

Исследование коаксиального ускорителя плазменной струи

© А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 22 ноября 2019 г.

Принято к публикации 25 декабря 2019 г.

Представлены исследования основных энергетических параметров плазменной струи коаксиального ускорителя с конической вставкой в области формирования разряда. Получены зависимости давления и диаметра струи дейтериевой плазмы от расстояния до ускорителя, а также его длины и полярности напряжения на электродах. Показан квадратичный рост энергии струи плазмы с увеличением напряжения. Среди всех испытанных модификаций наиболее эффективным оказался ускоритель длиной, не превышающей 220 mm, отрицательной полярностью напряжения на центральном электроде и фокусирующей конической вставкой в начале наружного электрода. На выходе источника была получена дейтериевая плазма со скоростью ионизационного фронта более 100 km/s, давлением более 1 МПа. Представлен метод измерения давления струи с помощью отклоняющегося экрана и тепловизионной камеры FLIR SC7300M.

Ключевые слова: коаксиальный ускоритель плазмы, плазменная пушка, токамак.

DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49294.372-19

Введение

Для управления параметрами плазмы в установках с магнитным удержанием необходимы источники, генерирующие потоки частиц, движущиеся с большой кинетической энергией (плотностью более 10^{22} m^{-3} , скоростью $\sim 100 \text{ km/s}$, давлением до 10 МПа). В настоящее время рассматриваются и применяются методы, основанные на источниках высокоэнергичных нейтральных атомов [1], сверхзвуковых струях газа [2,3], компактных торах [4–7], рельсовых ускорителях [8], центрифугах и пневматических пушках [9], эрозионных устройствах типа Бостика [10], разрядах в капиллярах [11] и др. Существенное увеличение кинетической энергии струи плазмы было достигнуто с применением оригинального коаксиального ускорителя плазмы, содержащего гранулы титана, насыщенные водородом [12]. Возможности эффективного применения такого ускорителя были продемонстрированы экспериментально на токамаке Глобус-М и опубликованы в работах [13–19]. В результате инъекции струи плазмы в токамак удалось увеличить плотность частиц на 30% в центральной области плазменного шнура без срыва тока. Впервые был испытан и рельсовый электромагнитный источник плазменной струи с магнитным полем, создаваемым внешними проводниками с током. Повышение магнитного поля в зазоре с 3 до 5 Т между электродами с помощью внешних проводников с током позволило увеличить кинетическую энергию струи плазмы примерно в 1.5 раза без увеличения тока разряда [20].

Однако ни один из известных источников не позволяет генерировать одновременно плотные, движущиеся с большой скоростью, и свободные от примесей потоки

вещества, необходимые для реактора масштаба ИТЭР. Кроме того, на больших установках с магнитным удержанием расстояние между источником и центральной областью плазмы может достигать нескольких метров, поэтому важной задачей является фокусировка и транспортировка плазмы без потери ее кинетической энергии и давления. Оценки показали, что для эффективной транспортировки плазмы на большие расстояния скорость расширения струи должна быть в 100 и более раз меньше скорости направленного движения потока. Другими словами струя должна быть холодной, плотной и двигаться с максимальной скоростью. Настоящая работа является продолжением ранее начатых исследований по разработке коаксиального ускорителя плазмы с большой кинетической энергией, пригодного для эффективной подачи топлива в центральную область термоядерного реактора.

1. Стенд плазменной пушки

Исследования ускорителя проводились на стенде плазменной пушки. Стенд состоял из вакуумной камеры объемом 2.5 m^3 с остаточным давлением 10^{-5} Torr , источника плазменной струи и диагностик для измерения ее параметров (рис. 1). Струя могла свободно вытекать в большой объем вакуумной камеры без взаимодействия с ее стенками. Диаметры наружного и внутреннего электродов коаксиального ускорителя составляли 46 и 10 mm соответственно. Электроды были выполнены из нержавеющей стали. Длина электродов варьировалась от 80 до 350 mm. Питание ускорителя осуществлялось с помощью емкостного накопителя $160 \mu\text{F}$, напряжением до 6 kV, током разряда до 120 kA, длительностью

