

## Формирование струи газа с помощью ускорителя плазмы

© В.Ю. Горяинов,<sup>1,2</sup> А.В. Воронин<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vgorjainov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2024 г.

Принято к публикации 19 сентября 2024 г.

Предложен метод формирования потока гелия с помощью ускорителя плазмы. Метод состоит в трансформации плотной и холодной струи плазмы в поток газа. С этой целью плазма пропусклась через длинный канал, в котором по мере движения она могла рекомбинировать. На выходе рекомбинационной трубы мог образовываться поток газа, скорость которого близка к скорости движения потока плазмы. В результате проведенных исследований обнаружены условия, при которых из трубы в основном выходила струя нейтрального гелия со скоростью около 10 км/с. Струю гелия, движущуюся с большой скоростью, планируется применить в составе гелиевого термометра для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2.

**Ключевые слова:** ускоритель плазмы, газовая струя, гелиевый термометр, токамак.

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59095.309-23

### Введение

В настоящее время плазменные ускорители успешно применяются для задач управляемого термоядерного синтеза. Струя плазмы активно используется для иницирования разряда и подпитки топливом установок с магнитным удержанием, а также для моделирования условий взаимодействия плазмы с первой стенкой реактора [1,2]. В настоящее время применяется и инжекция газа в плазму для решения различных задач. Струя газа с большой кинетической энергией может эффективно проникать через магнитное поле в центральную область токамака. Напуск гелия в водородную или дейтериевую плазму активно использовался для диагностических целей в экспериментах на токамаках ФТ-2, COMPASS, MAST, DIII-D, TEXTOR, MST, JET, ASDEX-U, JT-60 и др. и стеллараторах TJ-II, LHD [3–5]. Скорость потока газа в этих экспериментах была ограничена и близка к скорости звука ( $\sim 1$  км/с). Для глубокого зондирования плазмы существует потребность в увеличении скорости движения струи. С этой целью в настоящей работе предлагается метод генерации струи гелия, движущейся со скоростью в несколько десятков километров в секунду. Метод состоит в трансформации плотной и холодной струи плазмы в поток газа. С этой целью плазма пропусклась через длинный канал, в котором по мере движения она могла рекомбинировать. В результате на выходе рекомбинационной трубы мог образовываться поток газа, скорость которого близка к скорости движения потока плазмы.

В настоящей работе представлены результаты формирования потока гелия, создаваемого с помощью коакси-

ального ускорителя плазмы и длинной рекомбинационной трубы. В ходе проведенных исследований обнаружены условия, при которых из источника выходила струя гелия со скоростью движения в несколько десятков километров в секунду.

### 1. Факторы, влияющие на рекомбинацию плазмы

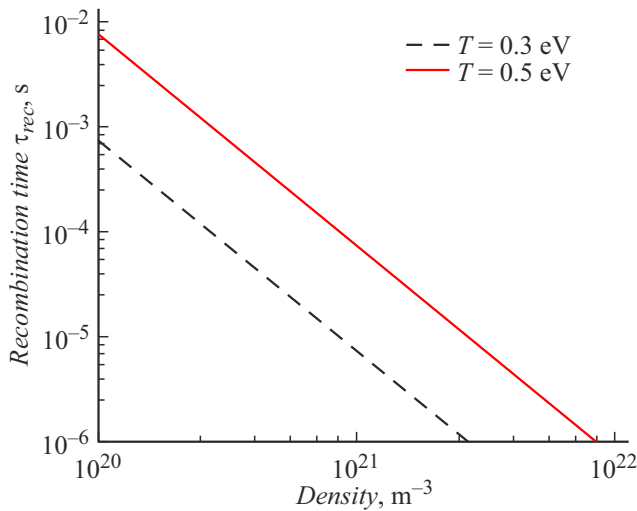
Выбор параметров экспериментальной установки про-изводили на основании расчетов, представленных ниже. Известно [6], что скорость рекомбинации плазмы определяется соотношением

