

ГЕНЕРАЦИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОДОРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ

© 2023 г. Д. А. Топорков^{a,b,*}, Д. А. Бурмистров^{a,c}, В. В. Гаврилов^{a,**}, А. М. Житлухин^a,
В. А. Костюшин^a, С. Д. Лиджигорьяев^{a,b}, А. В. Пушина^{a,b}, С. А. Пикуз^{d,e},
С. Н. Рязанцев^{d,***}, И. Ю. Скобелев^{d,e,****}

^a ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

^b НИУ “Московский физико-технический институт”, Москва, Россия

^c НИУ “Московский энергетический институт”, Москва, Россия

^d Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^e НИЯУ “Московский инженерно-физический институт”, Москва, Россия

*e-mail: toporkov@triniti.ru

**e-mail: vvgavril@triniti.ru

***e-mail: ryazantsev.serj@gmail.com

****e-mail: igor.skobelev@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 29.04.2023 г.

Представлены результаты исследований, направленных на создание компактного источника мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения при столкновении мощного плазменного потока с газовой струей. В проведенных экспериментах водородный плазменный поток с энергосодержанием ≈ 50 кДж и длительностью 10–15 мкс генерировался импульсным электродинамическим ускорителем. Поток с плотностью $\approx 6 \times 10^{15}$ см⁻³ двигался со скоростью $(2-4) \times 10^7$ см · с⁻¹ в продольном магнитном поле с индукцией до 2 Тл и взаимодействовал с плоской сверхзвуковой газовой струей. Максимальная плотность газа, азота или неона, в струе достигала 10^{17} см⁻³. Продемонстрировано образование компактного излучающего слоя плазмы толщиной 3–5 см, двигающегося по ходу водородного плазменного потока со скоростью $\approx 3 \times 10^6$ см · с⁻¹. В ряде экспериментов для локализации области взаимодействия плазменного потока и газовой струи в зоне, контролируемой диагностическими средствами, использовалась пластина вольфрама в качестве препятствия, ограничивающего смещение излучающей плазмы вдоль магнитного поля. С помощью мягкой рентгеновской обскурографии и спектроскопии получены данные относительно генерации излучения из зоны взаимодействия водородного плазменного потока и газовой струи. Приводятся результаты измерения энергии излучения из образующейся плазмы: ≈ 2 кДж в случае азотной струи и ≈ 3 кДж в случае неоновой. Численное моделирование линейчатого излучения многозарядных ионов и последующее сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволило оценить электронную температуру азотной и неоновой плазмы, образующейся при взаимодействии водородного плазменного потока с газовой струей на уровне ≥ 40 эВ.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, водородная плазма, газовая струя, спектроскопия плазмы

DOI: 10.31857/S0367292123600358, EDN: VYBVZA

1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работах [1, 2] были приведены результаты экспериментов, направленных на генерацию мощного рентгеновского излучения при встречном столкновении плазменных потоков, сформированных двумя электродинамическими коаксиальными ускорителями с импульсным на-

пуском газа. В этих экспериментах плазменные потоки после выхода из ускорителей двигались по плазмопроводу со скоростями $(2-4) \times 10^7$ см · с⁻¹ навстречу друг другу в продольном магнитном поле 1–2 Тл и сталкивались в центре вакуумной камеры. В результате, в зоне взаимодействия формировалось квазистационарное цилиндрическое плазменное образование диаметром ≈ 15 см и