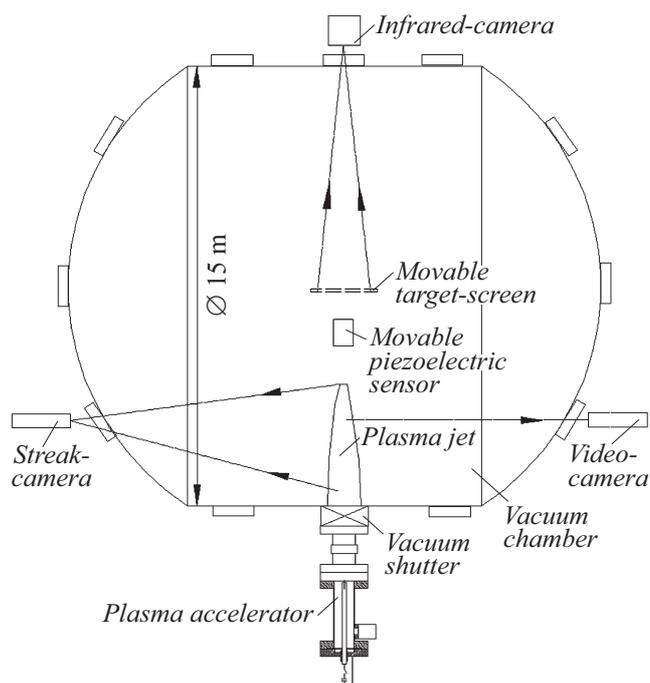


Рис. 1. Схема стэнда плазменной пушки с диагностикой.

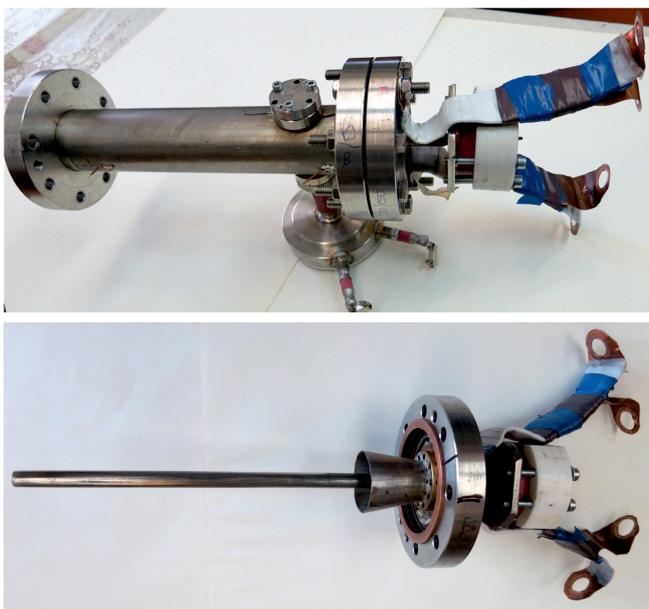


Рис. 2. Внешний вид коаксиального ускорителя и центрального электрода с конической вставкой, соединенной с внешним фланцем.

импульса $\sim 20 \mu\text{s}$. Ограничение выбора максимального рабочего напряжения, тока и длительности разряда было обусловлено минимальным поступлением примесей с электродов плазменной пушки. Напуск дейтерия осуществлялся через боковую поверхность наружного электрода на начальном участке ускорителя с помощью клапана электродинамического типа. Наружный электрод

был оснащен цилиндрической, а позднее конической вставкой, расположенной на начальном участке ускорителя. На рис. 2 представлены фотографии внешнего вида ускорителя и центрального электрода с конической вставкой, соединенной с внешним фланцем. Основанием применения вставки явились результаты ранее проведенных исследований движения разряда в коаксиальном ускорителе [21]. Так, для электродов с длиной 0.5 м и менее измерения показали, что ионизационный фронт может выходить из ускорителя за время $\sim 1\text{--}3 \mu\text{s}$. Если длительность разряда превышает это время, то токовый слой может перераспределяться вдоль электродов ускорителя в течение импульса и формировать квазистационарный режим работы источника. В этом случае в зависимости от расстояния между электродами и других факторов разряд может длительное время гореть либо на начальном участке, либо на выходе ускорителя, создавая большой поток примесей с электродов. В настоящей работе с целью непрерывного перемещения разряда расстояние между электродами на начальном участке ускорителя было уменьшено с помощью вставки, соединенной с наружным электродом. Диаметр вставки подбирался экспериментально.

