной импульсной плазмы [16–18]. Принципиальная схема коаксиального ускорителя ИПУ-30 показана на рис. 1.

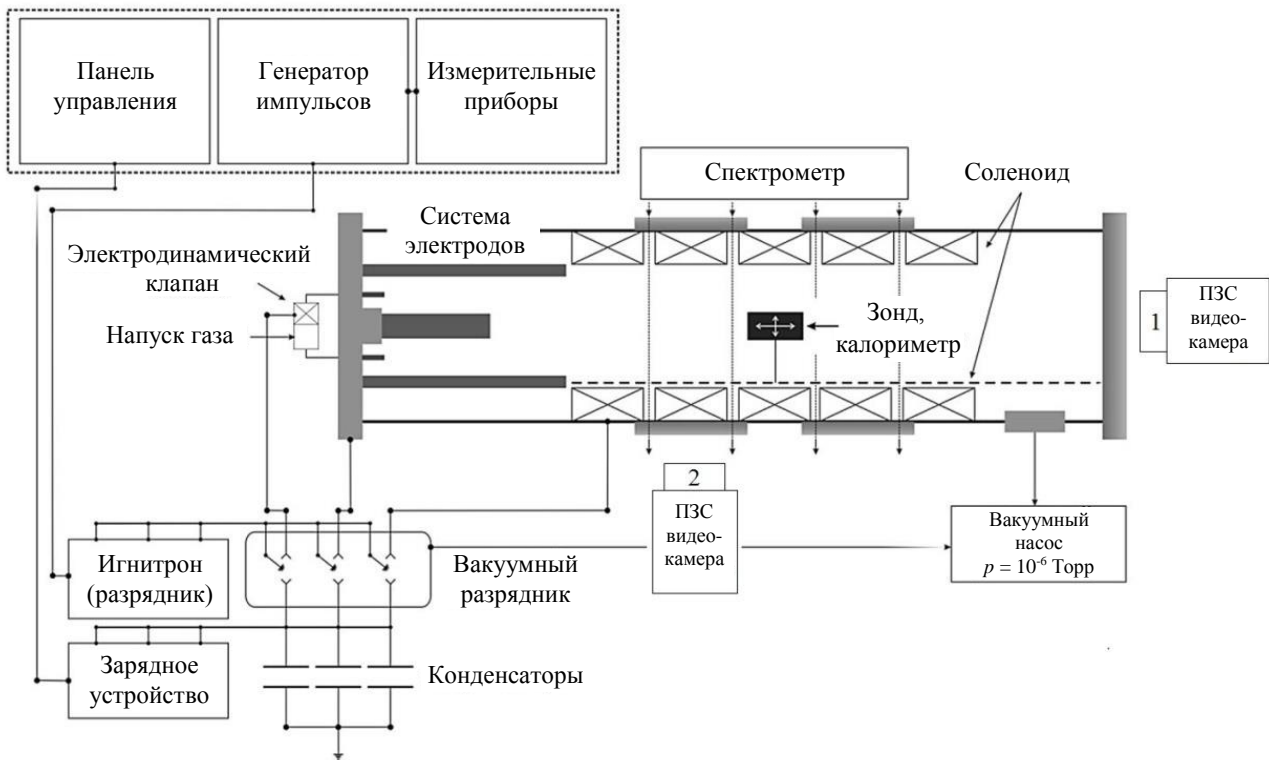


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного плазменного ускорителя.

Результаты и обсуждения

Диагностика импульсного плазменного потока включает тройной электрический зонд Ленгмюра, пояс Роговского, проволочный калориметр, высокоскоростную съемку с помощью камеры PhantomVEO710S. Пояс Роговского был использован для измерения разрядного тока и тока плазменного шнура при различных значениях напряжения на накопительных конденсаторах. Измерительная тороидальная катушка состояла из 415 витков (для измерения тока плазменного шнура применялся пояс Роговского с 94 витками). Концы витков были замкнуты на резисторе с сопротивлением 1,3 Ом. Падение напряжения на сопротивлении измерялось с помощью цифрового запоминающего осциллографа

LeCroy-354A. В качестве примера на рис. 2 показана осциллограмма тока, полученная в ИПУ-30.