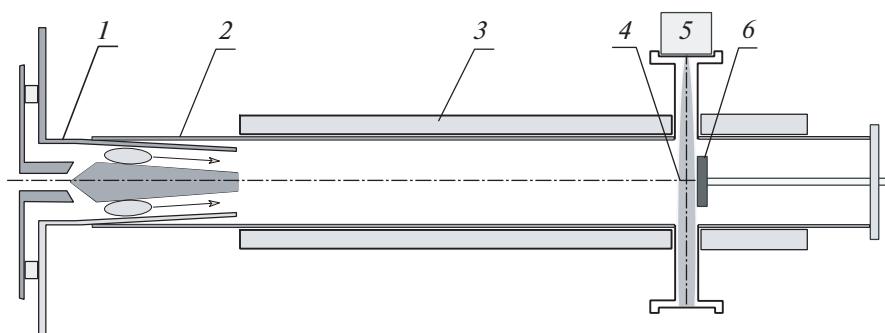


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — импульсный плазменный ускоритель, 2 — цилиндрическая вакуумная камера, 3 — соленоиды продольного магнитного поля, 4 — газовая струя, 5 — формирователь газовой струи, 6 — вольфрамовая мишень.

протяженностью ≈ 80 см, в котором значительная часть кинетической энергии потоков преобразовывалась в тепловую энергию плазмы. При использовании азота в качестве рабочего газа полная энергия излучения с энергией фотонов ≈ 400 эВ составляла ≈ 10 кДж, а в случае использования смеси неона и дейтерия 2 кДж в области ≈ 1 кэВ. Длительность импульсов излучения в обоих случаях составляла ≈ 10 мкс.

По результатам экспериментов была сформулирована задача о необходимости создания, без снижения мощности, более компактного источника излучения на основе конверсии кинетической энергии плазменных потоков. В данной работе представлены результаты исследований, направленных на решение этой задачи.

2. УСТАНОВКА МК-200

Эксперименты проводились на установке МК-200 в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. В ее состав входит импульсный плазменный ускоритель с вакуумной камерой транспортировки плазменных потоков и их взаимодействия с газовыми струями. Внутренний диаметр камеры из нержавеющей стали составляет 21 см при толщине стенки 3 мм. Полная длина системы достигает 4 м. Питание ускорителя осуществлялось от высоковольтного конденсаторного накопителя емкостью ≈ 1 мФ. При стартовом напряжении заряда 16 кВ начальный энергозапас в батарее составлял ≈ 130 кДж. В качестве рабочего газа ускорителя использовался водород. Генерируемый ускорителем плазменный поток с энергосодержанием ≈ 50 кДж транспортировался в нарастающем вдоль камеры магнитном поле с индукцией от 1 Тл вблизи ускорителя до 2 Тл в зоне газовой струи.

Газовая струя азота или неона формировалась импульсным клапаном высокого давления (до 100 атм) и плоским соплом Лавала, обеспечивавшими при толщине струи ≈ 4 см и ширине ≈ 15 см число Маха в камере взаимодействия $M \geq 3$ с мак-

симальной плотностью молекул $\approx 10^{17}$ см $^{-3}$. Диаметр водородного плазменного потока перед газовой струей в продольном магнитном поле с индукцией 2 Тл равнялся ≈ 10 см. В качестве средства локализации зоны взаимодействия использовалась прямоугольная пластина вольфрама размером 12 см \times 14 см, фронтальная поверхность которой располагалась параллельно плоскости газовой струи на расстоянии 2 см от ее оси.

В диагностическом комплексе установки МК-200 использовались:

- рентгеновские фотодиоды ФДУК-8УВС для измерения мощности излучения плазмы;
- многокадровая МКП-камера для регистрации пространственного распределения мягкого рентгеновского излучения плазмы, образующейся при взаимодействии водородного плазменного потока с газовой струей;
- спектрометр с пропускающей дифракционной решеткой и многокадровой МКП-камерой для регистрации спектров излучения плазмы в диапазоне длин волн 1–60 нм с пространственно-временным разрешением.

