

## УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

УДК 533.9;533.95;621.384.649

### ОБ ОГРАНИЧЕНИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

© 2022 г. В. Ю. Горяинов<sup>a,b,\*</sup>, А. В. Воронин<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: vgorainov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 12.06.2021 г.

После доработки 30.09.2021 г.

Принята к публикации 20.10.2021 г.

Представлены экспериментальные результаты по изучению скорости движения плазмы в коаксиальном и рельсовом ускорителях. Получены зависимости скорости, кинетической энергии, массы и спектрального состава струи от величины тока ускорителя. При больших токах обнаружено замедление скорости, рост кинетической энергии струи, интенсивности излучения примесей в потоке по сравнению с интенсивностью ионизованной компоненты рабочего газа. Результаты экспериментов позволили утверждать, что происходило увеличение разгоняемой массы за счет эрозии стенки и электродов ускорителей. Этим можно объяснить ограничение скорости струи.

*Ключевые слова:* скорость плазменной струи, коаксиальный плазменный ускоритель, плазменный рельсотрон

**DOI:** 10.31857/S0367292122030052

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

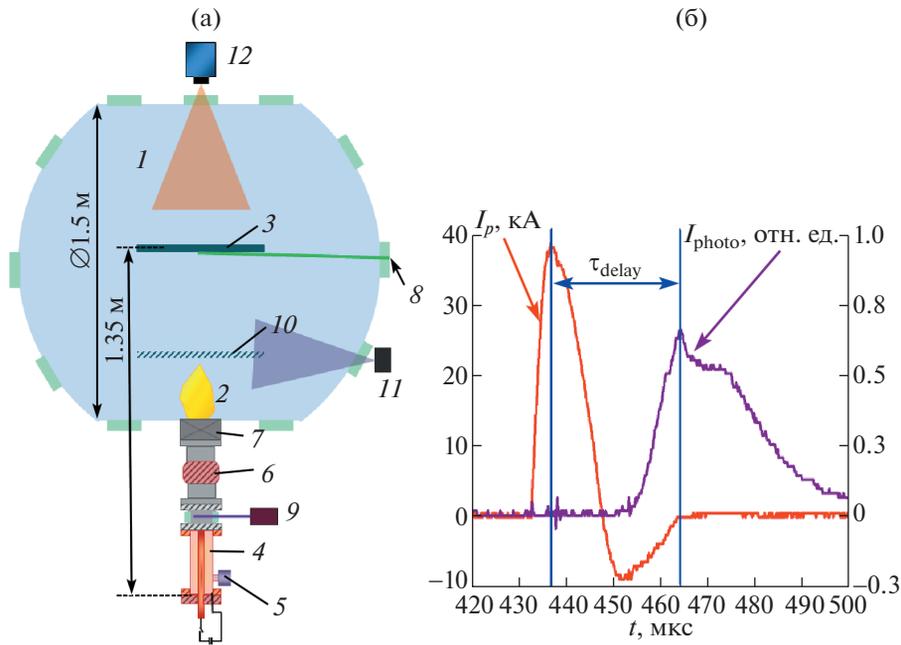
Первый ускоритель плазмы, разгоняющий ее до скоростей  $\sim 100$  км/с, был создан в 1955 г. и нашел впоследствии широкое применение в работах по управляемому термоядерному синтезу, облучению материалов, моделированию взаимодействия плазмы с магнитным полем в космосе и др. Идея ускорителя, разработанная Л.А. Арцимовичем, состояла в расширении замкнутого контура при пропускании через него импульса тока [1]. В основном разработка ускорителей плазмы ведется в направлении увеличения кинетической энергии струи без учета примесей, поступающих в разряд в результате эрозии электродов [2, 3]. Энергию струи увеличивают за счет большого тока разряда. Такой подход оправдан, например, при разработке плазменных двигателей и исследовании взаимодействия плазмы с поверхностью. Однако применение ускорителя для подачи топлива в термоядерные установки возможно лишь при отсутствии посторонних примесей в потоке из-за высоких радиационных потерь. Поэтому увеличивать кинетическую энергию плазмы без примесей необходимо только за счет роста скорости ее движения.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по изучению скорости движения плазмы в коаксиальном и рельсовом ускорителях. Получены зависимости скорости,