$$\frac{dn_i}{dt} = -\alpha n_e n_i, \quad (1)$$

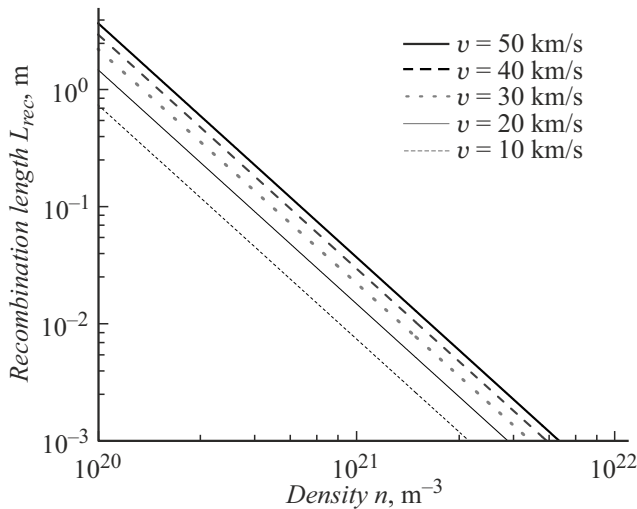
где  $n_i$  и  $n_e$  — концентрация ионов и электронов соответственно,  $[\text{cm}^{-3}]$ ;  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации,  $[\text{cm}^3/\text{s}]$ .

В зависимости от параметров плазмы в ней могут преобладать различные механизмы рекомбинации: фото-рекомбинация, диэлектронная, диссоциативная, тройная электрон-ионная и др. Параметры плазменной струи, создаваемой настоящим ускорителем, представлены в работах [7,8]. Характерные значения плотности, скорости и температуры струи плазмы не превышали  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ , 100 км/с и 0.5 эВ соответственно.

Полагаем, что в низкотемпературной и плотной водородоподобной плазме преобладает процесс тройной электрон-ионной рекомбинации [6]. Тогда коэффициент



**Рис. 1.** Зависимость времени тройной рекомбинации от концентрации для плазмы с температурой 0.3 и 0.5 eV.



**Рис. 2.** Зависимости расстояния, необходимого для рекомбинации плазмы с температурой 0.5 eV, от концентрации для различных скоростей движения струи.

рекомбинации имеет вид

$$\alpha \approx \frac{0.6 \cdot 10^{-27} n_e}{T_e^{9/2}}, \quad (2)$$

где  $T_e$  — температура, [eV].

Характерное время рекомбинации можно оценить по формуле

$$\tau = \frac{1}{\alpha n_e} = 1.67 \cdot 10^{27} \frac{T_e^{9/2}}{n_e^2}, \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость времени тройной рекомбинации от концентрации для плазмы с двумя значениями температуры.

Видно, что для плотной и холодной плазмы характерное время рекомбинации может составлять от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд.

Оценку расстояния  $L$ , необходимого для трансформации плазменной струи в поток газа, вычисляли по формуле

$$L = v \cdot \tau = v \cdot 1.67 \cdot 10^{27} \frac{T_e^{9/2}}{n_e^2}, \quad (4)$$

где  $v$  — скорость движения струи.

Выбор длины рекомбинационной трубы определяли из графика зависимости расстояния, необходимого для трансформации плазмы в газ, от концентрации (рис. 2).