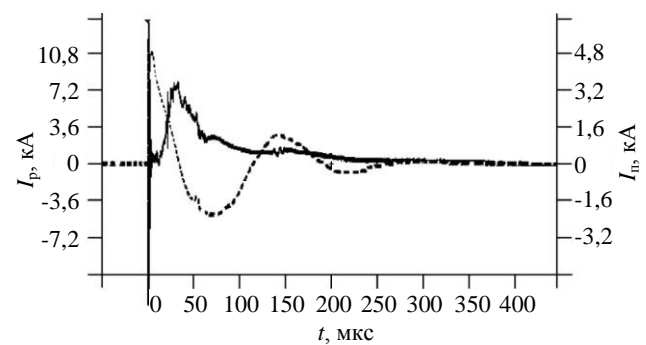


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с пояса Роговского при давлении воздуха 0,02 Торр: сплошная линия – ток плазменного шнура, пунктирная – ток разряда. Шкала для тока разряда указана слева, для тока плазменного шнура указана справа.

Сигнал, регистрируемый поясом, представляет собой затухающую синусоиду. На основании подобных осциллограмм по максимальной амплитуде затухающего сигнала была построена вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда при фиксированном остаточном давлении воздуха в вакуумной камере ускорителя на уровне 0,02 Торр (рис. 3).

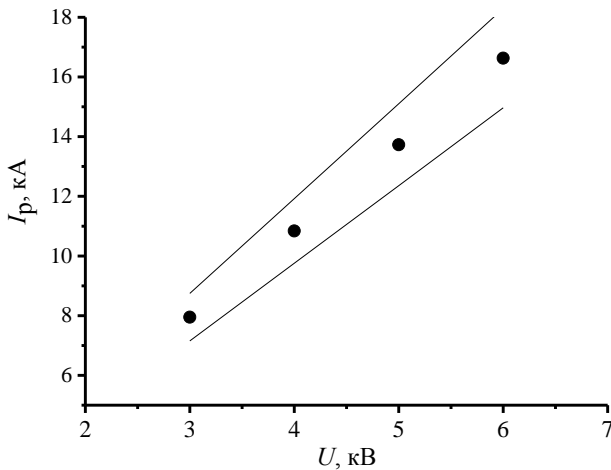


Рис. 3. Зависимость тока разряда от напряжения на конденсаторах.

Можно видеть (см. рис. 3), что ток разряда линейно увеличивается с увеличением напряжения на конденсаторах, то есть подчиняется закону Ома, что свидетельствует об отсутствии эффекта скольжения тока в данном ускорителе.

Результаты по плотности энергии импульсного плазменного потока были получены с использованием проволочного калориметра [19], состоящего из нихромовых проволочек диаметром 340 мкм, натянутых на круглую раму из фторопласта. Калориметр располагался на расстоянии 15 см от торца внешнего электрода ускорителя на пути плазменного потока. Измерение плотности энергии импульсной плазмы происходит следующим образом: когда плазменный поток проходит через проволочки, то они нагреваются и их сопротивление увеличивается. Зная изменение сопротивления проволочек, можно рассчитать количество теплоты, поглощенное проволочками и, соответственно, плотность энергии. Для того чтобы измерить изменение сопротивления проволочек, калориметр подключается в электрическую цепь, где имеются изме-

рительный резистор $R_{ш}$ и батарея на 1,5 В (см. рис. 4).

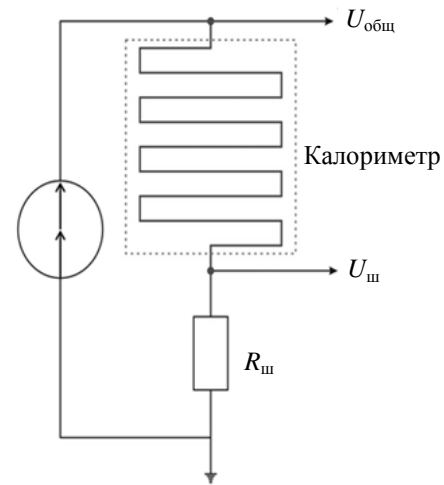


Рис. 4. Электрическая схема подключения калориметра.