Для измерения параметров плазменной струи стэнд был оснащен набором необходимых диагностик. Давление на оси плазменной струи регистрировалось пьезоэлектрическим датчиком диаметром 20 мм. В отличие от ранее используемых приборов настоящий детектор был надежно экранирован от электромагнитных наводок и потенциала плазменной струи. Измерение скорости движения ионизационного фронта плазменной струи проводилось с помощью электронно-оптической видеокамеры K008 фирмы-изготовителя ООО БИФО в режиме линейной развертки. Эти методики подробно описаны в работе [12].

Размер и профиль энергии в поперечном сечении струи измерялись с помощью медного экрана с размерами $220 \times 220 \text{ mm}$, толщиной 0.1 mm и инфракрасной камеры FLIR серии SC7300M. Экран размещался в вакуумной камере перпендикулярно направлению распространения струи плазмы. Тепловизор располагался с теневой стороны экрана снаружи вакуумной камеры. На зачерненной теневой стороне экрана регистрировалось поле температур, создаваемое потоком плазмы. Термограмма с высокой достоверностью характеризовала профиль плотности кинетической энергии и поперечные размеры струи плазмы в месте ее взаимодействия с экраном. Перемещение экрана вдоль оси струи позволяло измерять зависимость диаметра пятна и энергию струи от расстояния до источника.

Проводились измерения давления с помощью тепловизора и отклоняющегося дюралюминиевого экрана с размерами $150 \times 150 \text{ mm}$, толщиной 0.2 mm, закрепленного на оси. Тепловизор, как и в случае измерения диаметра пятна струи, располагался с теневой стороны экрана. Метод был основан на импульсном характере воздействия плазмы на экран. Предполагалось, что струя

плазмы передавала весь импульс экрану в центре масс однонаправленно за время Δt_p , равное длительности импульса разряда. Среднее давление, оказываемое плазмой с силой F на экран площадью S с учетом того, что рассматриваемая задача импульсная, будет иметь вид

$$\langle P \rangle = \frac{F}{S} = \frac{dp}{S \cdot dt} \approx \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t_p}, \quad (1)$$

где Δp — изменение импульса центра масс экрана.

При воздействии плазмы центр масс экрана отклоняется на высоту h с начальной угловой скоростью ω . Применяя теорему об изменении кинетического момента [22] с учетом вышеуказанных предположений и обозначений, получаем

$$\Delta p \cdot l_p = J \cdot \omega. \quad (2)$$

Здесь $l_p = a/2$ — плечо действия силы, где a — длина стороны экрана, $J = M \cdot a^2/3$ — момент инерции экрана, вращающегося вокруг одной из своих сторон, где M — масса экрана. Угловой скорости центра масс экрана ω после соударения соответствует начальная поступательная скорость u : $\omega = 2 \cdot u/a$. Считая, что вся приобретенная кинетическая энергия экрана $M \cdot u^2/2$ переходит в потенциальную энергию, получаем $\frac{M \cdot u^2}{2} = M \cdot g \cdot h$, откуда $u = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. Из уравнения (2) получаем импульс $\Delta p = \frac{4}{3} \cdot M \cdot u$. Тогда среднее давление, создаваемое плазмой на экране площадью S , с учетом малости h переписывается в виде

$$\langle P \rangle \approx \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t_p} \approx \frac{4}{3} \cdot \frac{M \cdot u}{S \cdot \Delta t_p} \approx \frac{4}{3} \cdot \frac{M}{S \cdot \Delta t_p} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}. \quad (3)$$

Будем считать, что давление плазмы на поверхность экрана подобно давлению невязкой жидкости некоторой плотности ρ и скорости движения v :

$$P \sim \frac{\rho \cdot v^2}{2} \sim v^2. \quad (4)$$

Поскольку $T \sim v^2$, профили давления и температуры на экране будут подобны друг другу: $P(x) \sim T(x)$ при условии, что профиль струи аксиально симметричен. Следовательно, профили можно связать через средние значения этих величин коэффициентом $K_p = \langle P \rangle / \langle T \rangle$, где $\langle T \rangle$ — средняя температура экрана, $\langle P \rangle$ — среднее давление. Тогда для выделенного участка поверхности экрана величину давления можно рассчитать по формуле

$$\langle P \rangle_{S'} = \langle P \rangle \cdot \frac{\langle T \rangle_{S'}}{\langle T \rangle} \approx \frac{4}{3} \cdot \frac{M}{S \cdot \Delta t_p} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \frac{\langle T \rangle_{S'}}{\langle T \rangle}, \quad (5)$$

где $\langle T \rangle_{S'}$ — средняя по выделенному участку поверхности площадью S' температура экрана.

