

ИНЖЕКТОРЫ ПЛАЗМЫ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ  
ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ© 2019 г. В. В. Стальцов<sup>а,\*</sup>, В. А. Махлай<sup>а</sup>, В. В. Чеботарёв<sup>а</sup>, Н. В. Кулик<sup>а</sup><sup>а</sup> Институт физики плазмы Национального научного центра  
“Харьковский физико-технический институт” НАН Украины  
Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

\*e-mail: staltsov@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 12.12.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Описаны импульсные инжекторы плазмы: “входная ионизационная камера” (“в.и.к.”), “анодная ионизационная камера” (“а.и.к.”) и инжектор плазмы высокого давления. Инжекторы плазмы предназначены для генерации первичной плазмы в квазистационарных плазмодинамических системах большой мощности, в частности в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе КСПУ Х-50. Представлены результаты исследований основных характеристик плазмы импульсных инжекторов. Получены разрядные токи в плазме: для инжектора “а.и.к.” – 23.5 кА при напряжении 3 кВ, для инжектора “в.и.к.” – 90 кА при напряжении 0.65 кВ, для инжектора плазмы высокого давления – 96 кА при напряжении 3 кВ.

DOI: 10.1134/S0032816219030261

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с созданием экспериментальных термоядерных реакторов ITER и DEMO особую важность приобрела задача выбора материалов для их энергетически наиболее нагруженных элементов конструкции. Модельные эксперименты по исследованию взаимодействия плазмы с высоким содержанием энергии с поверхностью различных материалов проводятся на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе КСПУ Х-50 Института физики плазмы ННЦ “Харьковский физико-технический институт” [1–4].

На этом ускорителе получены потоки плазмы, близкие по своим параметрам к ожидаемым в термоядерных реакторах: плотность энергии в потоке 2 кДж/см<sup>2</sup>, общее содержание энергии в потоке 520 кДж при длительности импульса 270 мкс [5–7]. Таких параметров плазмы удалось достичь благодаря согласованной и оптимизированной работе системы таких плазменных инжекторов, как “входная ионизационная камера” (“в.и.к.”) и “анодная ионизационная камера” (“а.и.к.”), которые генерируют первичную плазму и подают ее в основной ускорительный канал КСПУ Х-50. Каждый из инжекторов решает свои специфические задачи, поэтому они отличаются конструктивно и по своей компоновке в ускорителе.

## КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА КСПУ Х-50

Основной особенностью генерации плазменных потоков с большим содержанием энергии в квазистационарном плазменном ускорителе является осуществление ускорительного процесса в режиме “ионного токопереноса” [8]. Существенными физическими явлениями, препятствующими генерации плазменных потоков с высоким содержанием энергии, являются неустойчивость зоны ионизации и прианодный скачок потенциала. Прианодный скачок потенциала возникает

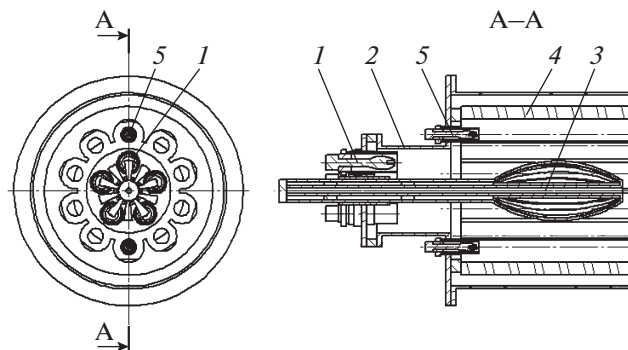
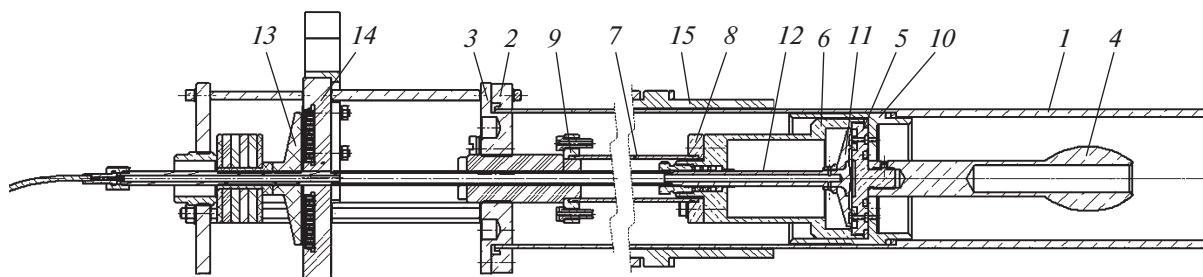