Взаимное расположение водородного плазменного потока, газовой струи, вольфрамовой пластины и диагностических средств (фотодиода ФДУК-8УВС, камеры-обскуры/спектрографа с МКП-камерой) представлены на рис. 2а — вид сбоку (как на рис. 1), и рис. 2б — вид сверху.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Обратимся к экспериментальным результатам, полученным при взаимодействии плазменного потока со свободной газовой струей, смещение которой вдоль направления магнитного поля ничем не ограничено. Динамику процесса столкновения водородного плазменного потока с азотной газовой струей иллюстрирует рис. 3. На нем приведены последовательные во времени изображения результата такого столкновения, за-

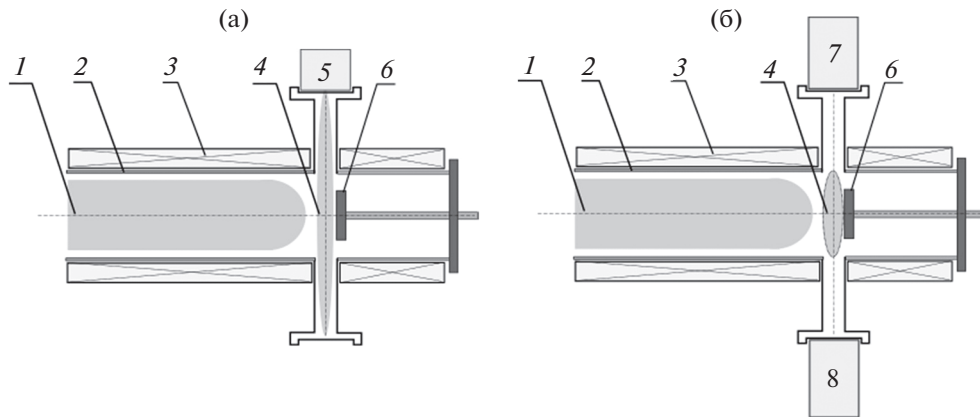


Рис. 2. Схема взаимного расположения водородного плазменного потока, газовой струи, вольфрамовой пластины и диагностических средств: вид сбоку (а), вид сверху (б); 1 – плазменный поток, 2 – вакуумная камера, 3 – соленоиды продольного магнитного поля, 4 – газовая струя, 5 – формирователь газовой струи, 6 – вольфрамовая пластина, 7 – фотодиод ФДУК-8УВС, 8 – камера-обскура/спектрограф с кадровой МКП-камерой.

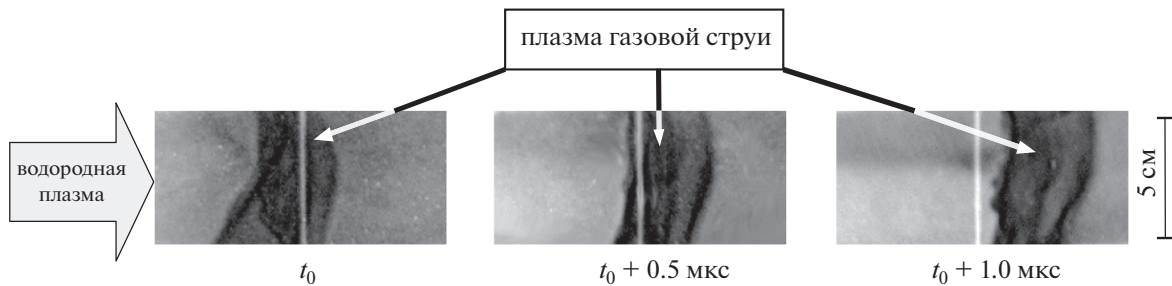


Рис. 3. Динамика взаимодействия потока водородной плазмы со свободной газовой струей азота. Обскурография проводилась рентгеновской МКП-камерой с экспозицией кадров 40 нс. Светлая вертикальная линия соответствует оси напуска газовой струи.