кинетической энергии, массы и спектрального состава струи от величины тока ускорителя.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились на стенде, оснащенном коаксиальным и рельсовым ускорителями плазмы. Стенд состоял из вакуумной камеры 1 объемом  $2.5 \text{ м}^3$ , ускорителя плазмы 2, и диагностик 8–12 для измерения параметров плазменной струи (рис. 1а). Стенд позволял присоединять к вакуумному затвору камеры различные варианты плазменных источников. Ускоритель был пристыкован к камере через вакуумный затвор 7 и гальванически развязан с помощью керамического патрубка 6. Струя плазмы могла свободно вытекать в большой объем камеры без взаимодействия с ее стенками. В камере располагался экран 3, с которым взаимодействовала струя. Экран имел размеры  $220 \times 220 \times 0.1$  мм, был выполнен из меди. Расстояние между экраном и плазменным источником составляло 1.35 м. Определение скорости плазменной струи 2 производилось по измерению времени задержки между максимумами тока и вспышками излучения на экране, удаленном от источника плазмы, как показано на рис. 1б. На выходе ускорителя регистрировался спектральный состав плазмы с помощью обзорного спектрометра 9 в диапазоне



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда для исследования электродинамического ускорителя (а): 1 – вакуумная камера, 2 – плазменная струя, 3 – медный экран  $220 \times 220 \times 0.1$  мм, 4 – плазменный ускоритель, 5 – газовый электродинамический клапан, 6 – керамический патрубок, 7 – затвор, 8 – фотоприемник с линзой и направлением сбора излучения вблизи экрана, 9 – спектрометр с линией сбора излучения, 10 – отклоняющийся экран  $175 \times 155 \times 10$  мм, 11 – видеокамера для относительных измерений кинетической энергии струи, 12 – тепловизионная камера; метод измерения скорости струи с помощью временной задержки  $\tau_{delay}$  между сигналом фотодиода (максимумом интенсивности излучения  $I_{photo}$ ), направленного на экран, и импульсом тока ускорителя  $I_p$  (б).

300–1100 нм. Ток на ускорителе измерялся с помощью пояса Роговского, закрепленного на одном из электродов.

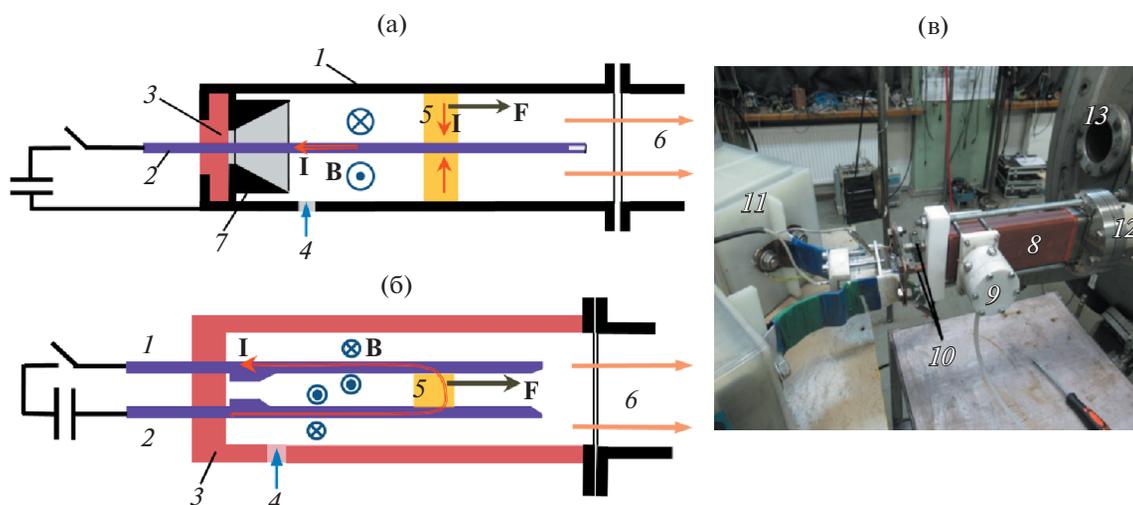
Энергия струи, перешедшая в тепло при столкновении с экраном, определялась с помощью тепловизионной камеры 12, направленной на его зачерненную теневую сторону, как показано на рис. 1а или в работе [4]. Регистрировалось поле температур на теневой стороне экрана до и после выстрела, вычислялась средняя температура и выделяемая в нем энергия.