Рис. 1. Конструктивная схема квазистационарного плазменного ускорителя КСПУ Х-50. 1 – инжектор плазмы “в.и.к.”; 2 – дрейфовая камера; 3 – катод; 4 – анод; 5 – инжектор плазмы “а.и.к.”



**Рис. 2.** Конструкция инжектора плазмы “в.и.к.” 1 – анод; 2 – фланец анода; 3 – коллектор анода; 4 – катод; 5 – фланец катода; 6 – корпус; 7 – труба коллектора катода; 8, 9 – фланцы коллектора катода; 10 – продольный изолятор; 11 – запирающая тарель клапана газов; 12 – шток; 13 – отражатель; 14 – электромагнитная катушка; 15 – продольный изолятор.

вблизи поверхности анода ускорителя вследствие дефицита в этой области носителей разрядного тока с положительным зарядом [9–11].

Для организации режима “ионного токопереноса” ускорение плазмы в квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ Х-50 (рис. 1) осуществляется в два этапа [5, 7, 8]. На первом этапе пять инжекторов плазмы “в.и.к.” 1 генерируют первичную плазму в дрейфовой камере 2 и подают ее на вход в основной ускорительный канал. За время прохождения дрейфового канала устраняется неустойчивость зоны ионизации, плазменный поток на входе в основной ускорительный канал приобретает симметричность.

На втором этапе, после заполнения первичной плазмой межэлектродного промежутка, происходит высоковольтный разряд между катодом 3 и анодом 4. Первичная плазма получает дополнительную энергию и разгоняется до окончательных скоростей. При этом десять инжекторов плазмы “а.и.к.” 5 дополнительно инжектируют плазму в прианодную область ускорителя и устраняют образовавшийся здесь дефицит положительных ионов. Тем самым устраняется прианодный скачок потенциала и улучшаются энергетические характеристики плазмы [7–11].

В экспериментах по исследованию взаимодействия плазмы с высоким содержанием энергии с поверхностью образцов различных материалов исследуемые образцы находились на расстоянии 2.3 м от среза ускорителя. Начальное давление в вакуумной камере перед импульсом составляло  $5 \cdot 10^{-5}$  Торр. В качестве плазмообразующего газа использовались водород или смесь водорода с азотом.

Для электропитания инжекторов плазмы использовались конденсаторы К41И-7 электроемкостью 100 мкФ и максимальным напряжением 5 кВ.

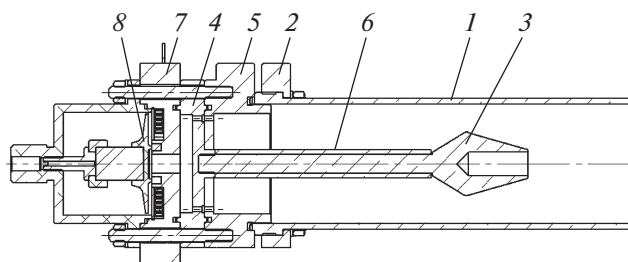
### ВХОДНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

Для генерации первичной плазмы в дрейфовой камере 2 и подачи ее в ускорительный канал

