

УДК 533.924

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО ПОТОКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ И ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНЬЮ

© 2024 г. С. Д. Лиджигорьев<sup>a, b, \*</sup>, Д. А. Бурмистров<sup>a, c</sup>, В. В. Гаврилов<sup>a, \*\*</sup>,  
В. А. Костюшин<sup>a</sup>, И. М. Позняк<sup>a, b</sup>, А. В. Пушина<sup>a, b</sup>, Д. А. Топорков<sup>a, b, \*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Государственный научный центр РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”,  
Троицк, Москва, Россия

<sup>b</sup>НИУ “Московский физико-технический институт”, Москва, Россия

<sup>c</sup>НИУ “Московский энергетический институт”, Москва, Россия

\*e-mail: sandji@triniti.ru

\*\*e-mail: vvgavril@triniti.ru

\*\*\*e-mail: toporkov@triniti.ru

Поступила в редакцию 24.07.2024 г.

После доработки 12.10.2024 г.

Принята к публикации 26.10.2024 г.

Приведены результаты исследования взаимодействия мощного потока водородной плазмы со сверхзвуковой газовой струей перед вольфрамовой мишенью. Азот или неон, инжектированные перед поверхностью мишени, служат надежным способом защиты от прямого воздействия водородной плазмы на вольфрам. Экспериментально показано, что образующаяся плазма газовой струи является мощным источником коротковолнового линейчатого излучения. Плотность поглощаемой вольфрамовой мишенью энергии  $\approx 25$  Дж/см<sup>2</sup> оказывается вдвое меньше энергии, поглощаемой вольфрамом при импульсном воздействии потока водородной плазмы без газовой струи  $\approx 50$  Дж/см<sup>2</sup>. Максимально достигаемая поверхностью вольфрама температура составляет  $\approx 3700$  К с применением газовой струи и  $\approx 5800$  К — без газовой струи. Наличие газовой струи-завесы перед вольфрамом приводит к локализации испаренного вольфрама вблизи мишени на расстояниях до 1 см от поверхности.

**Ключевые слова:** плазменный ускоритель, водородный плазменный поток, газовая струя, газовая завеса, МР–ВУФ-излучение, вольфрам, экранирование, диссипативный дивертор

**DOI:** 10.31857/S0367292124120106 **EDN:** EEKQWK

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по взаимодействию мощных потоков плазмы с нейтральным газом проводятся в связи с необходимостью решения ряда важных прикладных задач. Среди них можно выделить задачу создания мощного источника линейчатого вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения с использованием импульсных плазменных ускорителей [1].

В экспериментах по столкновению водородного плазменного потока со сверхзвуковой газовой струей на установке МК-200 [1] было проде-

монстрировано образование излучающего в ВУФ–МР-диапазоне длин волн слоя плазмы толщиной  $\approx 4$  см,двигающегося по ходу водородного плазменного потока со скоростью  $\approx 3 \times 10^6$  см/с. Из-за столь высокой скорости движения источника излучения в экспериментах с односторонним воздействием плазменного потока на газовую струю уже через  $\approx 4$  мкс объект исследования выходил из поля зрения диагностического оборудования, что не позволяло проводить диагностику в течение всего времени воздействия плазменного потока на газовую струю —

10–15 мкс. Поэтому для проведения измерений на протяжении всей длительности процесса взаимодействия для локализации его области в серии экспериментов была использована вольфрамовая пластина. В дополнение к спектральной диагностике для определения роли вольфрамовой пластины в общем энергобалансе взаимодействия регистрировались динамика температуры фронтальной поверхности вольфрама и количество тепла, поглощаемого вольфрамом. Теперь, благодаря использованию вольфрамовой пластины, проведенные эксперименты можно классифицировать как исследование взаимодействия мощного потока водородной плазмы с газовой завесой и вольфрамовой мишенью. Результаты именно этой серии экспериментов представлены в данной работе.