При оценке распределения кинетической энергии удобнее воспользоваться величиной поверхностной

плотности энергии струи $w_\sigma = \frac{dW}{dS}$. Используя рассуждения, аналогичные тем, которые были применены для вывода профиля давления (так как $W \sim v^2$), получаем

$$w_\sigma(x) = \frac{dW}{dS}(x) = K_w \cdot T(x). \quad (6)$$

Размерный коэффициент K_w определяется из интегральной формулы энергосодержания экрана

$$W_{target} = C \cdot m \cdot \langle T \rangle, \quad (7)$$

где W_{target} — полная энергия, выделившаяся в экране, m — масса экрана, подвергшегося нагреву плазмой, C — удельная теплоемкость экрана. Тогда K_w можно записать следующим образом:

$$K_w = C \cdot \frac{dm}{dS} \approx C \cdot \frac{m}{S}. \quad (8)$$

Приближение связано с тем, что плотность экрана считается однородной, теплоемкость постоянна для любой температуры. Профиль плотности энергии струи переписывается в выражение

$$w_\sigma(x) \approx C \cdot \frac{m}{S} \cdot T(x). \quad (9)$$

Применимость формулы (9) определяется тем, что она была получена без учета растекания струи и других эффектов взаимодействия плазмы с поверхностью.

2. Результаты исследования

С целью фокусировки и транспортировки струи плазмы без потери ее кинетической энергии и давления на большие расстояния были опробованы многочисленные варианты ускорителей, оснащенных внешними магнитными полями. Результаты этих экспериментов оказались отрицательными: холодная и плотная струя плазмы (с энергией и плотностью $\sim 1 \text{ eV}$ и 10^{22} m^{-3} соответственно) практически не взаимодействовала с магнитным полем $\sim 1 \text{ T}$. Оценки показали, что ее удельное сопротивление составляло $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ (для меди этот параметр составляет $\sim 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Механизмы замедленности и скин-эффект не действовали.

2.1. Исследования коаксиального ускорителя, оснащенного цилиндрической вставкой, соединенной с наружным электродом

На рис. 3 представлены зависимости давления струи от расстояния до ускорителя для различных полярностей напряжения и длин электродов. Видно, что при отрицательной полярности напряжения на центральном электроде давление струи увеличивалось примерно в 2 раза по сравнению с давлением, создаваемым ускорителем с положительной полярностью (полярность плазменного фокуса). Можно предположить, что на

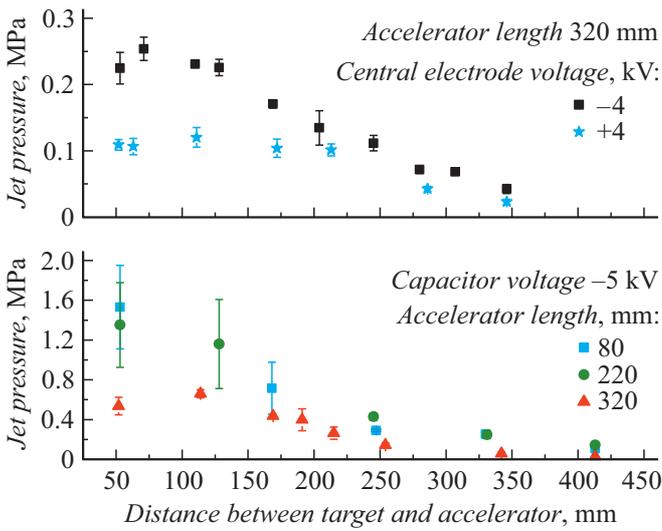


Рис. 3. Зависимости давления струи от расстояния до ускорителя для различных полярностей и длин электродов.