регистриванные с помощью многокадровой секционированной МКП-камеры. Плазму, образующуюся при взаимодействии водородного плазменного потока и газовой струи, здесь и в дальнейшем, для краткости, будем называть “плазмой газовой струи” благодаря намного более высокой, по сравнению с водородной плазмой, плотности ионов (атомов) газа в струе. На левом кадре мы видим формирующийся в зоне взаимодействия компактный слой толщиной 3–5 см повышенной светимости с отчетливо выраженными фронтальной и тыльной границами, вертикальный профиль которых обусловлен неоднородностью водородного плазменного потока в поперечном сечении. На следующих кадрах наблюдается движение этого слоя по ходу падающего плазменного потока со скоростью $\approx 3 \times 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

Столь высокая скорость движения источника излучения в экспериментах с односторонним воздействием плазменного потока на газовую струю уже через ≈ 4 мкс выводит объект исследо-

вания из зоны “видимости” и не позволяет проводить диагностику в течение всего времени воздействия плазменного потока (10–15 мкс).

Для проведения исследования воздействия плазменного потока на газовую струю на протяжении всей длительности процесса (≤ 20 мкс) была использована вольфрамовая пластина в качестве препятствия, позволяющего локализовать зону взаимодействия. Фронтальная поверхность вольфрама при этом располагалась параллельно центральной плоскости газовой струи на расстоянии 2 см от нее. Представленные ниже результаты были получены именно в таких экспериментах.

Измерение мощности излучения из зоны взаимодействия водородного плазменного потока с газовой струей производилось кремниевыми фотодиодами ФДУК-8УВС с известной спектральной чувствительностью [3]. На рис. 4 представлена динамика мощности излучения плазмы в экспериментах с азотной и неоновыми газовыми струями. Поскольку основной целью применения сверхзвуковой плоской газовой струи являет-

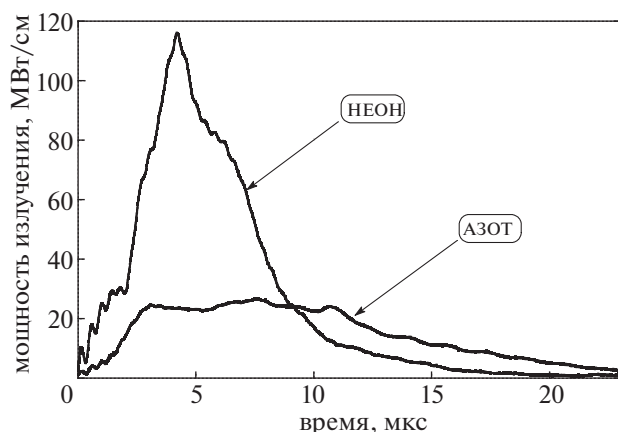


Рис. 4. Зависимости от времени мощности излучения неоновой и азотной плазмы при воздействии водородного плазменного потока на газовую струю. $t = 0$ — начало взаимодействия.

ся компактизация источника излучения, то важным результатом является величина мощности излучения, приходящейся на единицу длины вдоль направления магнитного поля. В схеме со столкновением двух встречных плазменных потоков мощность излучения составляла ≈ 12.5 МВт/см в случае азотных потоков и ≈ 2.5 МВт/см — неоновых при этом концентрация азота в потоке была стопроцентной, в то время как концентрация неона в водородном плазменном потоке — 20%. При одностороннем воздействии водородного плазменного потока газовая струя позволяет получить максимальную мощность излучения на азотной струе в два (≈ 25 МВт/см), а на неоновой — в сорок раз выше (≥ 100 МВт/см), чем при встречном столкновении двух плазменных потоков. Полная энергия излучения при взаимодействии

плазменного потока с азотной и неоновой струями составляет ≈ 2 кДж и ≈ 3 кДж соответственно.

Отметим также, что представленные в данной работе эксперименты проводились на водородных плазменных потоках с энергосодержанием до 50 кДж, в то время как в исследованиях [1, 2] энергосодержание каждого из встречных плазменных потоков достигало ≈ 100 кДж. В запланированной серии экспериментов предстоит реализовать имеющиеся возможности увеличения мощности компактного источника мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения — двустороннее воздействие встречных плазменных потоков на газовую струю и повышение энергосодержания каждого плазменного потока.