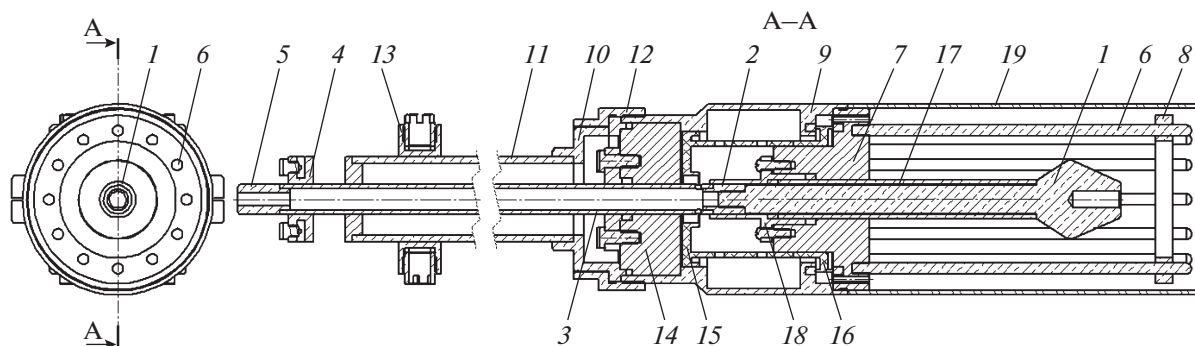
КСПУ Х-50 были разработаны инжекторы плазмы “в.и.к.” На рис. 2 приведена конструкция инжектора плазмы “в.и.к.” Анод инжектора выполнен в виде медной трубы 1 с наружным диаметром 80 мм и толщиной стенки 5 мм. Труба 1 приварена к фланцу 2 анода, который крепится к коллектору 3 анода. Через коллектор 3 подводится электропитание от батареи конденсаторов к аноду инжектора плазмы.

На оси инжектора размещен катод 4, который состоит из цилиндрического и профилированного участков. Цилиндрический участок имеет диаметр 20 мм. Профилированный участок по форме представляет собой эллипсоид вращения с максимальным диаметром 36 мм и длиной 50 мм. Общая длина катода 4 составляет 150 мм. Катод 4 навинчен на резьбовой хвостовик катодного фланца 5. На наружную резьбу катодного фланца 5 навинчен корпус 6, соединенный с коллектором электропитания катода. Коллектор электропитания катода состоит из трубы 7 с навинченными на ее концы фланцами 8 и 9. К фланцу 9 от батареи конденсаторов подводится электропитание катода.

Анод и катод для уменьшения электросопротивления питающей цепи и примесей в плазме в результате распыления материала электродов изготовлены из меди. Элементы их электропитания изготовлены из латуни. Анод 1 и катод 4 изолиро-



**Рис. 3.** Конструкция инжектора плазмы “а.и.к.” 1 – анод; 2 – фланец анода; 3 – катод; 4 – коллектор катода; 5, 6 – изоляторы; 7 – электромагнитная катушка; 8 – запирающая тарель клапана газов.



**Рис. 4.** Конструкция инжектора плазмы высокого давления. 1 – катод; 2 – наконечник; 3 – катодная труба; 4 – коллектор катода; 5 – резьбовой наконечник; 6 – анод; 7 – основание; 8 – кольцо анодное; 9 – корпус; 10 – фигурный фланец; 11 – труба анода; 12 – гайка; 13 – коллектор анода; 14 – электромагнитная катушка; 15 – толкатель; 16 – запирающая тарель; 17, 18 – изоляторы; 19 – экран.

ваны друг от друга продольным изолятором 10, изготовленным из оргстекла.