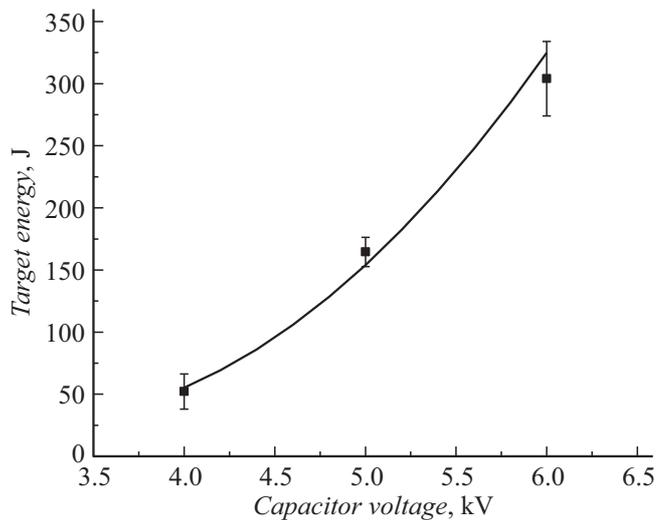


Рис. 4. Зависимость энергии плазменной струи, выделенной на экране, от напряжения на конденсаторе. Точки — измеренные значения, кривая линия — аппроксимация параболой.

выходе ускорителя с полярностью плазменного фокуса формировалась область плазмы, направленная скорость которой уменьшалась. В последующих экспериментах полярность центрального электрода была отрицательной. Для разных длин электродов коаксиального ускорителя были исследованы зависимости давления струи от расстояния до источника плазмы. Из графика видно, что наибольшее давление создавали ускорители с длиной электродов менее 220 мм. Давление значительно уменьшалось с 1.6 до 0.1 МПа при увеличении расстояния от 100 до 400 мм. В последующих экспериментах длина электродов составляла 220 мм.

Проводились эксперименты по измерению энергии струи плазмы как функции от напряжения, приклады-

ваемого на электроды. Наблюдался квадратичный рост энергии потока с увеличением напряжения (рис. 4). Энергия струи оценивалась по нагреву экрана после облучения плазмой по формуле (7).

Исследования зависимостей диаметра пятна термограммы и энергии, выделяемой в мишени от расстояния до источника с напряжением на конденсаторе 5 кВ, представлены на рис. 5. Из графика видно, что диаметр пятна на расстоянии от ускорителя 0.5 м составлял ~ 50 мм на уровне $T_{max/2}$. Однако при большем удалении от источника струя расширялась, и ее диаметр достигал 90 мм на расстоянии 0.85 м. По мере удаления экрана от источника энергия, выделяемая в мишени,

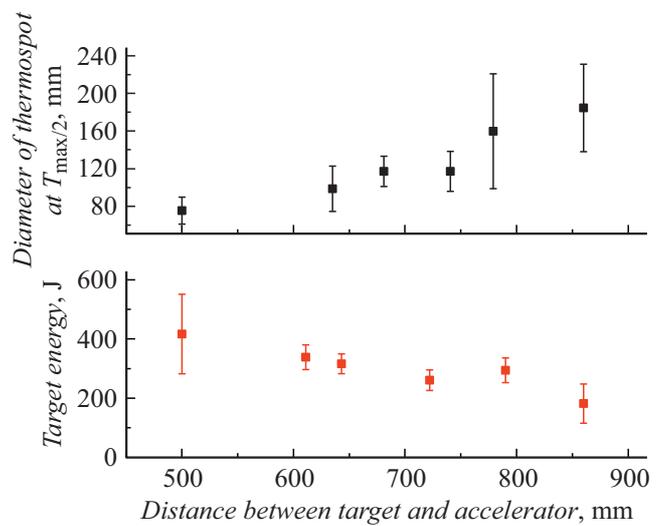


Рис. 5. Зависимости диаметра пятна нагрева и энергии, выделяемой в экране, от расстояния до источника.

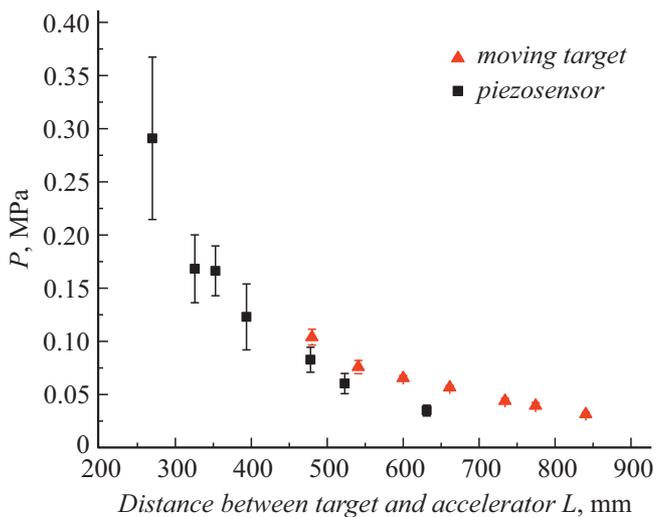


Рис. 6. Зависимости среднего давления плазменной струи от расстояния до источника плазмы на участке диаметром 20 мм, измеренные различными диагностиками: пьезоэлектрическим датчиком (квадраты) и методом с использованием подвижного экрана-маятника (треугольники), в обоих случаях рабочим газом был дейтерий.