Нагрев проволочек сопровождается изменением их удельного сопротивления, которое можно записать в линейном приближении как $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Здесь ρ_0 есть удельное сопротивление проволочек до нагрева, α есть температурный коэффициент сопротивления, а ΔT показывает изменение температуры материала после ее нагрева. Таким образом, зная ΔT , можно найти количество теплоты, поглощаемое проволочками, по формуле $Q = \int c\rho_m S \Delta T(l) dl$ (ρ_m плотность материала, из которого сделаны проволочки) получаем формулу (1). Далее можно уже вычислить плотность энергии плазменного потока:

$$\omega = \frac{c\rho_{\text{них}} S^2}{\alpha\rho_0 S_{\text{пр}}} \Delta R, \quad (1)$$

где ω – плотность энергии плазмы, c – теплоемкость нихрома, $\rho_{\text{них}}$ – плотность нихрома, S – площадь поперечного сечения нихромовой проволочки, α – температурный коэффициент сопротивления нихрома, ρ_0 – удельное сопротивление нихрома до нагрева, $S_{\text{пр}}$ – площадь продольного сечения всех проволочек.

Измерения плотности энергии импульсного плазменного потока проводились при двух различных напряжениях накопительного конденсатора, а именно, 3 кВ и 4 кВ. Один из сигналов на измерительном резисторе, полученный при 3 кВ, показан на рис. 5.

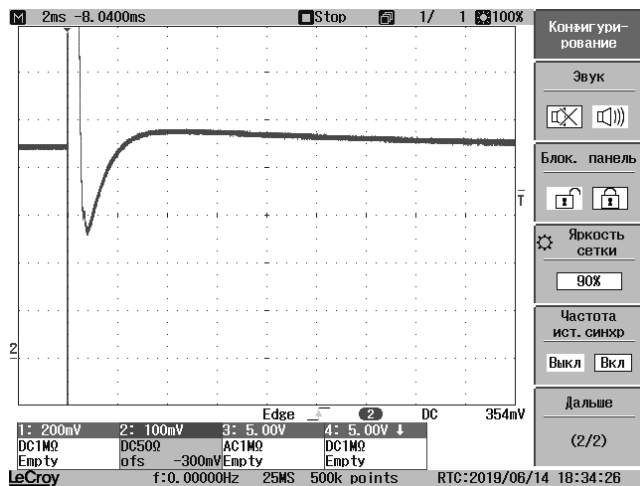


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на измерительном резисторе, при 3 кВ. Масштаб на осциллограмме установлен 0,1 В/дел и 2 мс/дел.

На основе полученных осциллограмм и по формуле (1) были рассчитаны плотности энергии плазмы, которые составили 175 Дж/см² при напряжении на конденсаторах 3 кВ и 328 Дж/см² при напряжении на конденсаторах 4 кВ. Как показывают эти результаты, с увеличением напряжения на конденсаторах увеличивается плотность энергии плазмы, что обусловлено увеличением кинетической энергии плазмы. На осциллограмме можно выделить несколько областей: в начале, когда плазма отсутствует, напряжение на измерительном резисторе с течением времени остается постоянным; после того, как зажигается плазма (приблизительно около 400 мкс), на осциллограмме появляется скачок напряжения в цепи калориметра, что обусловлено влиянием заряженных частиц плазмы на неизолированные проволоки (время, за которое наблюдается сильное отклонение напряжения, соответствует времени жизни плазменного сгустка); после этого напряжение на измерительном резисторе уменьшается, так как после прохождения плазмы через проволоочки они нагреваются, то есть сопротивление проволоочного калориметра изменяется и это приводит к снижению напряжения на измерительном резисторе. В расчетах учитывается падение напряжения после воздействия плазмы, которое соответствует нагреву проволок, а не скачку напряжения в цепи калориметра.