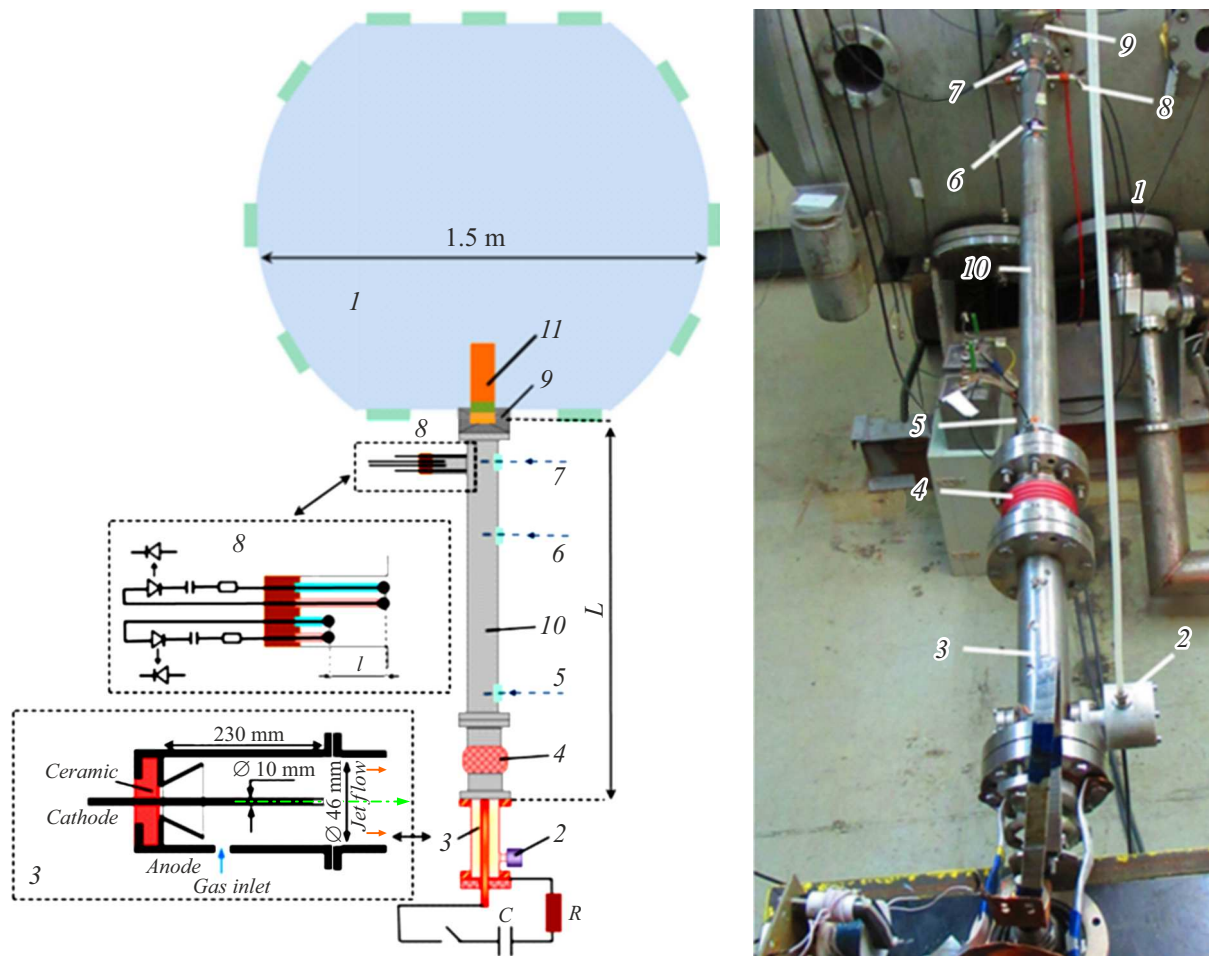
Видно, что для концентрации более  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  длина рекомбинационной трубы может быть менее 2 м. В эксперименте применяли трубу из нержавеющей стали длиной 1.37 м с внутренним диаметром 46 мм, соответствовавшего диаметру внешнего электрода ускорителя.

## 2. Экспериментальный стенд

Исследование процесса трансформации струи плазмы в струю газа проводили на стенде, содержащем набор диагностик и вакуумную камеру объемом  $2.5 \text{ m}^3$  с затвором, через который можно было присоединять различные варианты ускорителей. Струя могла свободно вытекать в камеру. Схема экспериментального стенда и внешний вид плазменного ускорителя представлены на рис. 3.

Коаксиальный ускоритель плазмы питали от емкостного накопителя  $C = 400 \mu\text{F}$  с напряжением на электродах до 5 kV. Ограничивающее сопротивление  $R$  составляло  $0.05 \Omega$ . До начала разряда в ускоритель напускали рабочий газ с помощью быстродействующего электродинамического клапана. Полное количество частиц рабочего газа задавали в диапазоне  $(0.5-1) \cdot 10^{19}$ . Спустя  $\sim 400 \mu\text{s}$  после открытия клапана инициировали ток в ускорителе. Образующаяся плазма ускорялась в канале за счет силы Ампера и выходила из ускорителя. Длительность импульса тока составляла около  $40 \mu\text{s}$ . Схема ускорителя представлена на рис. 3 (слева), 3. Подробную информацию о работе ускорителя и его параметрах можно найти в работах [7,8]. Рекомбинационную трубу, в которой плазма по мере движения могла трансформироваться в поток газа, располагали соосно за ускорителем.

