

Генерация сверхзвуковой струи газа с помощью плазменного ускорителя

© В.Ю. Горяинов^{1,2}, А.В. Воронин¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vgorjainov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2023 г.

В окончательной редакции 11 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Предлагается метод формирования потока нейтрального 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. В результате проведенных исследований обнаружены условия, при которых отношение интенсивностей свечения на входе и выходе из трубы значительно уменьшилось. Струю гелия, движущуюся со скоростью около 10 км/с, планируется применить в составе диагностики температуры для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2.

Ключевые слова: плазменный ускоритель, тройная рекомбинация, сверхзвуковая струя газа.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56862.42A

Струя газа с большой кинетической энергией может эффективно проникать через магнитное поле в центральную область токамака [1,2]. Для глубокого зондирования плазмы существует потребность в увеличении скорости движения струи. С этой целью в настоящей работе предлагается метод генерации потока струи гелия, состоящий в трансформации плотной и холодной струи плазмы в поток газа. Для этого 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.

Исследования проводились на стенде, содержащем набор диагностик и вакуумную камеру объемом 2.5 м³ с затвором, через который можно было присоединять различные варианты ускорителей. Схема экспериментального стенда и внешний вид плазменного ускорителя ($C = 600 \mu\text{F}$) [3] представлены на рисунке. Согласно движению плазменной струи располагался длинный канал — рекомбинационная труба. Давление струи измерялось с помощью пьезоэлектрического датчика, расположенного на выходе рекомбинационной трубы. Эффективность трансформации плазмы в поток газа контролировалась по отношению интенсивностей свечения струи на входе и выходе рекомбинационной трубы (PM1/PM2) с помощью фотозлектронных умножителей с калибровочными коэффициентами усиления. Скорость движения струи на выходе трубы измерялась по времени задержки излучения в окне и PM2 сигнала датчика давления.

Скорость рекомбинации плазмы определяется соотношением

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

где n_i и n_e — концентрации ионов и электронов соответственно, α — коэффициент рекомбинации [4]. Предполагается, что в низкотемпературной и плотной водородоподобной плазме преобладает процесс тройной электрон-ионной рекомбинации. Тогда

$$\alpha \approx \frac{0.6 \cdot 10^{-27} n_e}{T_e^{9/2}} [\text{cm}^3/\text{s}]. \quad (2)$$

Характерное время рекомбинации можно оценить по формуле

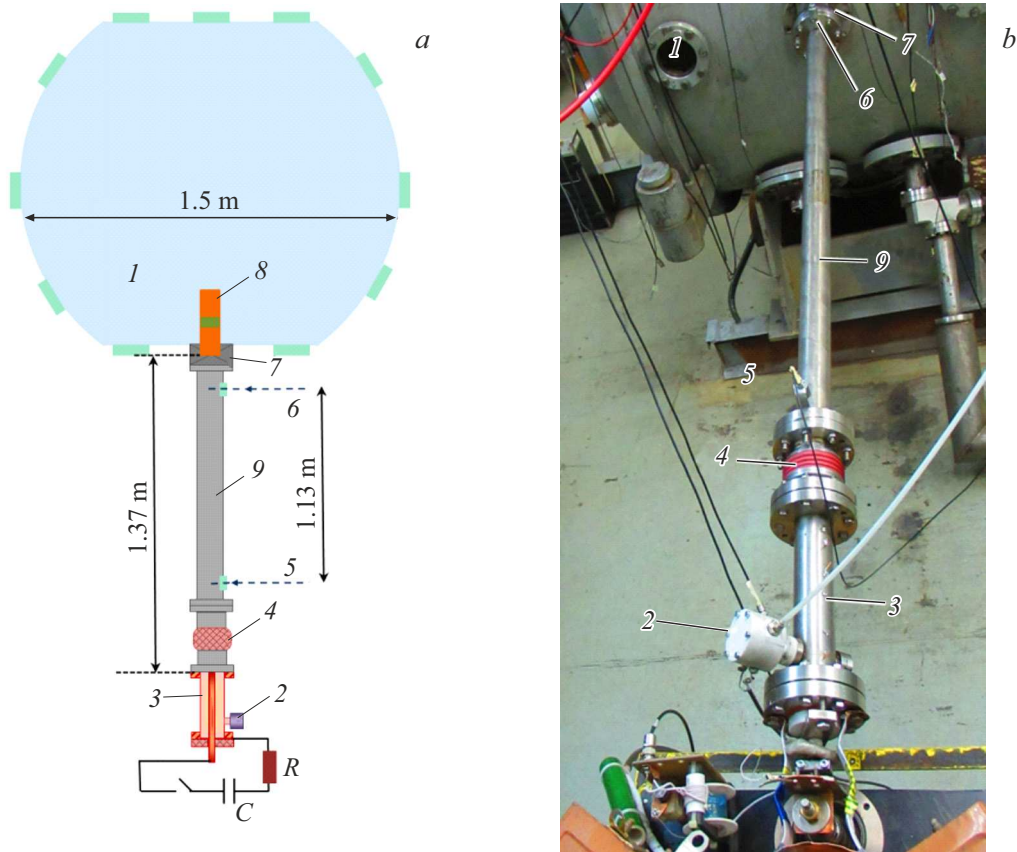
$$\tau = \frac{1}{\alpha n_e} = 1.67 \cdot 10^{27} \frac{T_e^{9/2}}{n_e^2} [\text{s}], \quad (3)$$

где T_e — температура [eV]. Согласно оценкам, для плотной и холодной плазмы характерное время рекомбинации может составлять от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд. Расстояние L , необходимое для трансформации плазменной струи в поток газа, вычислялось по формуле

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

где v — скорость движения струи. Выбор длины рекомбинационной трубы определяли исходя из зависимости расстояния, необходимого для трансформации гелиевой плазмы в газ, от концентрации. Для концентрации более 10^{15} cm^{-3} длина рекомбинационной трубы может быть менее 2 м. В эксперименте применялась труба длиной 1.37 м с внутренним диаметром 46 мм.