В нестационарных плазменных средах, в которых процессы протекают за очень короткие промежутки времени, для определения локальных параметров плазмы, таких как тем-

пература электронов и электронная плотность, широко применяются тройные электрические зонды Ленгмюра [20]. Преимущество использования тройных электрических зондов в импульсном плазменном ускорителе ИПУ-30 зачастую заключается в том, что нет необходимости построения ВАХ как в обычных одиночных и двойных зондах. С помощью тройного зонда проводится прямое измерение, т. е. без дополнительной развертки напряжения. Такой метод определения локальных параметров плазмы оказывается достаточно простым. Принципиальная схема тройного электрического зонда показана на рис. 6.

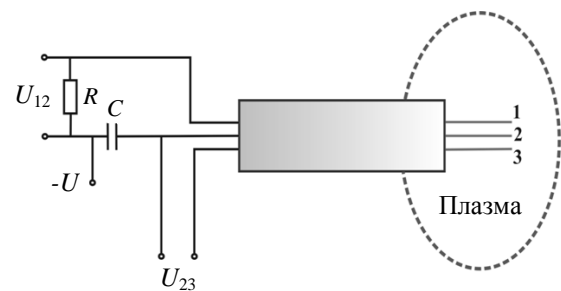


Рис. 6. Электрическая схема подключения тройного зонда.

Тройной зонд состоит из трех графитовых электродов, каждый диаметром 0,5 мм. В ходе эксперимента тройной зонд помещался на пути потока, причём расположение тройного зонда было зафиксировано через боковое окошко ускорителя (см. рис. 7). Когда плазма достигает кончика электрода 3, электрод начинает приобретать потенциал плазмы (плавающий потенциал). До начала экспериментов другие два электрода 1 и 2 смещаются постоянным потенциалом. Потенциал одного зонда, к которому притягиваются электроны, берется таким, что по нему потечет ток, равный по значению, но обратный по знаку относительно зонда, к которому притягиваются ионы.

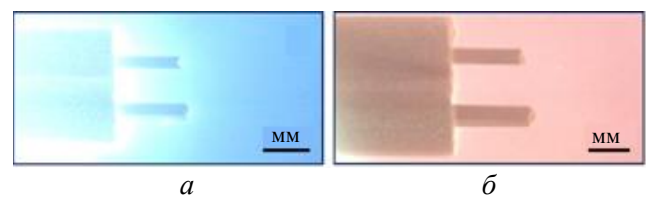


Рис. 7. Тройной электрический зонд, помещенный в плазму: а) тройной зонд взаимодействует с хвостом плазменного сгустка, б) после воздействия. Ускорение плазменного потока происходит в направлении справа налево.

Когда электрод 3 приобретет потенциал плазмы (отрицательный или положительный), который называют еще «плавающим потенциалом», между электродами 2 и 3 появляется разность потенциалов, равная по величине U_{23} . С помощью этой разности потенциалов определяется температура электронов (в энергетических единицах) по следующему выражению:

$$kT_e = \frac{eU_{23}}{\ln 2}. \quad (2)$$

По известному значению электронной температуры и на основе формулы (3) определяется концентрация электронов:

$$n_e = \frac{-I}{0,61Ae\sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}} \times \frac{\exp\left(-\frac{eU_{23}}{kT_e}\right)}{\left(1 - \exp\left(-\frac{eU_{23}}{kT_e}\right)\right)}, \quad (3)$$

где A – площадь поверхности электрода, m_i – масса иона, e – заряд электрона, I – ток насыщения ионов. Так как электроды 1 и 2 имеют одни и те же значения потенциала, но противоположные по знаку, через разность потенциалов между электродами 1 и 2 тройного зонда можно найти ток насыщения ионов I .

Эксперимент проводился при давлении воздуха 0,02 Торр, поэтому для определения

концентрации электронов учитывается атомная масса иона азота. Как уже говорилось выше, тройной электрический зонд позволяет проводить прямые измерения, которые позволяли получать результаты о температуре электронов и их концентрации в одном «выстреле». На рис. 8 приведены соответствующие данные в единицах эВ и м^{-3} .

С помощью высокоскоростной камеры PhantomVEO710S нами была рассчитана скорость импульсного плазменного потока и получены кадры образования токовой (плазменной) перемычки газового разряда между электродами при подаче высоковольтного напряжения и ускорения плазмы вдоль вакуумной камеры. Соответствующие кадры представлены на рис. 9 и 10.