уменьшалась примерно с 300 до 200 J на расстоянии с 0.5 до 0.85 m соответственно. Можно предположить, что на большом расстоянии диаметр струи превышал размеры экрана.

Проводились эксперименты по измерению давления струи плазмы с помощью пьезоэлектрического датчика и методом отклоняющегося экрана. На рис. 6 представлены зависимости среднего по участку измерения давления струи плазмы от расстояния до источника, полученные с помощью пьезоэлектрического датчика (квадраты) и отклоняющегося экрана (треугольники). Участок, по которому проводилось усреднение, совпадал с областью чувствительности пьезоэлектрического датчика. Это область на оси струи диаметром 20 mm. Применяя формулу (5), было получено среднее по аналогичной области давление струи для случая отклоняющегося экрана. Видно, что значения среднего давления, полученные с помощью метода отклоняющегося экрана, совпадают с величинами, измеренными с помощью пьезоэлектрического датчика.

2.2. Исследования коаксиального ускорителя, оснащенного конической вставкой, соединенной с наружным электродом

Результаты исследования ускорителя с конической вставкой (угол раствора конуса равен примерно $\sim 25^\circ$) показали не только непрерывное перемещение разряда

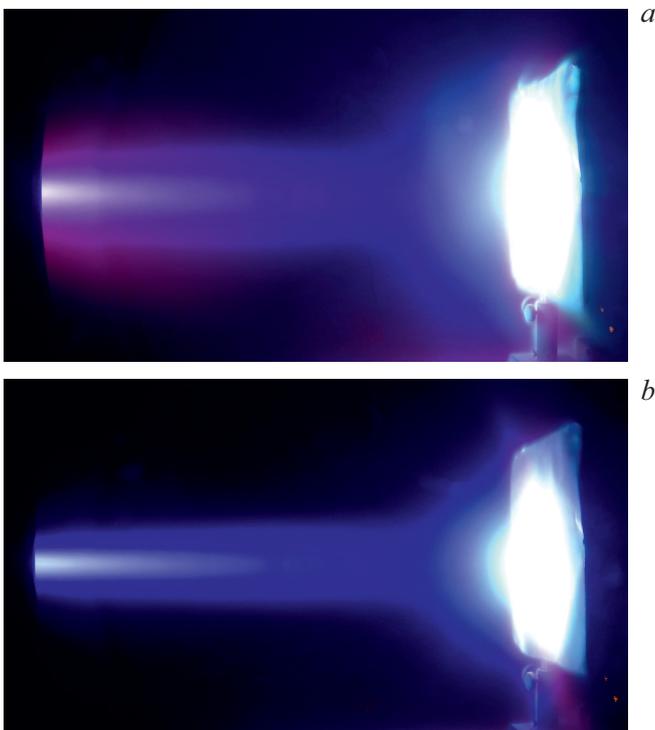


Рис. 7. Плазменная струя, облучающая экран; *a* — ускоритель с цилиндрической вставкой; *b* — ускоритель с конической вставкой. Расстояние между экраном и ускорителем 970 mm, напряжение на конденсаторном накопителе 5 kV.