Линейчатое излучение ионов плазмы, формировавшейся в зоне взаимодействия водородного плазменного потока с газовой струей, регистрировалось спектрографом с пропускающей решеткой и кадровой МКП-камерой. Геометрические параметры коллиматора спектрографа и период дифракционной решетки $d = 500$ нм в совокупности определяли аппаратную функцию спектрометра на уровне ≈ 0.7 нм. Обзорные спектры с пространственно-временным разрешением охватывали диапазон длин волн 1–60 нм. На рис. 5, 6 представлены типичные спектры излучения плазмы, образовывавшейся в экспериментах по взаимодействию водородного плазменного потока с азотной (рис. 5) и неоновой (рис. 6) газовыми струями.

Регистрация излучения плазмы производилась вдоль луча зрения, проходящего параллельно фронтальной поверхности вольфрамовой пластины на расстоянии 2 см от нее. Приведенные спектры излучения азотной и неоновой плазмы

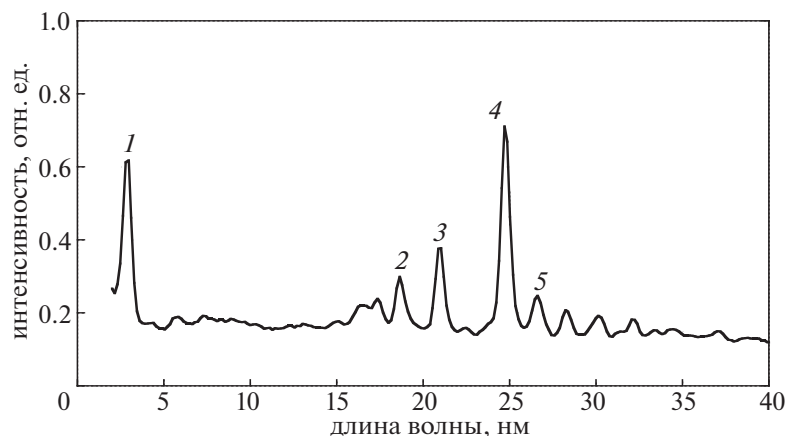


Рис. 5. Спектр излучения азотной плазмы, образующейся при воздействии водородного плазменного потока на газовую струю азота. Начало кадра $t = 5$ мкс (рис. 4), экспозиция $\tau = 1$ мкс. Спектральные линии: 1 — 2.88 нм ($1s^2-1s2p$ NVI), 2 — 18.6 нм ($1s^22p-1s^24d$ NV), 3 — 20.9 нм ($1s^22s-1s^23p$ NV), 4 — 24.8 нм ($1s^22p-1s^23d$ NV), 5 — 26.6 нм ($1s^22p-1s^23s$ NV).

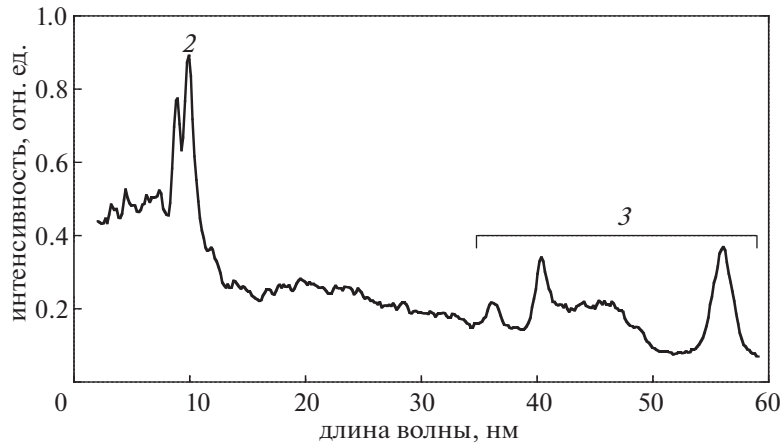


Рис. 6. Спектр излучения неоновой плазмы, образующейся при воздействии водородного плазменного потока на газовую струю неона. Начало кадра $t = 5$ мкс (рис. 4), экспозиция $\tau = 1$ мкс. Спектральные линии: 1 – 8.81 нм ($1s^2 2s-1s^2 3p$ NeVIII), 2 – 9.83 нм ($1s^2 2p-1s^2 3d$ NeVIII), 3 – 36–56 нм (NeVII).