Фланец 5 катода служит также седлом клапана газов с электродинамическим приводом, а деталь 6 – корпусом этого клапана. Запирающая тарель клапана 11 через шток 12 и отражатель 13 управляется электромагнитной катушкой 14. Более детально конструкция клапана газов и его работа описаны в [12]. Стыковка инжектора плазмы “в.и.к.” с фланцем дрейфовой камеры и изоляция анода инжектора “в.и.к.” от корпуса камеры по высокому напряжению осуществляются при помощи продольных изоляторов 15, изготовленных из оргстекла.

Суммарная емкость батареи конденсаторов системы электропитания инжектора плазмы “в.и.к.” составляет 8640 мкФ.

### АНОДНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

Для генерации плазмы в периферийной зоне плазменного ускорителя КСПУ Х-50 и подачи ее в прианодную зону ускорительного канала служат инжекторы плазмы “а.и.к.” На рис. 3 приведена конструкция инжектора “а.и.к.” Анод инжектора 1 выполнен в виде трубы с наружным диаметром 55 мм и толщиной стенки 2.5 мм. На трубу 1 навинчен фланец 2, который является коллектором анода. Через этот коллектор от батареи конденсаторов подводится электропитание к аноду инжектора плазмы “а.и.к.”

На оси инжектора размещен катод 3, который состоит из цилиндрического и профилированного участков. Цилиндрический участок имеет диаметр 8 мм. Профилированный участок катода выполнен в виде двух конусов с противоположно направленными вершинами и имеет максимальный диаметр 26 мм и длину 40 мм. Общая длина катода 3 составляет 138 мм. Катод 3 навинчен на резьбовой хвостовик коллектора катода 4, к которому подво-

дится электропитание катода от батареи конденсаторов. Анод 1 и катод 3 изолированы друг от друга по высокому напряжению изоляторами 5 и 6.

Катодный коллектор 4 крепится к электромагнитной катушке 7, которая служит седлом клапана газов с электродинамическим приводом, а также управляет запирающей тарелью 8 клапана. Более детально конструкция клапана газов инжектора “а.и.к.” и его работа описаны в работе [12].

Такие токоведущие элементы инжектора, как анод 1, коллектор анода 2, катод 3, коллектор катода 4, изготовлены из меди, а изолятор 5 – из капролона. Изолятор 6 представляет собой керамическую трубу с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм.

Суммарная емкость батареи конденсаторов системы электропитания инжектора плазмы “а.и.к.” составляет 4100 мкФ.

### ИНЖЕКТОР ПЛАЗМЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для генерации плазменных потоков большой мощности был разработан инжектор плазмы высокого давления. В этом инжекторе применен импульсный клапан газов высокого давления, способный создавать в ускорительном канале плазмодинамической системы потоки газов с давлением до 760 Торр в потоке и обеспечить интегральный напуск газа до 540 см<sup>3</sup> (при атмосферном давлении) за импульс [13]. Соответственно и генерируемая инжектором плазма имеет большую энергию и высокое давление в потоке.

На рис. 4 приведена конструкция инжектора плазмы высокого давления. На оси инжектора размещен катод 1, состоящий из цилиндрического и профилированного участков. Цилиндрический участок катода имеет диаметр 13.5 мм и длину 137 мм. Профилированный участок имеет ромбовидную форму в сечении. Максимальный диаметр

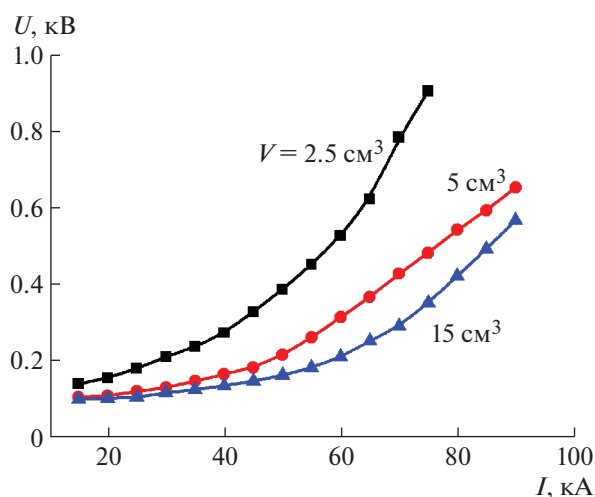


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики разряда инжектора плазмы “в.и.к.” при различных напусках рабочего газа (цифры у кривых).