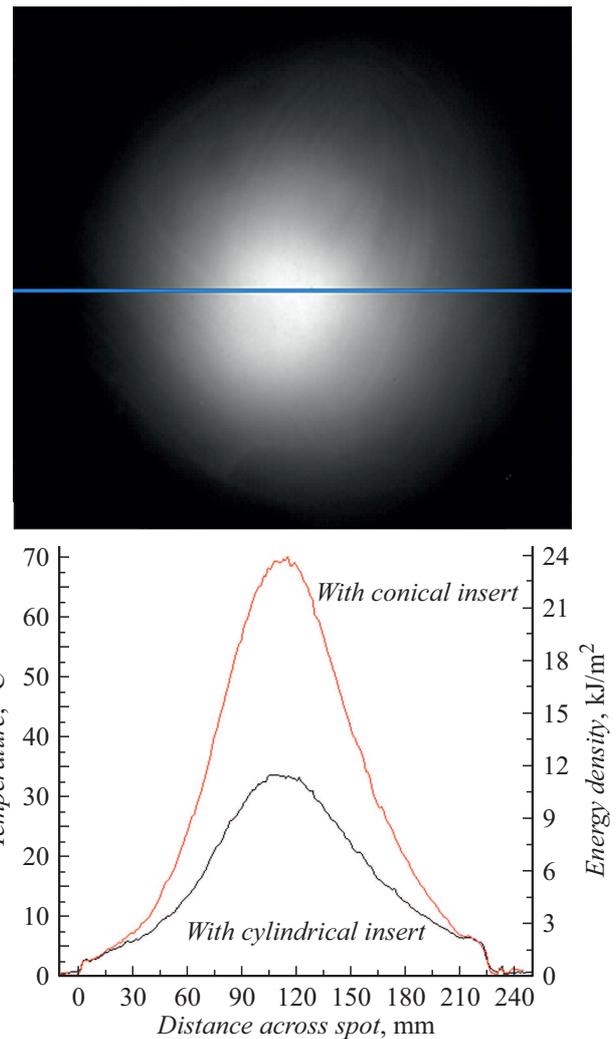


Рис. 8. Термограмма мишени после взаимодействия с потоком плазмы и зависимость температуры вдоль выделенного направления на термограмме. Расстояние между экраном и ускорителем 970 mm, напряжение на конденсаторном накопителе 5 kV.

вдоль электродов, но и фокусировку плазменной струи. Возможно, частицы плазмы, отражаясь от внутренней поверхности конуса с током, приобретали направленное движение вдоль оси ускорителя, поэтому наилучшие характеристики плазменной струи были получены с помощью коаксиального ускорителя с конической вставкой, соединенной с наружным электродом. На рис. 7 представлены фотографии интегральных во времени излучений струй, создаваемых ускорителем с цилиндрической и конической вставками. Во втором случае виден более узкий факел по сравнению с факелом, создаваемым ускорителем с цилиндрической вставкой.

Термограмма мишени после взаимодействия с потоком плазмы и зависимость температуры вдоль выделенного направления на термограмме представлены на рис. 8. Горизонтальная линия показывает направление, вдоль которого температура экрана отображается на

графике. Максимальная яркость на термограмме соответствует максимальной температуре. Видно, что поперечный размер пятна аксиально симметричен. Температура экрана после облучения плазмой ускорителем с конической вставкой увеличилась в 2 раза по сравнению с температурой после облучения ускорителем с цилиндрической вставкой. Оценки показали, что применение конической вставки позволило увеличить энергию, выделяемую в экране, до 20% от энергии конденсаторного накопителя, равной 2 кДж.

Среднее давление плазменной струи, создаваемой коаксиальным ускорителем с конической вставкой, оказалось больше, чем в аналогичных экспериментах для рельсовых плазменных ускорителей [20], где на расстояниях $\sim 0.3\text{--}0.4\text{ м}$ были получены значения, не превышающие 0.1 МПа.

Заключение

Проведены исследования коаксиального ускорителя с различной геометрией канала формирования плазменной струи. Получены зависимости давления и диаметра струи дейтериевой плазмы от расстояния до ускорителя, а также его длины и полярности напряжения на электродах. Наиболее эффективным оказался ускоритель плазмы длиной, не превышающей 220 мм, отрицательной полярностью напряжения на центральном электроде и фокусирующей конической вставкой в начале наружного электрода. На выходе источника была получена дейтериевая плазма со скоростью движения ионизационного фронта более 100 км/с, давлением плазмы более 1 МПа. Получена экспериментальная зависимость энергии потока от напряжения на электродах ускорителя. Наблюдался квадратичный рост кинетической энергии струи при увеличении напряжения. Предложен метод измерения давления с помощью отклоняющегося экрана и тепловизора. Зависимости среднего давления от расстояния до источника, полученные с помощью методов отклоняющегося экрана и пьезоэлектрического датчика, оказались аналогичными.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке проекта министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 05.585.21.0007 „Совершенствование основных технологических систем токамака КТМ, включая систему управления плазмой, сбора и обработки экспериментальных данных, систему предионизации рабочего газа, диверторную систему“.