Зависимость кинетической энергии струи от тока ускорителя измерялась с помощью отклонения экрана, закрепленного на шарнирах. Ранее [4] с помощью отклоняющегося экрана был продемонстрирован метод измерения давления плазменной струи. Экран отклонялся после удара струи. С помощью видеокамеры регистрировали подъем центра масс экрана  $h$ . Схема эксперимента приведена на рис. 1а. Отклоняющийся под действием струи экран показан на позиции 10, видеокамера – позиция 11. Расстояние между экраном и ускорителем составляло 900 мм. Экран был выполнен из легкого материала (полиэтилен), имел размеры  $175 \times 155 \times 10$  мм, масса  $M = 4$  г. Кинетическая энергия струи вычислялась по формуле  $W_k = Mgh$ , где  $M$  – масса экрана,  $g$  – ускорение

свободного падения. Масса струи  $m$  определялась с использованием результатов измерений скорости  $v$  и кинетической энергии  $W_k$  по формуле

$m = 2W_k/v^2$ . Так как значительная часть энергии струи переходила в нагрев экрана, то кинетическая энергия и масса струи представлены в относительных единицах.

Эксперименты проводились с двумя типами плазменных ускорителей – с коаксиальной [4] и рельсовой геометрией электродов [5, 6]. Схемы и внешний вид ускорителей представлены на рис. 2. Плазменный ускоритель работает по принципу движущейся проводящей перемычки в рамке с током  $I$  под действием силы Ампера  $F$ , где в качестве проводящего материала служит плазма разряда [1]. Напуск рабочего газа под давлением 2.5 атм осуществлялся через боковую поверхность на начальном участке ускорителя с помощью клапана электродинамического типа. Питание осуществлялось с помощью емкостного накопителя 160 мкФ, напряжением до 6 кВ, током разряда до 120 кА и длительностью импульса ~20 мкс. Спустя 400 мкс после напуска газа с помощью коммутатора тока инициировался разряд. Разряд, проходящий через газ, обеспечивал его ионизацию и разгон плазмы за счет магнитного поля и тока ускорителя.



**Рис. 2.** Схема коаксиального ускорителя плазмы (а): 1 – внешний электрод (анод), 2 – центральный электрод (катод), 3 – керамика, 4 – напуск рабочего газа, 5 – плазма, 6 – выходящий поток плазменной струи, 7 – коническая вставка; схема плазменного рельсотрона (обозначения те же) (б); внешний вид рельсотрона, установленного на стенде: 8 – корпус рельсотрона, 9 – электродинамический газовый клапан, 10 – электроды, 11 – конденсатор, 12 – керамическая развязка, 13 – вакуумная камера.

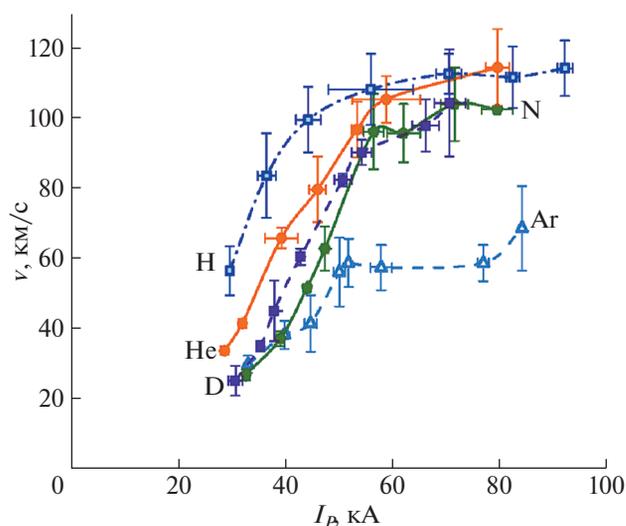
Диаметры наружного и центрального электродов коаксиального ускорителя составляли 46 и 10 мм соответственно. Длина наружного электрода составляла 220 мм, а центрального варьировалась от 25 до 220 мм. Наружный электрод был выполнен из нержавеющей стали и был оснащен конической вставкой в области формирования разряда ([4], рис. 2а). Эксперименты проводились при остаточном давлении  $10^{-5}$  Торр, импульсном напуске различных газов и материалов центрального электрода.