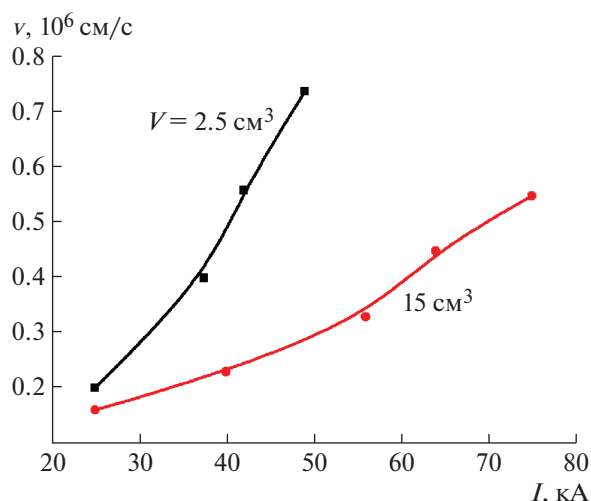


Рис. 6. Зависимости скорости плазмы от величины разрядного тока инжектора плазмы “в.и.к.” при напусках рабочего газа 2.5 и 5 см³ за один импульс.

профилированного участка 36 мм, длина 40 мм. Таким образом, общая длина рабочей части катода составляет 177 мм. Катод 1 ввинчивается в резьбовое отверстие наконечника 2 катодной трубы 3. По трубе 3 к катоду 1 через коллектор 4 катода подводится электропитание от батареи конденсаторов. Кроме того, по трубе 3 в газовую полость клапана подается плазмообразующий газ от системы газового питания. Поэтому труба 3 со стороны торца, противоположного катоду, имеет резьбовой наконечник 5, на который навинчивается соединительная арматура системы газового питания.

Анод 6 инжектора представлен двенадцатью стержнями диаметром 5 мм и длиной 160 мм. Стержни 6 ввинчены в резьбовые отверстия основания 7. Анодные стержни 6 в совокупности образуют цилиндрическую поверхность с наружным диаметром 70 мм. Свободные концы стержней 6 зафиксированы анодным кольцом 8.

Основание 7 по своей наружной резьбе ввинчивается в резьбовое отверстие корпуса 9. Фигурный фланец 10 токоведущей трубы 11 анода при помощи гайки 12 прижат к торцу корпуса 9. К трубе 11 через коллектор 13 анода подводится электропитание от батареи конденсаторов к аноду инжектора плазмы. Фигурный фланец 10 и гайка 12 осуществляют электрический контакт с корпусом 9 и одновременно уплотняют на вакуум наружную поверхность управляющей электромагнитной катушки 14 импульсного клапана газов высокого давления. В корпусе 9 размещены также подвижные элементы запирающего узла клапана: толкатель 15 и запирающая тарель 16. Более детально конструкция клапана высокого давления и его работа описаны в [13].

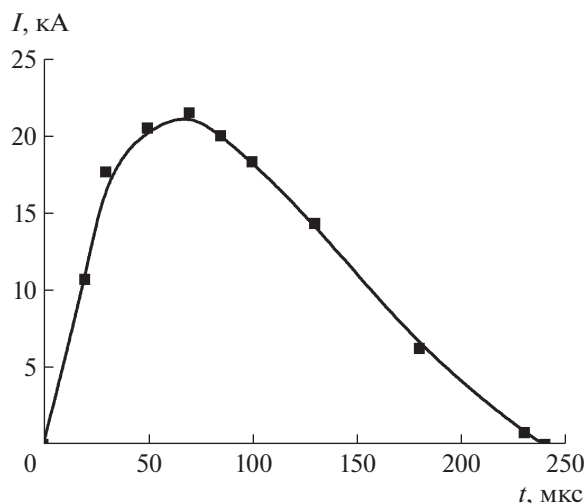
Таким образом, детали инжектора 7, 9–11, 13–16 в момент разряда находятся под напряжением анода. Поэтому катод 1 изолирован от основания 7 изоляторами 17 и 18. Изолятор 17 представляет собой керамическую трубу с наружным диаметром 18 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 122 мм. Изолятор 18 представляет собой фигурную втулку с фланцем из капролона (полиамид 6), которая, помимо изоляции, уплотняет на вакуум поверхности катода 1 и керамической трубы 14.