Получена мгновенная картинка эволюции заполнения межэлектродных секторов плазмой, сильно светящаяся кольцеобразная область (см. рис. 9, б). Далее плазма ускоряется и выходит за пределы межэлектродного пространства (см. рис. 9, в и рис. 9, е). Время жизни плазмы в межэлектродном пространстве составляет приблизительно 21 мкс. За это время на плазму действует сила Ампера, а также плазма сильно нагревается, что достаточно для создания большого температурного градиента и, следовательно, давления (плотности). Это приводит к появлению дополнительной силы ускорения плазмы.

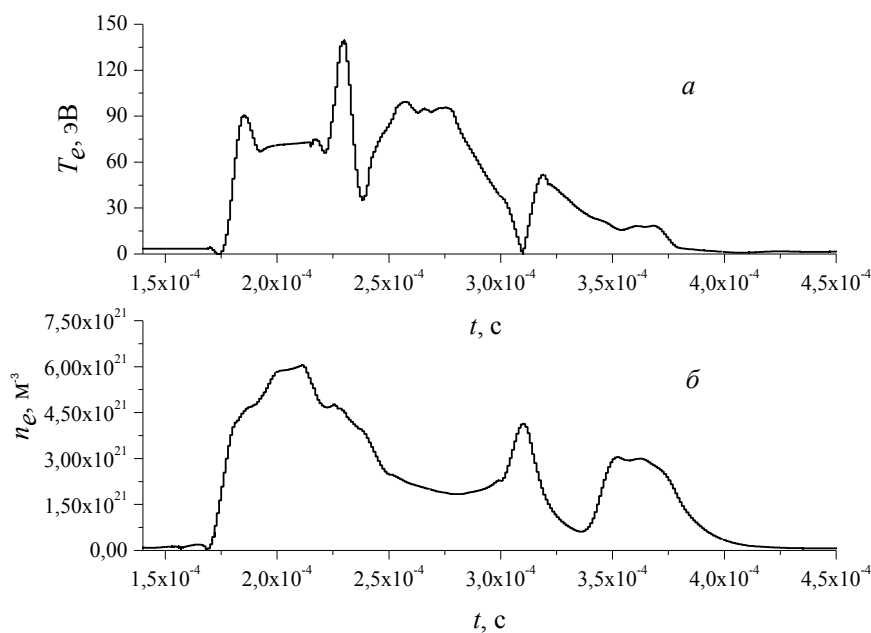


Рис. 8. Экспериментальные данные по электронам в плазменном потоке в одном выстреле: а) температура электронов; б) концентрация.