Электроды рельсового ускорителя (рельсотрона) с квадратным сечением  $8 \times 8$  мм длиной 160 мм были выполнены из нержавеющей стали и располагались в прямоугольном канале алюмооксидной (марки ВК95) камеры толщиной 10 мм, длиной 190, шириной 30 и высотой 60 мм (рис. 2б, 2в). Расстояние между электродами составляло 20 мм. Для улучшения пробы в области формирования разряда было сделано сужение зазора между электродами до 12 мм [5].

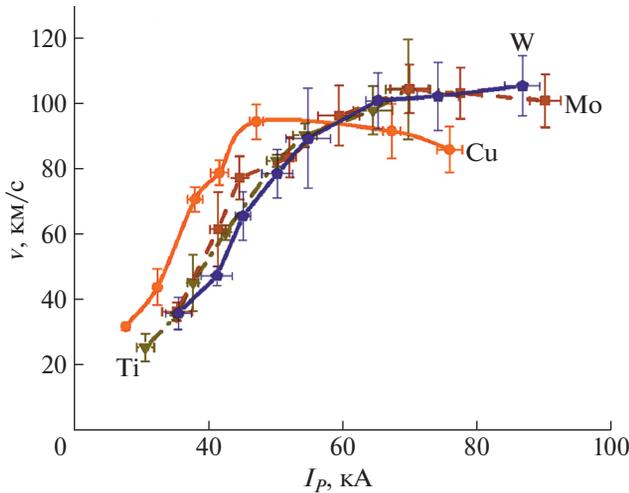
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование коаксиального ускорителя плазмы проводилось в условиях различных рабочих газов, материалов и длин центрального электрода. На рис. 3 представлены измеренные зависимости скорости движения плазменной струи от тока разряда для различных рабочих газов. Видно, что скорость струи увеличивалась с ростом тока. При малых токах скорость ионизованного газа с малой массой была больше скорости с большой массой. Однако зависимости достигали насыще-

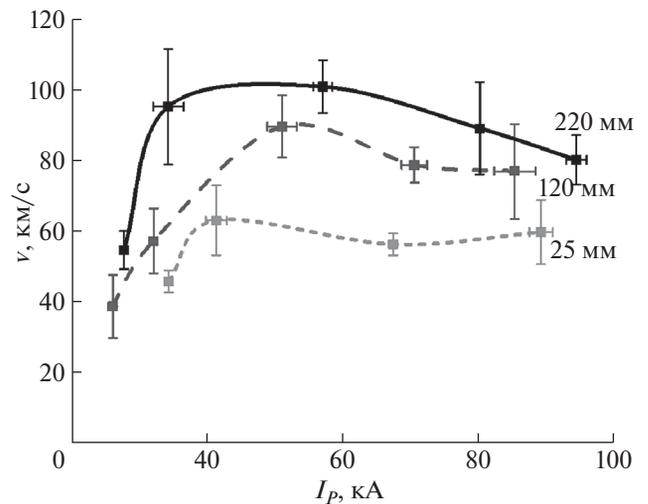
ния при токах более 55–70 кА для всех ионизованных газов. Наибольшая и наименьшая скорости достигались при использовании легкого водорода и тяжелого аргона, соответственно. Можно предположить, что взаимодействие аргоновой плазмы с электродами приводило к наибольшему увеличению увлекаемой массы разря-



**Рис. 3.** Зависимость скорости движения плазменной струи  $v$  от максимума тока разряда  $I_p$  для различных рабочих газов. Внешний электрод был выполнен из нержавеющей стали, центральный электрод состоял из титана, длиной 220 мм.



**Рис. 4.** Зависимость скорости движения дейтериевой плазменной струи  $v$  от тока разряда  $I_p$  для различных материалов центрального электрода. Коаксиальный ускоритель имел центральный электрод длиной 220 мм. Внешний электрод, изготовленный из нержавеющей стали, был покрыт титановой фольгой толщиной 0.1 мм.



**Рис. 5.** Зависимость скорости движения дейтериевой плазменной струи  $v$  от тока разряда  $I_p$  для различных длин центрального электрода. Коаксиальный ускоритель имел длину внешнего электрода 220 мм.

да. Наименьший спад скорости при увеличении тока наблюдался для легкого и инертного гелия.