Благодарности

Экспериментальный стенд для проведения испытаний плазменной пушки создан и поддерживается ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] ITER Physics Basis // Nucl. Fusion. 1999. Vol. 39. N 12. P. 2391–2469.
- [2] Yao L. // Nucl. Fusion. 1998. Vol. 38. N 4. P. 631–638.
- [3] Rozhansky V., Senichenkov I., Veselova I., Morozov D., Schneider R. // Nucl. Fusion. 2006. Vol. 46. N 2. P. 367–382.
- [4] Perkins L.J., Ho S.K., Hammer J.H. // Nucl. Fusion. 1988. Vol. 28. N 8. P. 1365–1378.
- [5] Intrator T.P. IEEE memb., Park J.Y. et al TPS0200 Special Issue on Plenary/Invited Talks from ICOPS 2003 — Feb '04.
- [6] Intrator T.P., Zhang S.Y., Degnan J.H., Furno I., Grabowski C., Hsu S.C., Ruden E.L., Sanchez P.G., Taccetti J.M., Tuszewski M., Waganaar W.J., Wurden G.A. // Phys. Plasma. 2004. Vol. 11. N 5. P. 2580–2585.
- [7] Raman R., Martin F., Haddad E., St-Onge M., Abel G., Cote C., Richard N., Blanchard N., Mai H., Quirion B., LaChambre J.-L., Gauvreau J.-L., Pacher G., DeCoste R., Gierszewski P., Hwang D., Hirose A., Savoie S., LeBlanc B.-J., McLean H., Xiao C., Stansfield B., Cote A., Michaud D., Chartre M. // Nucl. Fusion. 1997. Vol. 37. N 7. P. 967–972.
- [8] Drobyshevsky E.M., Zhukov B.G., Sakharov V.A. // IEEE. Trans. Magn. 1995. Vol. 31. N 1. P. 299–302.
- [9] Combs S.K. // Rev. Sci. Instrum. 1993. Vol. 64. N 7. P. 1679–1698.
- [10] Voronin A.V., Hellblom K.G. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 1999. Vol. 41. P. 293–302.
- [11] Семенов В.К., Снекторов Л.А. // ЖТФ. 1964. Т. 34. С. 853–860.
- [12] Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Судьбенков Ю.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 36–42. [Voronin A.V., Gusev V.K., Gerasimenko Ya.A., Sud'benkov Yu.V. // Tech. Phys. 2013. Vol. 58. N 8. P. 1122–1128. <http://link.springer.com/article/10.1134%2F51063784213080264>]
- [13] Abramova K.B., Voronin A.V., Gusev V.K., Mukhin E.E., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Chernyshev F.V. // Plasma Phys. Report. 2005. Vol. 31. N 9. P. 721–729.
- [14] Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Abramova K.B., Sklyarova E.M., Tolstyakov S.Yu. // Nucl. Fusion. 2005. Vol. 45. N 9. P. 1039–1045.
- [15] Gusev V.K., Chernyshev F.V., Golant V.E., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2006. Vol. 46. N 8. P. S584–S591.
- [16] Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Mukhin E.E., Tolstyakov S.Yu., Kurskiev G.S., Kochergin M.M., Hellblom K.G. // Nukleonika. 2008. Vol. 53. N 3. P. 103–109.
- [17] Gusev V.K., Aminov R.M., Berezutskiy A.A., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Dyachenko V.V., Ivanov A.E., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Larionov M.M., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Panashnikov A.A., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shevelev A.E., Senichenkov I.Yu., Shcherbinin O.N., Stepanov A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yagnov V.A., Yashin A.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2011. Vol. 51. N 10. P. 103019.

- [18] *Gusev V.K.* et al. // Nucl. Fusion. 2009. Vol. 49. N 10. P. 104021.
- [19] *Sladkomedova A.D., Voronin A.V., Alekseev A.G., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Zabrodsky V.V.* // Phys. Scr. 2018. Vol. 93. P. 10560123-29.
- [20] *Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Гусев В.К., Новохацкий А.Н., Поляев С.А.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 7. С. 1021–1024.
- [21] *Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 3. С. 155–160.
<https://journals.ioffe.ru/articles/10863>
[Voronin A.V., Gusev V.K., Gerasimenko Ya.A.] // Tech. Phys. 2013. Vol. 58. N 3. P. 462–465.
<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063784213030250>
- [22] *Маркеев А.П.* Теоретическая механика: учебник для университетов. 2-е изд. М.: ЧеРо, 1999. 572 с.