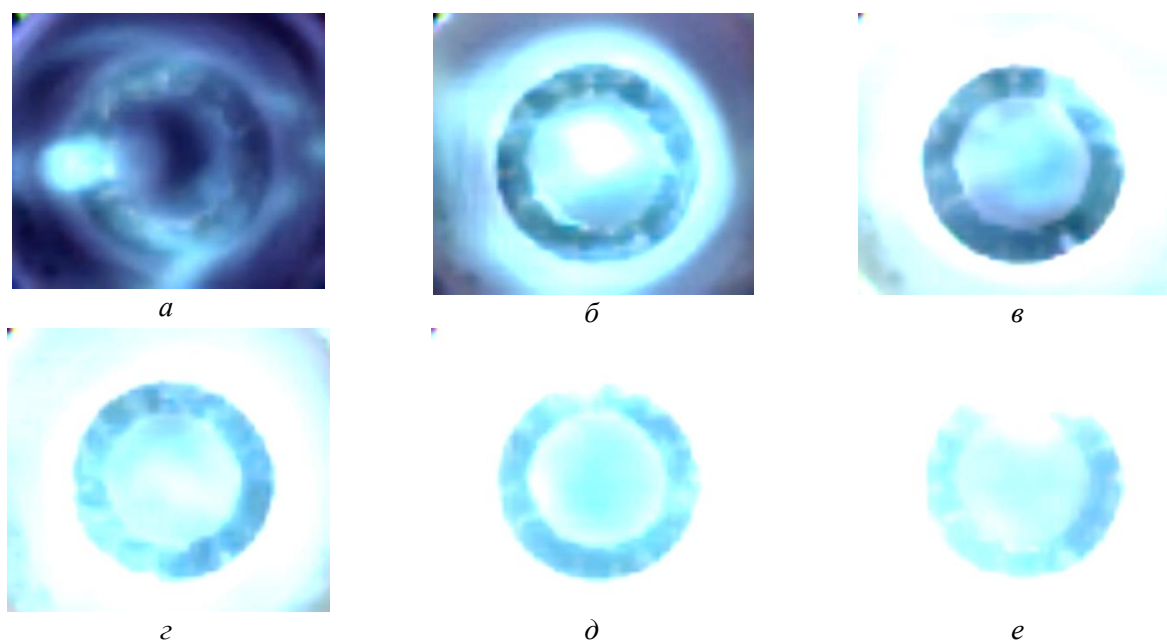


Рис. 9. Образование и развитие токовой (плазменной) перемычки газового разряда между электродами ИПУ (изображения получены ПЗС камерой в положении 1): а – 3,5 мкс; б – 7 мкс; в – 10,5 мкс; г – 14 мкс; д – 17,5 мкс; е – 21 мкс. Напряжение на электродах 4 кВ. Наружный контур черного круга на рисунках соответствует диаметру внутреннего электрода и составляет 50 мм.

Ускорение плазменного потока по оси реактора наблюдалось через боковое окошко. Получены мгновенные фотографии ускоряющейся плазмы с боковой стороны (см. рис. 10).

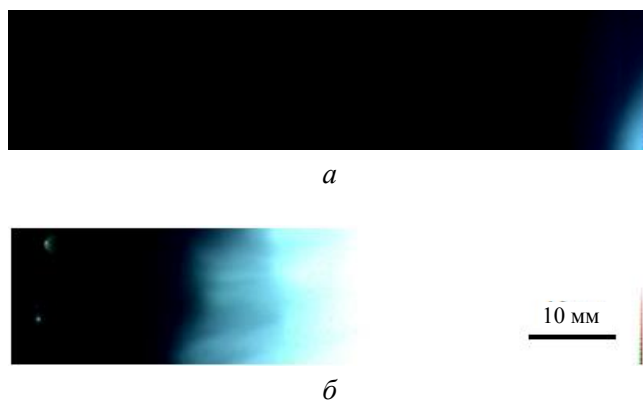


Рис. 10. Мгновенная фотография ускоряющейся плазмы (изображения получены ПЗС камерой в положении 2): а – момент появления плазмы; б – образование плазменного шнура и ускорение плазмы. Скорость кадров 510000 кадр/с, время экспозиции 1,5 мкс, время между кадрами 1,96 мкс.

По двум изображениям плазмы, когда время и длина пройденного пути известны, нами была определена скорость плазменного потока, которая составила 26,6 км/с.

Заключение

В импульсном плазменном ускорителе ИПУ-30 проведена диагностика импульсного потока плазмы с помощью тройного электрического зонда, пояса Роговского, калориметра и высокоскоростной камеры PhantomVEO710S. Получены электрические характеристики плазменного шнура и разряда и определены плотности энергии импульсной плазмы при разных значениях напряжения накопительного конденсатора и давления воздуха. С помощью тройного электрического зонда Ленгмюра были определены локальные параметры импульсной плазмы, такие как температура и концентрация электронов в потоке.

С использованием высокоскоростной камеры PhantomVEO710S получены мгновенные фотографии образования плазменной перемычки в межэлектродном пространстве и ускорения плазмы. По двум кадрам была определена скорость импульсного потока плазмы, которая составила 26,6 км/с.