свидетельствуют об отсутствии заметного поступления паров вольфрама в плазму газовой струи. Интенсивные линии в приведенных спектрах принадлежат ионам газа, формировавшего струю. Однако, наблюдается заметное расширение спектральных диапазонов излучения в сторону длинноволновой области как в случае азота, так и в случае неона, по сравнению с данными работ [1, 2]. Причиной этого расширения является появление линий Li-подобных ионов азота и неона, что свидетельствует о более низких электронных температурах генерировавшейся плазмы по сравнению с соответствующими значениями температуры плазмы, образовавшейся при столкновении двух встречных плазменных потоков.

Спектры линейчатого излучения многозарядных ионов были использованы для определения электронной температуры образующейся плазмы. Реализованный диагностический подход основан на том, что в спектрах как азотной, так и неоновой плазмы присутствуют линии, отношения интенсивностей которых слабо зависят от концентрации ионов/электронов, но существенно зависят от электронной температуры плазмы в достаточно широком диапазоне ее значений. Расчеты плазменной кинетики [4], проведенные при помощи радиационно-столкновительного кода PrismSPECT [5], показали, что в случае азотной плазмы таким свойством характеризуется отношение интенсивностей линий, соответствующих переходам $1s^2 2p-1s^2 3d$ и $1s^2-1s 2p$ (на рис. 5 линии 4 и 1 соответственно). Обозначим это отношение интенсивностей буквой R . Теоретическая зависимость R от электронной температуры плазмы приведена на рис. 7.

В рамках расчетной модели учитывались состояния ионов азота всех возможных кратностей

(всего 8180 состояний). Также предполагалось, что излучающая плазма представляет собой плоский слой с характерным размером вдоль линии наблюдения $L = 10$ см. В качестве экспериментального значения интенсивности линий рассматривалась площадь соответствующей линии, вычисленная в диапазоне длин волн, в котором интенсивность превышает значение \max/e^2 , где \max – максимальное значение в пределах линии. Как мы видим, рис. 6 демонстрирует, что экспериментальное значение отношения R может

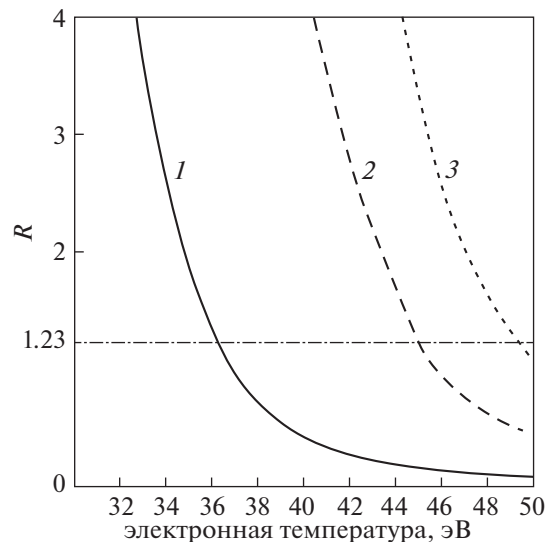


Рис. 7. Зависимости R от электронной температуры плазмы при фиксированной ионной плотности: 1 – $N_i = 10^{18}$ см $^{-3}$, 2 – 10^{17} см $^{-3}$, 3 – 10^{16} см $^{-3}$. Горизонтальной штрихпунктирной линией обозначено экспериментальное значение.