На рис. 4 представлены зависимости скорости движения дейтериевой плазменной струи от тока разряда для различных материалов центрального электрода. Видно, что скорость струи также увеличивалась с ростом тока и ограничивалась при токах более 45–70 кА для всех материалов центрального электрода. Скорость движения струи ускорителя с медным центральным электродом оказалась минимальной на больших токах. Можно предположить, что взаимодействие плазмы с медным электродом приводило к наибольшему увеличению увлекаемой массы разряда. Сведения, опубликованные в работе [7], свидетельствуют о значительной массовой скорости электрической эрозии меди. Расчетные значения массовой скорости эрозии  $m'$  (г/с) для исследованных материалов приведены в табл. 1.

На рис. 5 представлены зависимости скорости движения дейтериевой плазменной струи от тока разряда для различных длин центрального элект-

**Таблица 1.** Массовая скорость эрозии  $m'$  для различных материалов

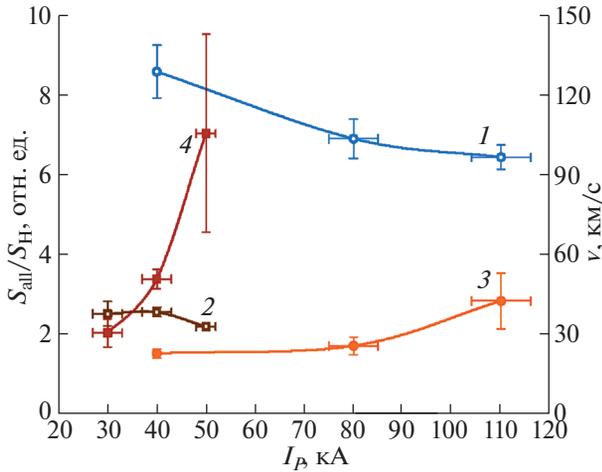
Металл	$m'$ , г/с
Cu	0.165
Ti	0.074
Mo	0.041
W	0.031

рода. Длина наружного электрода составляла 220 мм. Материал электродов был изготовлен из нержавеющей стали. Измеренная скорость струи плазмы для ускорителей с различной длиной центрального электрода достигала насыщения при величине тока порядка 40–50 кА. Наибольшее значение скорости было получено в эксперименте с наибольшей длиной центрального электрода. Можно предположить, что при уменьшении длины электрода плотность тока через его поверхность увеличивалась. Это могло приводить к увеличению примесей в разряде и уменьшению скорости движения струи плазмы.

Доказательством этому предположению могут служить результаты проведенных измерений зависимости спектрального состава, кинетической энергии и массы струи от тока коаксиального и рельсового ускорителей.

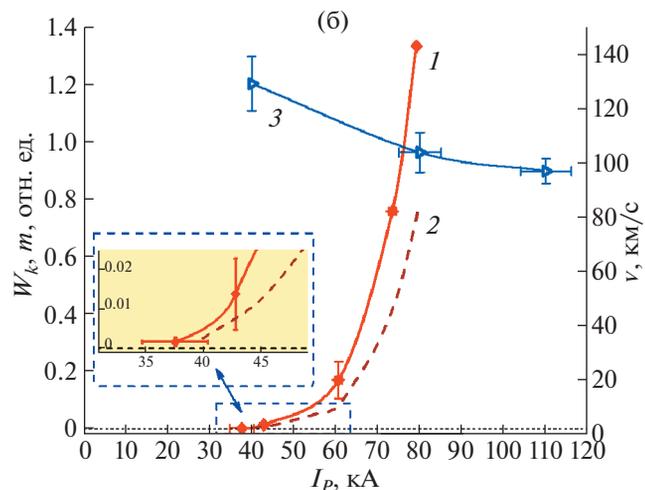
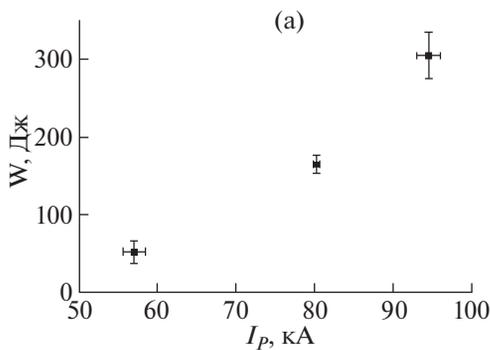
На рис. 6 представлены зависимости скорости движения водородной плазменной струи и относительной интенсивности ее излучения ( $S_{all}/S_H$ ) от тока разряда. Интегральная интенсивность  $S_{all}$  была нормирована на суммарную интенсивность  $S_H$  линий излучения водорода. Видно, что с повышением тока в обоих ускорителях увеличивалась доля примесей и уменьшалась скорость движения струи. В рельсовом ускорителе рост примесей оказался более значительным по сравнению с ростом примесей в коаксиальном ускорителе. Вероятно, примеси поступали не только с электродов, но и со стенки керамической камеры рельсотрона.