Работа выполнена при поддержке
Министерства образования и науки
Республики Казахстан в рамках гранта ИРН
AP05134671.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sadeghi H., Amrollahi R., Zare M., Fazelpour S. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. Vol. 59. P. 125006.
2. Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I., Linke J., Loarte A., Merola M., Podkovyrov V., Federici G., Bazylev B., Pestchanyi S., Safronov V., Hirai T., Maynashev V., Levashov V. // Journal of Nuclear Materials. 2007. Vol. 363–365. P. 301.
3. Nowakowska-Langier K., Zdunek K., Chodun R., Okrasa S., Kwiatkowski R., Malinowski K., Skladnik-Sadowska E., Sadowski M. // Phys. Scr. 2014. Vol. 161. P. 014063.
4. Jain J., Moreno J., Avila R., Avaria G., Pavez C., Bora B., Davis S., Soto L. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 720. No. 1. P. 012048.
5. Smirnov V. P. Ros. Chemical Journal. (J. Ros. Chemical Society of D. I. Mendeleev). 2008. Vol. 6. P. 79.
6. Krashennnikov S. I., Smirnov R. D., Rudakov D. L. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. Vol. 53. P. 083001.
7. Fortuna-Zalešna E., Weckmann A., Grzonka J., Rubel M., Esser H.G., Freisinger M., Kreter A., Sergienko G., Ström P. // Physica Scripta. 2016. Vol. 167. P. 014059.
8. Fortuna-Zale E., Grzonka J., Rubelc M., Garcia-Carrasco A., Widdowson A., Baron-Wiechec A., Ciupinski L. // Nuclear Materials and Energy. 2017. Vol. 12. P. 582.
9. Autricquea A., Hong S. H., Fedorczak N., Son S. H., Lee H. Y., Song I., Choec W., Grisolia C. // Nuclear Materials and Energy. 2017. Vol. 12. P. 599.
10. Zdunek K. // Surface & Coatings Technology. 2017. Vol. 201. P. 4813.
11. Chodun R., Nowakowska-langier K., Zdunek K. // Materials Science-Poland. 2016. Vol. 34. No. 3. P. 523.
12. Zeb S., Qayyum A., Shafiq M., Zakaullah M. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2008. Vol. 42. P. 145.
13. Mangla O., Roy S., Ostrikov K. // Nanomaterials. 2016. Vol. 1. P. 13.
14. Dosbolayev M., Raiymkhanov Zh., Tazhen A., Ramazanov T. // IEEE Trans. on plasma science. 2019. Vol. 7. P. 3047.
15. Tazhen A., Utegenov A., Dosbolayev M., Ramazanov T., Kaikanov M. I., Tikhonov A. V. // J. Peos. 2016. Vol. 18. P. 40.
16. Tazhen A. B., Dosbolayev M. K., Utegenov A. U., Raiymkhanov Zh. R., Ramazanov T. S. ESCAMPIG XXIV – Glasgow, Scotland, 2018.
17. Dosbolayev M. K., Utegenov A. U., Tazhen A. B., Ramazanov T. S., Gabdullin M. T. News Nat. Acad. Sci. Republic Kazakhstan. 2016. Vol. 310. P. 59.
18. Dosbolayev M. K., Utegenov A. U., Tazhen A. B., Ramazanov T. S. // Laser and Part. Beams. 2017. Vol. 4. P. 741.
19. Киреевко А. В., Мурахтин С. В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Т. 1. С. 26.
20. Borthakur S., Talukdar N., Neog N. K., Borthakur T. K. // Fusion Engineering and Design. 2017. Vol. 122. P. 131.

PACS: 52.58.Lq

Generation and diagnostics of pulse plasma flows

A. B. Tazhen, Zh. R. Rayimkhanov, M. K. Dosbolayev, and T. S. Ramazanov

Institute of Experimental and Theoretical Physics, al-Farabi Kazakh National University
71 al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan

Received September 13, 2019

Pulsed plasma accelerators are widely used for production high-temperature pulsed plasma flows for fundamental and practical applications. The basic parameters of pulsed plasma accelerators are the characteristics of the external electric and magnetic circuits, and so are the structural and energy properties of a plasma flow. This work aimed to characterize a pulsed plasma accelerator of IPU-30. In this regard, the triple Langmuir probe method, calorimetric plasma energy density measurements, Rogowski belt, and high-speed visible imaging with a Phantom VEO710S fast camera were used to diagnose pulsed plasma obtained in IPU-30. The local plasma parameters such as electron temperature and density, energy density of pulsed plasma flow, pulsed plasma current, and also discharge current have experimentally been obtained at different discharge voltage and pressure of air in the chamber. The typical waveforms of triple probe and Rogowski coil are presented in the form of oscillograms. The images of plasma formation in the discharge gap were obtained and the velocity of a pulsed plasma flow was measured.