Давление струи измеряли с помощью датчика, расположенного на выходе трубы. В качестве чувствительного элемента применяли пьезокерамическую трубку марки ЦТС19 диаметром 18 и длиной 22 мм. Толщина стенки составляла 1 мм. Сторона трубки, обращенная к струе, была закрыта диском из оргстекла толщиной 2 мм. Датчик и подводящие провода были экранированы металлической фольгой. Калибровка датчика проводилась с помощью сертифицированного сенсора давления фирмы PCB piezotronics.



**Рис. 3.** Схема экспериментального стенда (слева) и внешний вид плазменного ускорителя, оснащенного рекомбинационной трубой длиной  $L$  (справа). 1 — вакуумная камера, 2 — газовый клапан, 3 — ускоритель плазмы, 4 — металлокерамический переход, 5 — окно для сбора излучения РМ1, 6 — окно для сбора излучения РМ2, 7 — окно для сбора излучения РМ3, 8 — зонды для измерения тепловой скорости струи, 9 — вакуумный затвор, 10 — рекомбинационная труба, 11 — пьезоэлектрический датчик давления.

Эффективность трансформации плазмы в поток газа оценивали по отношению РМ1/РМ3 — интенсивностей свечения струи в видимой области спектра на входе и выходе рекомбинационной трубы, с помощью фотоэлектронных умножителей с калиброванными коэффициентами усиления. Расстояние между ними составляло 1.14 м.

Зависимость изменения скорости движения струи вдоль трубы  $v(L)$  вычисляли с помощью временных задержек между сигналами РМ1-РМ2, РМ2-РМ3 и РМ1-РМ3 (рис. 3). Измерения проводили между началами фронтов нарастания сигналов. Скорость струи на выходе определяли с помощью экстраполяции зависимости  $v(L)$  на край трубы.

Радиальную скорость расширения струи газа измеряли с помощью двух двойных зондов 8 (рис. 3), расположенных на различной глубине в боковом патрубке вблизи выхода рекомбинационной трубы. Полагаем, что струя адиабатически расширяется, и эта скорость соответству-

ет скорости звука в газе [9]. Регистрировали время задержки между фронтами нарастания сигналов зондов. Постоянное напряжение от конденсаторов подавали на каждый зонд через светодиоды и ограничивающие сопротивления. Напряжение и сопротивление составляли 1–2 кВ и 1 кΩ соответственно. Во время контакта зонда с плазмой в цепи протекал ток, который регистрировали с помощью оптической развязки и АЦП. По задержке между передними фронтами токов вычисляли радиальную скорость движения струи или скорость звука в газе по формуле

$$v_s = l/\Delta t_{prob}, \quad (5)$$

где  $l$  — расстояние между зондами,  $\Delta t_{prob}$  — время задержки между сигналами, пришедшими на зонды. Температуру струи вычисляли по формуле [9]:

$$T = \frac{mv_s^2}{kK}, \quad (6)$$

где  $m$  — молекулярная масса атома гелия,  $K$  — постоянная Больцмана,  $k$  — показатель адиабаты; для гелия  $k \approx 1.67$ .

### 3. Результаты исследований

На рис. 4 представлены зависимости параметров струи от времени, создаваемой с помощью ускорителя.

Видно, что до начала разряда в ускоритель напускали рабочий газ в течение  $150 \mu s$ . Спустя  $\sim 400 \mu s$  после открытия клапана инициировали ток в ускорителе. Коэффициенты усиления фотоэлектронных умножителей были откалиброваны относительно друг друга. Видно, что амплитуда сигнала РМ1 на входе была больше амплитуды сигнала РМ3 на выходе, а длительность сигнала РМ1 оказалась меньше длительности сигнала РМ3. Можно предположить, что уменьшение сигнала на выходе было вызвано частичной рекомбинацией плазмы в газ. Увеличение длительности сигнала на выходе вероятно связано с разбросом скоростей частиц в сгустке. Этот эффект мог приводить к растяжению струи вдоль трубы.

Вычисление скорости движения струи с применением задержки между сигналами РМ3 и датчиком давления не проводилось из-за различия временных физических факторов, вызывающих отклик этих детекторов. Так, РМ3 реагировал на излучение ионизационного фронта струи, а пьезодатчик регистрировал давление струи, прошедшей через ударную волну. Это могло приводить к непропорциональному увеличению задержки между сигналами РМ1-РМ3 и РМ3-пьезодатчиком.