Экран 19 охватывает снаружи анод 6 и препятствует растеканию плазмообразующего газа за пределы разрядного канала. Экран 19 изготовлен из трубы с наружным диаметром 90 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 167 мм. Он контактирует с наружной поверхностью основания 7 и поэтому находится под потенциалом анода.

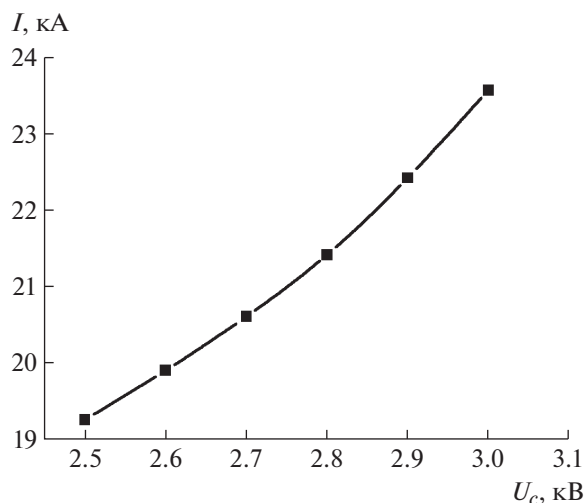
Токоведущие элементы инжектора: катод 1, труба 3 с наконечниками 2 и 5, анодные стержни 6, основание 7, анодное кольцо 8, труба 11 – изготовлены из меди. Корпус 9, фигурный фланец 10, гайка 11, коллекторы электропитания катода 4 и анода 13 выполнены из латуни. Экран 19 изготовлен из нержавеющей немагнитной стали 12X18H10T, уплотнители газовых и вакуумных полостей – из вакуумной резины.

Батарея конденсаторов системы электропитания инжектора плазмы высокого давления имеет суммарную емкость 3500 мкФ.

Функциональные различия между инжекторами “в.и.к.” + “а.и.к.” и инжектором высокого давления определяются тем, что инжектор высокого давления при меньших энергозатратах позволяет получить плазменные потоки с большим содержанием энергии и с большим давлением в потоке. Если в экспериментах в квазистационар-



**Рис. 7.** Временная зависимость разрядного тока инжектора плазмы “а.и.к.” при напряжении на питающей конденсаторной батарее 2.8 кВ.



**Рис. 8.** Зависимость максимальной величины разрядного тока плазменного инжектора “а.и.к.” от напряжения на питающей батарее конденсаторов.

ном плазменном ускорителе необходимо получить плазменный поток высокого давления и с большим содержанием энергии, для генерации первичной плазмы вместо инжекторов “в.и.к.” используют инжекторы высокого давления.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИНЖЕКТОРОВ

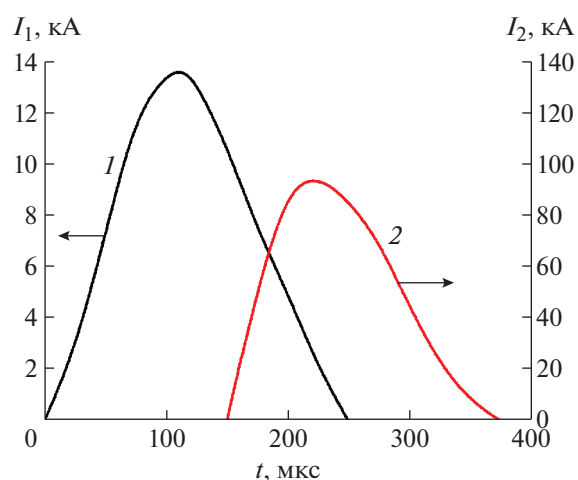
Генерация плазмы в инжекторах происходит следующим образом. После подачи импульсным клапаном порции газа в межэлектродное пространство на электроды инжектора с определенной временной задержкой подается высокое напряжение. В критическом сечении канала происходит пробой и ионизация нейтрального газа. Между электродами возникает ионный ток, появляется азимутальное магнитное поле. Взаимодействие разрядного тока с собственным азимутальным магнитным полем приводит к возникновению силы Ампера, которая и ускоряет плазму.

Измерение величины разрядного тока и напряжения в плазме осуществлялось при помощи калиброванных поясов Роговского и делителей напряжения соответственно. Скорость плазменного потока определялась по пролетному времени плазмы между двумя электрическими зондами. В экспериментах по исследованию параметров плазмы в инжекторах в качестве плазмообразующего вещества использовался водород.

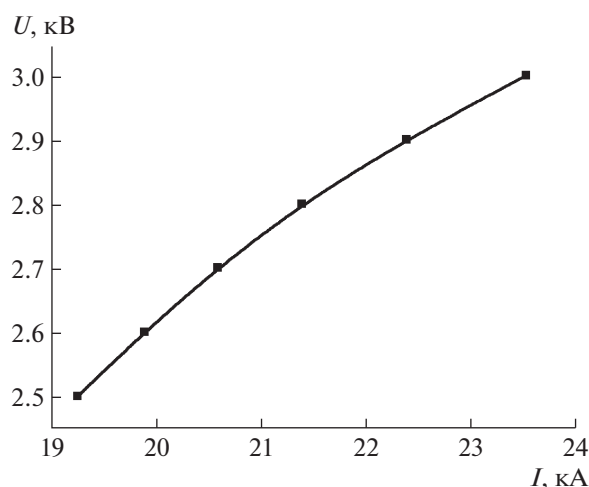
На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики разряда (зависимость разрядного напряжения от величины разрядного тока в плазме) инжектора плазмы “в.и.к.” при напусках водорода 2.5, 5 и 15 см<sup>3</sup> (при атмосферном давлении) за один импульс. Из рис. 5 видно существенное влия-

ние массового расхода плазмообразующего газа на характеристики плазмы, при этом во всех режимах увеличение разрядного тока в плазме приводит к росту разрядного напряжения.

На рис. 6 представлены зависимости скорости плазмы от величины разрядного тока инжектора плазмы “в.и.к.” при напусках рабочего газа 2.5 и 5 см<sup>3</sup> (при атмосферном давлении) за один импульс. Из рис. 6 видно существенное влияние массового расхода плазмообразующего газа на скорость плазмы, при этом во всех режимах увеличение разрядного тока в плазме приводит к росту ее скорости.



**Рис. 9.** Временные зависимости тока в обмотке управляющей электромагнитной катушки клапана инжекции газа (1) и тока основного разряда (2) инжектора плазмы высокого давления.



**Рис. 10.** Зависимость разрядного напряжения от разрядного тока в инжекторе плазмы высокого давления.

На рис. 7 приведена временная зависимость разрядного тока плазменного инжектора “а.и.к.” при напряжении на конденсаторной батарее инжектора 2.8 кВ. Согласно рис. 7, длительность генерации плазмы инжектора “а.и.к.” в этом режиме составляет около 240 мкс, при этом максимальная величина разрядного тока в плазме равна 21.4 кА. На основе осциллограмм разрядного тока плазменного инжектора “а.и.к.” для различных напряжений на питающей конденсаторной батарее была получена зависимость максимальной величины разрядного тока от напряжения (рис. 8). Согласно рис. 8, с увеличением напряжения на питающей батарее конденсаторов максимальная величина разрядного тока в плазме инжектора “а.и.к.” растет в зависимости, близкой к линейной.