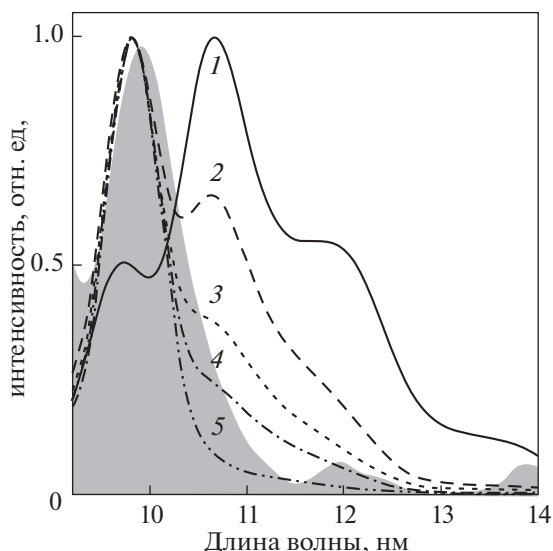


Рис. 8. Спектр излучения неоновой плазмы, рассчитанный при ионной плотности $N_i = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для пяти значений электронной температуры: 1 – 30 эВ, 2 – 40 эВ, 3 – 45 эВ, 4 – 50 эВ, 5 – 70 эВ. Серой заливкой показан экспериментальный спектр, соответствующий линии 2 на рис. 6.

реализовываться при различных значениях ионной плотности и электронной температуры в диапазонах $10^{16} \text{ см}^{-3} \leq N_i \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $35 \text{ эВ} \leq T_e \leq 50 \text{ эВ}$ соответственно. Наилучшее совпадение расчетного спектра с экспериментальным получено при $N_i = 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 43 \text{ эВ}$. В этом случае величина электронной плотности плазмы составляет $N_e = 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

При анализе экспериментального спектра неоновой плазмы с целью определения ее температуры следует отметить отсутствие спектральных линий в диапазоне длин волн 10.5–13 нм, в частности, линии с длиной волны $\approx 10.6 \text{ нм}$, формируемой переходами в Ве-подобных ионах неона. Это может наблюдаться (см. рис. 8) только при значении $T_e > 50 \text{ эВ}$, которое следует рассматривать как минимальное для электронной температуры плазмы, образующейся в области взаимодействия водородной плазмы с неоновой газовой струей.

Таким образом, сопоставление расчетных и экспериментальных значений отношений интенсивностей линий излучения многозарядных ионов показало, что в случае обоих типов газовых мишеней в области взаимодействия водородного плазменного потока со струей формируется плазма с электронной температурой не менее 40 эВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При взаимодействии высокоэнергетичного водородного плазменного потока с газовыми струями азота или неона с максимальной плотностью $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ формируется компактное плазменное образование с электронной температурой $\geq 40 \text{ эВ}$ в виде слоя толщиной $\approx 4 \text{ см}$ и диаметром $\approx 10 \text{ см}$,двигающееся по ходу падающего плазменного потока со скоростью $3 \times 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

Образующаяся при взаимодействии плазменного потока с газовой струей плазма является мощным источником мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения в спектральных диапазонах 3–30 нм в случае азотной струи и 10–60 нм – в случае неоновой струи. Полная энергия излучения с азотной струей составляет $\approx 2 \text{ кДж}$, с неоновой – $\approx 3 \text{ кДж}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках научного проекта РФФИ № 20-21-00153 и Программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” НЦФМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д.М., Пикуз С.А., Позняк И.М., Рязанцев С.Н., Скобелев И.Ю., Топорков Д.А., Умрихин Н.М. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 730.
2. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д.М., Пикуз С.А., Позняк И.М., Рязанцев С.Н., Скобелев И.Ю., Топорков Д.А., Умрихин Н.М. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 606.
3. <http://sildet.ru/source/pdf/fduk8uvc.pdf>.
4. Gavrilov V.V., Eskov A.G., Zhitlukhin A.M., Kochnev D.M., Pikuz S.A., Poznyak I.M., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Toporkov D.A., Umrikhin N.M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 946. P. 012017.
5. <https://www.prism-cs.com/Software/PrismSPECT/overview.html>.