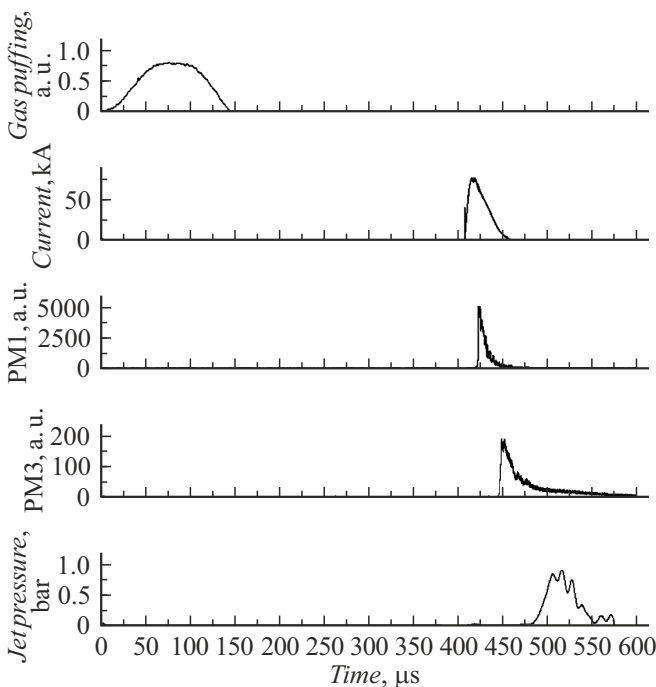


Рис. 4. Зависимости параметров струи от времени, создаваемой с помощью ускорителя плазмы.

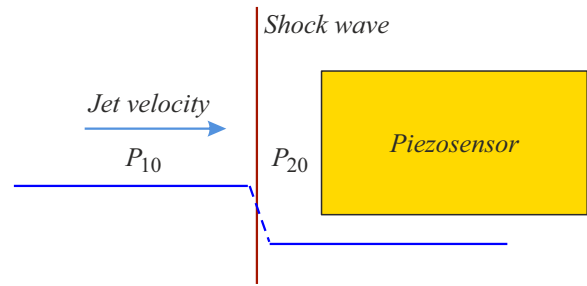


Рис. 5. Схема расположения датчика давления относительно скачка уплотнения.

Для скорости струи больше скорости звука необходимо было учитывать потерю давления после прохождения газа через скачок уплотнения, образующийся перед поверхностью датчика давления. После прохождения скачка происходит потеря механической энергии струи. При этом за количественную величину необратимости прохождения газа через скачок уплотнения принимают величину отношения полного давления за скачком к давлению и перед скачком  $\frac{P_{20}}{P_{10}}$  [10]. На рис. 5 представлена схема расположения датчика давления относительно прямого скачка уплотнения.

В этом случае пьезодатчик измерял не давление  $P_{10}$ , а полное давление  $P_{20}$ . Давление струи рассчитывали по формуле [10]:

$$P_{10} = \frac{P_{20} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(kM^2 - \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} M^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (7)$$

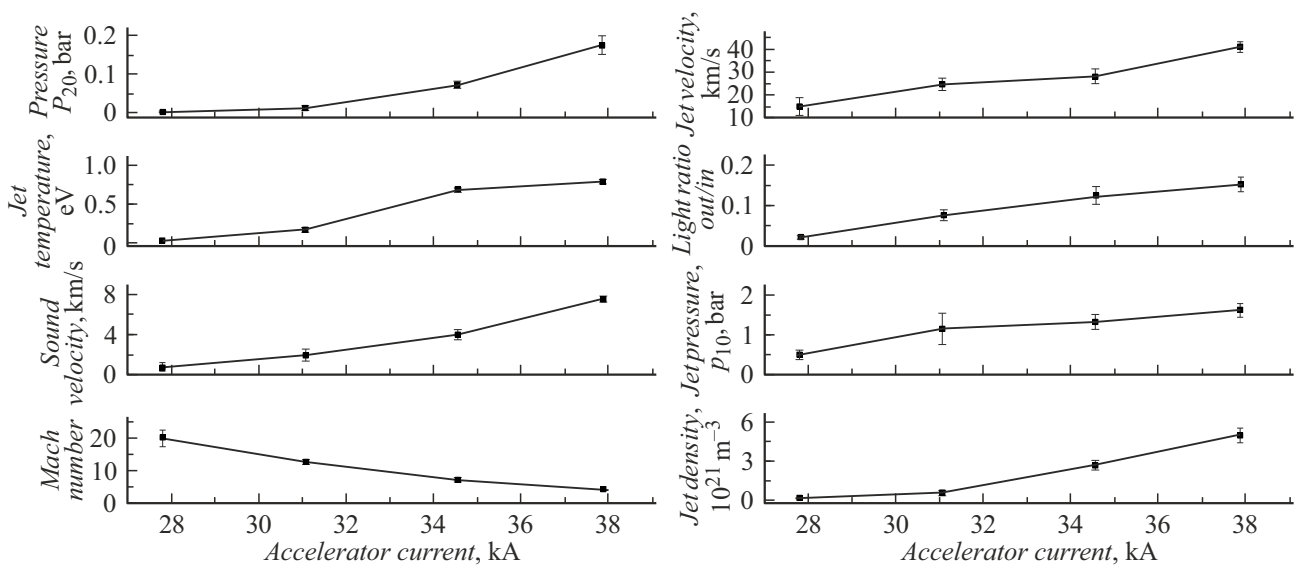
где  $M = \frac{v}{v_s}$  — число Маха перед скачком. Оценку концентрации частиц в струе производили по формуле Клапейрона–Менделеева:

$$n = \frac{P_1}{m \cdot R \cdot T}, \quad (8)$$

где  $P_1$  — статическое давление струи на выходе рекомбинационной трубы,  $R = 2078 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  — газовая постоянная гелия. Статическое давление  $P_1$  рассчитывали по формуле Релея [10]:

$$P_1 = \frac{P_{20} \left(kM^2 - \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} M^{\frac{2k}{k-1}}}. \quad (9)$$

Результаты исследования параметров струи представлены в виде графиков на рис. 6. Обнаружено существенное различие величин давления до и после ударной волны, образующейся перед поверхностью датчика давления. Отношение давлений после и до скачка уплотнения достигало более 10 раз. Видно, что в исследуемом диапазоне токов температура и скорость звука струи не превышали 1 eV и 8 km/s соответственно. При увеличении тока с 28 до 38 kA скорость струи увеличивалась с 15 до 40 km/s, доля нейтральной компоненты уменьшилась примерно с 13 до 2%, а реальное давление струи



**Рис. 6.** Зависимости параметров струи от амплитуды тока, создаваемой с помощью коаксиального ускорителя плазмы и рекомбинационной трубы.

увеличилось с 0.5 до 1.5 bar. При этом концентрация частиц в струе возросла с  $0.1 \cdot 10^{21}$  до  $5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ .

Струю гелия, движущуюся с большой скоростью, планируется применить в составе гелиевого термометра для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2 [11,12]. Ток ускорителя предполагается подобрать 28–30 кА, при котором из трубы будет выходить струя гелия со скоростью  $\sim 10 \text{ km/s}$ , плотностью  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  и давлением  $\sim 1 \text{ bar}$ . Диаметр струи  $\sim 50 \text{ mm}$  может быть пригоден для локального зондирования периферии плазмы Глобус-М2, так как ее характерные размеры превышают 1 м. Концентрация частиц струи сопоставима с концентрацией плазмы в токамаке, достигающей более  $10^{20} \text{ mm}^{-3}$ . Ранее проведенные эксперименты по инжекции плазменной струи ускорителя с концентрацией  $\leq 10^{22} \text{ m}^{-3}$  в Глобус-М показали, что она могла проникать в объем, не нарушая устойчивость удерживаемой плазмы токамака [13]. Верификацию значений температуры, полученных с помощью гелиевого термометра, оснащенного ускорителем струи, предполагается провести методом сравнения с данными, полученными, например, с помощью зондов.

## Заключение

Продемонстрированы условия формирования потока гелия с помощью коаксиального ускорителя плазмы и длиной рекомбинационной трубы. В результате проведенных исследований был подобран ток ускорителя 28–30 кА, при котором на выходе из трубы в основном выходила струя нейтрального гелия со скоростью  $\sim 10 \text{ km/s}$  и плотностью  $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . Струю гелия, движущуюся с такой скоростью, планируется применить в

составе гелиевого термометра для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2.

## Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № FSEG-2024-0005 с использованием Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включающего уникальную научную установку „Сферический токамак Глобус-М“. Создание и модернизация источника проводилась по госзаданию № 0040-2019-0023, разработка диагностик осуществлялась в рамках госзадания № 0034-2021-0001.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев, В.Б. Минаев, А.Н. Новохацкий, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, Е.Г. Жилин, Б.Ж. Чектыбаев, Е.А. Сарсембаев, А.Д. Садыков, А.Т. Кураинов. *Физика плазмы*, **47** (8), 675 (2021).
- [2] А.Н. Новохацкий, В.К. Гусев, Б.Я. Бер, П.Н. Брунков, В.Л. Букховец, А.А. Герващ, А.Е. Городецкий, С.А. Григорьев, В.Е. Кузнецов, Н.В. Литуновский, А.Н. Маханков, И.В. Мазуль, Е.Е. Мухин, Ю.В. Петров, Т.В. Рыбкина, Н.В. Сахаров, Р.В. Соколов, В.Н. Танчук, С.Ю. Толстяков, А.В. Воронин, А.П. Захаров, Р.Х. Залавутдинов. *Эксперименты с предварительно облученным вольфрамом на токамаке (Глобус-М, — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017)*, т. 40, вып. 4.

- [3] С.И. Лашкул, А.Б. Алтухов, В.В. Дьяченко, Л.А. Есипов, М.Ю. Кантор, Д.В. Куприенко, А.Д. Лебедев, Я.А. Никерман, А.Ю. Попов. *Физика плазмы*, **38** (11), 923 (2012).
- [4] J-W. Ahn, D. Craig, G. Fiksel, D.J. Den Hartog, J.K. Anderson, M.G. O'Mullane. *Phys. Plasmas*, **14**, 083301 (2007).
- [5] M.J. Goto. *Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **76**, 331 (2003).
- [6] А.М. Прохоров (гл. ред.). *Физическая энциклопедия* (Большая российская энциклопедия, М., 1994), т. 4, с. 323.
- [7] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев. *ЖТФ*, **90** (6), 1028 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49294.372. [A.V. Voronin, V.Y. Goryainov, V.K. Gusev. *Tech. Phys.*, **65**, 987 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220060286]
- [8] А.В. Воронин, В.К. Гусев, Я.А. Герасименко, Ю.В. Судьенков. *ЖТФ*, **83** (8), 36 (2013). [A.V. Voronin, V.K. Gusev, Ya.A. Gerasimenko, Yu.V. Sud'enkov. *Tech. Phys.*, **58** (8), 1122 (2013).]
- [9] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Механика сплошных сред* (ГИТТЛ, М., 1953), 2-е изд.
- [10] Л.Г. Лойцянский. *Механика жидкости и газа* (Дрофа, М., 2003), 7-е изд., с. 132.
- [11] В.М. Тимохин, А.И. Рыкачевский, И.В. Мирошников, В.Ю. Сергеев, М.М. Кочергин, А.Н. Коваль, Е.Е. Мухин, С.Ю. Толстяков, А.В. Воронин. *Письма в ЖТФ*, **42** (15), 13 (2016).
- [12] В.М. Тимохин, В.Ю. Сергеев, Е.А. Ануфриев, Д.Д. Коробко, И.А. Шаров, В.И. Варфоломеев, А.Н. Новохацкий, Н.Н. Бахарев, Е.О. Векшина, К.В. Долгова, Н.С. Жильцов, А.А. Кавин, В.Г. Капралов, Е.О. Киселев, А.Н. Коваль, Г.С. Курскиев, К.М. Лобанов, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, Е.Е. Мухин, Ю.В. Петров, В.А. Рожанский, Н.В. Сахаров, В.Г. Скоков, А.Ю. Тельнова, Е.Е. Ткаченко, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Н.А. Хромов. *Письма в ЖЭТФ*, **116** (5), 292 (2022).
- [13] V.K. Gusev, R.M. Aminov, A.A. Berezutskiy, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, A.V. Dech, V.V. Dyachenko, A.E. Ivanov, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, G.S. Kurskiev, M.M. Larionov, A.D. Melnik, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatsky, A.A. Panasenkov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, K.A. Podushnikova, V.A. Rozhansky, V.V. Rozhdestvensky, N.V. Sakharov, A.E. Shevelev, I.Yu. Senichenkov, O.N. Shcherbinin, A.Yu. Stepanov, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.A. Yagnov, A.Yu. Yashin, E.G. Zhilin. *Nucl. Fusion*, **51** (10), 1 (2011).