Для скорости струи больше скорости звука необходимо учитывать изменение давления после прохождения газа через скачок уплотнения. Полное давление струи



a — схема экспериментального стенда; *b* — внешний вид плазменного ускорителя, оснащенного рекомбинационной трубой длиной L . 1 — вакуумная камера, 2 — газовый клапан, 3 — ускоритель плазмы, 4 — металлокерамический переход, 5 — окно для сбора излучения PM1, 6 — окно для сбора излучения PM2, 7 — вакуумный затвор, 8 — датчик динамического давления, 9 — рекомбинационная труба.

Измеренные параметры гелиевой струи в зависимости от тока ($T_e = 0.5$ eV)

Ток, кА	Отношение интенсивностей PM2/PM1	Скорость струи на выходе v , km/s	Измеренное давление P_{20} , mbar	Плотность невозмущенной струи n , 10^{15} cm $^{-3}$
31.2 ± 0.8	189	5 ± 1	5 ± 2	3 ± 2
51 ± 2	100	7 ± 2	100 ± 60	10 ± 10
62 ± 3	31	12 ± 2	380 ± 80	10 ± 10
73 ± 3	17	30 ± 10	860 ± 60	14 ± 7

P_{10} рассчитывалось по формуле [5]:

$$P_{10} = \frac{P_{20} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \left(k M_1^2 - \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} M_1^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (5)$$

где P_{20} — давление после скачка уплотнения (определяется с помощью измерений пьезодатчика), k — показатель адиабаты (для гелия $k = 1.67$), M_1 — число Маха перед скачком. Статическое давление невозмущенной струи на выходе из рекомбинационной трубы определялось с помощью формулы Клапейрона–Менделеева

$$P_1 = nm_{\text{He}}RT, \quad (6)$$

где m_{He} — масса атома гелия, $R = 2078$ J/(kg · K) — газовая постоянная гелия, T — абсолютная температура струи [K], n — концентрация частиц в струе. Оценку концентрации проводили по формуле

$$n = \frac{P_1}{m_{\text{He}}RT} = \frac{P_1}{KT}, \quad (7)$$

где K — постоянная Больцмана. Давление невозмущенного статического потока P_1 рассчитывали по формуле Рэля [5]:

$$P_1 = \frac{P_{20} \left(k M_1^2 - \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} M_1^{\frac{2k}{k-1}}}. \quad (8)$$

Параметры струи, создаваемой с помощью ускорителя плазмы и рекомбинационной трубы, для различных значений тока сведены в таблицу. Из таблицы видно, что при увеличении тока ускорителя с 30 до 70 кА скорость струи увеличилась в ~ 6 раз, отношение интенсивностей свечения на входе и выходе из патрубка уменьшилось в ~ 10 раз, а измеренное давление P_{20} увеличилось в ~ 200 раз. При этом плотность частиц в струе увеличилась в ~ 5 раз. Для использования на токамаке рассматривается режим с током ~ 50 кА.

Продемонстрированы условия формирования потока нейтрального гелия с помощью ускорителя плазмы и длинной рекомбинационной трубы. В результате проведенных исследований обнаружены параметры, при которых отношение интенсивностей свечения на входе и выходе из трубы значительно уменьшилось. Скорость струи достигала 5–30 км/с, плотность — более 10^{15} см $^{-3}$. Струю гелия планируется применить в составе диагностики температуры [6] для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2.

Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020 с использованием ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включающего УНУ „Сферический токамак Глобус-М“. Создание и модернизация источника проводились 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] A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.K. Gusev, V.B. Minaev, A.N. Novokhatskii, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, E.G. Zhilin, B.Zh. Chektybaev, E.A. Sarsembaev, A.D. Sadykov, A.T. Kusainov, *Plasma Phys. Rep.*, **47** (8), 763 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21080109
- [2] J.-W. Ahn, D. Craig, G. Fiksel, D.J. Den Hartog, J.K. Anderson, M.G. O'Mullane, *Phys. Plasmas*, **14** (8), 083301 (2007). DOI: 10.1063/1.2759191
- [3] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев, *ЖТФ*, **90** (6), 1028 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49294.372-19 [A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.K. Gusev, *Tech. Phys.*, **65** (6), 987 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220060286].
- [4] Физическая энциклопедия, гл. ред. А.М. Прохоров (Большая Российская энциклопедия, М., 1994), т. 4, с. 323.
- [5] Л.Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа* (Дрофа, М., 2003), с. 132.

- [6] 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). [V.M. Timokhin, A.I. Rykachevskii, I.V. Miroshnikov, V.Yu. Sergeev, M.M. Kochergin, A.N. Koval, E.E. Mukhin, S.Yu. Tolstyakov, A.V. Voronin, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (8), 775 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016080162].