Keywords: pulsed plasma accelerator, pulsed plasma flow, probe plasma diagnostics.

REFERENCES

1. H. Sadeghi, R. Amrollahi, M. Zare, and S. Fazel-pour, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59**, 125006 (2017).
2. A. Zhitlukhin, N. Klimov, I. Landman, J. Linke, A. Loarte, M. Merola, V. Podkovyrov, G. Federici, B. Bazylev, S. Pestchanyi, V. Safronov, T. Hirai, V. Maynashev, and V. Levashov, *Journal of Nuclear Materials* **363–365**, 301 (2007).
3. K. Nowakowska-Langier, K. Zdunek, R. Chodun, S. Okrasa, R. Kwiatkowski, K. Malinowski, E. Składnik-Sadowska, and M. Sadowski, *Phys. Scr.* **161**, 014063 (2014).
4. J. Jain, J. Moreno, R. Avila, G. Avaria, C. Pavez, B. Bora, S. Davis, and L. Soto, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **720** (1), 012048 (2018).
5. V. P. Smirnov, *Ros. Chemical Journal. (J. Ros. Chemical Society of D. I. Mendeleev)* **6**, 79 (2008).
6. S. I. Krashennikov, R. D. Smirnov, and D. L. Rudakov, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 083001 (2011).
7. E. Fortuna-Zaleśna, A. Weckmann, J. Grzonka, M. Rubel, H. G. Esser, M. Freisinger, A. Kreter, G. Sergienko, and P. Ström, *Physica Scripta* **167**, 014059 (2016).
8. E. Fortuna-Zale, J. Grzonka, M. Rubel, A. Garcia-Carrasco, A. Widdowson, A. Baron-Wiechec, and L. Ciupinski, *Nuclear Materials and Energy* **12**, 582 (2017).
9. A. Autricquea, S. H. Hong, N. Fedorczak, S. H. Son, H. Y. Lee, I. Song, W. Choec, and C. Grisolia, *Nuclear Materials and Energy* **12**, 599 (2017).
10. K. Zdunek, *Surface & Coatings Technology* **201**, 4813 (2017).
11. R. Chodun, K. Nowakowska-langier, and K. Zdunek, *Materials Science-Poland* **34** (3), 523 (2016).
12. S. Zeb, A. Qayyum, M. Shafiq, and M. Zakauallah, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **42**, 145 (2008).
13. O. Mangla, S. Roy, and K. Ostrikov, *Nanomaterials* **1**, 13 (2016).
14. M. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, A. Tazhen, and T. Ramazanov, *IEEE Trans. on plasma science* **7**, 3047 (2019).
15. A. Tazhen, A. Utegenov, M. Dosbolayev, T. Ramazanov, M. I. Kaikanov, and A. V. Tikhonov, *J. Peos.* **18**, 40 (2016).
16. A. B. Tazhen, M. K. Dosbolayev, A. U. Utegenov, Zh. R. Raiymkhanov, and T. S. Ramazanov, *ESCAMPIG XXIV* (Glasgow, Scotland, 2018).
17. M. K. Dosbolayev, A. U. Utegenov, A. B. Tazhen, T. S. Ramazanov, and M. T. Gabdullin, *News Nat. Acad. Sci. Republic Kazakhstan* **310**, 59 (2016).
18. M. K. Dosbolayev, A. U. Utegenov, A. B. Tazhen, and T. S. Ramazanov, *Laser and Part. Beams* **4**, 741 (2017).
19. A. V. Kireenko and S. V. Murakhtin, *Vopr. At. Nauki Tekh., Ser. Termoyad. Sintez* **1**, 26 (2008).
20. S. Borthakur, N. Talukdar, N. K. Neog, and T. K. Borthakur, *Fusion Engineering and Design* **122**, 131 (2017).