На рис. 7а представлена зависимость энергии, перешедшей в тепло экрана от тока ускорителя.



**Рис. 6.** Зависимости скорости движения водородной плазменной струи  $v$  и относительной интенсивности ее излучения  $S_{all}/S_H$  от тока разряда  $I_p$  для коаксиального и рельсового ускорителей: 1 – скорость струи в коаксиальном ускорителе, 2 – скорость струи в плазменном рельсотроне, 3 – относительная интенсивность излучения струи коаксиального ускорителя плазмы, 4 – относительная интенсивность излучения струи рельсового ускорителя.

Видно, что с увеличением тока энергия, выделяемая на экране, возрастала и достигала 350 Дж при токе  $\sim 100$  кА, а запасенная энергия в конденсаторах составляла 2500 Дж. Для чистой водородной плазмы тепловая доля энергии с количеством частиц в струе  $\sim 10^{19}$  не превышала 30 Дж.



**Рис. 7.** Зависимость энергии дейтериевой плазменной струи, выделенной на экране, измеренная с помощью тепловизора, от тока в коаксиальном ускорителе плазмы (а); зависимость кинетической энергии  $W_k$  водородной струи коаксиального ускорителя (б), измеренная с помощью отклоняющегося экрана – 1 и массы  $m$  – 2 в относительных единицах, а также скорости струи  $v$  – 3 от тока. Внешний и внутренний электроды ускорителя выполнены из нержавеющей стали.

Результаты измерений кинетической энергии и массы водородной струи в относительных единицах, а также скорости от тока представлены на рис. 7б. Видно, что при токах менее 50 кА не происходило существенного роста кинетической энергии и массы. При токе более 60 кА наблюдалось уменьшение средней скорости струи, резкое увеличение ее кинетической энергии и массы. Последнее согласуется с результатами, представленными на рис. 6.

Таким образом, наблюдаемое ограничение скорости движения плазменной струи позволили сделать предположение об увеличении ее массы за счет поступления примесей с электродов ускорителя.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные зависимости скорости движения струи от тока коаксиального и рельсового ускорителей плазмы для различных рабочих газов, материалов и длин электродов. При больших токах обнаружено уменьшение скорости струи, а также большая интенсивность излучения примесей в потоке по сравнению с интенсивностью ионизированной компоненты рабочего газа. Результаты экспериментов позволили утверждать, что происходило увеличение разгоняемой массы за счет поступления примесей. Это могло приводить к ограничению скорости движения струи.

Проведенные исследования показали, что при создании плазменной струи без примесей следует учитывать ограничение по току в разряде  $\sim 40$ –

50 кА. Дальнейшее увеличение скорости потока можно осуществлять, например, с помощью увеличения магнитного поля в ускорительном канале внешними проводниками с током [5, 8].

Работа выполнена с использованием Федерального центра коллективного пользования “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” (проект RFMEFI62119X0021), включающего Уникальную научную установку “Сферический токамак Глобус-М”, а также поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020. Разработка плазменных источников была поддержана в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арцимович Л., Лукьянов С., Подгорный И., Чуватин С. // ЖЭТФ. 1958. Т. 33. С. 3.
2. Ким В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. С. 45.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784215030135>
3. Poniaev S., Reznikov B., Kurakin R., Popov P., Sedov A., Shustrov Y., Zhukov B. // Acta Astronautica. 2018. V. 150. P. 92.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.035>
4. Воронин А., Горяинов В., Гусев В. // ЖТФ. 2020. Т. 90. С. 1028.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784220060286>
5. Воронин А., Горяинов В., Гусев В., Новохацкий А., Поняев С. // ЖТФ. 2019. Т. 89. С. 1021.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784219070272>
6. Goryainov V., Voronin A., Gusev V., Novokhatsky A., Poniaev S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1400. P. 077020.
7. Будин А., Коликов В., Рутберг Ф. // ЖТФ. 2007. Т. 77. С. 49.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784207080087>
8. Бобашев С., Жуков Б., Куракин Р., Поняев С., Резников Б. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. С. 62.