На рис. 9 приведены временные зависимости тока в обмотке управляющей электромагнитной катушки клапана инъекции газа (кривая 1) и тока основного разряда (кривая 2) инжектора плазмы высокого давления. Из зависимостей видно, что максимальный разрядный ток в плазме достигает 96 кА при длительности разряда 200 мкс. На рис. 10 представлена вольт-амперная характеристика (зависимость разрядного напряжения от разрядного тока) в инжекторе плазмы высокого давления.

Исследования параметров плазмы вблизи поверхности исследуемых образцов вольфрама показали следующие результаты:

— максимальное давление плазмы на поверхности образца 18 бар;

— максимальная электронная плотность плазмы  $5.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;

— максимальная электронная температура плазмы 3.65 эВ;

— плотность энергии плазмы, достигающей поверхности образца из вольфрама, 1.1 МДж/м<sup>2</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makhlay V.A., Garkusha I.E., Aksekov N.N., Bazyleva B., Byrka O.V., Chebotarev V.V., Landman I., Herashchenko S.S., Staltsov V.V. // J. Nucl. Materials. 2015. V. 463. P. 210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.057>
2. Garkusha I.E., Aksekov N.N., Byrka O.V., Makhlay V.A., Herashchenko S.S., Malykhin S.V., Petrov Yu.V., Staltsov V.V., Surovitskiy S.V., Wirtz M., Linke J., Sadowski M.J., Skladnik-Sadowska E. // Phys. Scr. 2016. V. 91. P. 094001. doi 10.1088/0031-8949/91/9/093001
3. Makhlay V.A., Garkusha I.E., Linke J., Pintsuk G., Tereshin V.I., Bandura A.N., Chebotarev V.V., Staltsov V.V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2009. V. 15. № 1. P. 58.
4. Herashchenko S.S., Makhlay V.A., Garkusha I.E., Aksekov N.N., Bazylev B., Byrka O.V., Chebotarev V.V., Kulik N.V., Lebedev S.I., Shevchuk P.B., Staltsov V.V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2014. V. 94. № 6. P. 44.
5. Терешин В.И., Волошко А.Ю., Возный В.И., Гаркуша И.Е., Золотухин А.В., Казаков О.Е., Кулик Н.В., Маринин В.В., Стальцов В.В., Соляков Д.Г., Морозов А.И., Трубочанинов С.А., Тиаров М.А., Царенко А.В., Чеботарев В.В. // Ионные инжекторы и плазменные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 106.
6. Волков Я.Ф., Кулик Н.В., Маринин В.В., Морозов А.И., Соляков Д.Г., Стальцов В.В., Терешин В.И., Тиаров М.А., Цупко Б.Ю., Чеботарев В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 11. С. 1392.
7. Терешин В.И., Гаркуша И.Е., Чеботарев В.В. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 9. М.: Янус-К, 2007. С. 392–436.
8. Морозов А.И. // Физика и применение плазменных ускорителей. Минск: Наука и Техника, 1974. С. 39–46.
9. Калмыков А.А. // Физика и применение плазменных ускорителей. Минск: Наука и Техника, 1974. С. 48.
10. Белан В.Г., Золотарев С.П., Левашев В.Ф. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 2. С. 176.
11. Дьяконов Г.А., Тихонов В.Б. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 533.
12. Стальцов В.В. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 133. doi 10.7868/S0032816216030137
13. Стальцов В.В., Махлай В.А., Чеботарев В.В., Кулик Н.В. // ПТЭ. 2018. № 6. С. 121. doi 10.1134/S0032816218060149