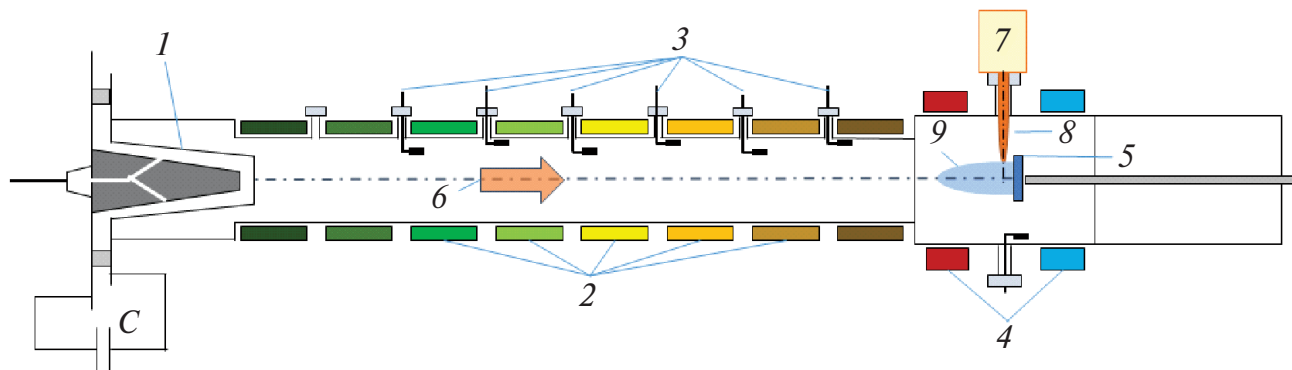
Экспериментальные результаты комплексного взаимодействия плазменного потока, газовой струи и вольфрамовой мишени, возможно, будут полезны для верификации расчетных моделей диссипативного дивертора. Примером плодотворного использования экспериментальных данных, полученных на установке МК-200, может служить успешная проверка расчетно-теоретических моделей паровой экранировки (vapour shielding) вольфрама [2].

Следует также отметить, что использование газовой завесы может позволить регулировать уровень теплового воздействия на материалы в процессе их обработки мощными плазменными потоками для улучшения эксплуатационных характеристик поверхностных слоев и расширит технологические возможности метода за счет облучения материалов мощным излучением, генерируемым при взаимодействии плазменного потока с нейтральным газом.

## 2. УСТАНОВКА МК-200 И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Эксперименты проводились на установке МК-200 [3]. В состав установки входят (рис. 1): импульсный плазменный ускоритель и цилиндрическая вакуумная камера с мишенной камерой, в торце которой устанавливалась облучаемая мишень. Источником питания ускорителя является конденсаторная батарея емкостью  $\approx 1$  мФ. Эксперименты проводились при стартовом напряжении на конденсаторной батарее ускорителя 16 кВ. В этих условиях ускоритель генерировал водородный плазменный поток, который двигался в течение 10–15 мкс со скоростью  $(2\text{--}4) \times 10^7$  см  $\times$  с $^{-1}$  в продольном магнитном поле с нарастающей индукцией от 1 Тл вблизи ускорителя до 2 Тл в мишенной камере. Энергия направленного движения протонов при этом составляет 0.8–1.8 кэВ. Температура электронов  $T_e$  для описанных условий находилась в диапазоне 10–20 эВ при плотности  $n_e \approx 2 \times 10^{15}$  см $^{-3}$ , а температура ионов  $T_i \approx 80$  эВ [4]. Полное энергосодержание плазменного потока в проведенных экспериментах составляло  $\approx 50$  кДж, что при диаметре потока 8–10 см соответствовало плотности энергии в потоке 0.8–1 кДж/см $^2$ . С помощью пристеночных магнитных зондов проводились измерения скорости, диаметра и длительности потока.

Газовая завеса перед мишенью формировалась импульсным газовым клапаном с плоским соплом Лавала. Толщина газовой завесы вдоль направления движения плазменного потока составляла  $\approx 5$  см, а ширина вдоль поверхности мишени  $\approx 15$  см. В качестве рабочего газа завесы использовался азот или неон. Плотность молекул газа в завесе можно было изменять, варьируя давление



**Рис. 1.** Схема экспериментов на установке МК-200: 1 – импульсный плазменный ускоритель, 2 – катушки магнитного поля, 3 – магнитные зонды, 4 – катушки Гельмгольца, 5 – вольфрамовая мишень, 6 – плазменный поток, 7 – импульсный газовый клапан, 8 – газовая струя, 9 – мишенная плазма.

в подклапанном объеме. Максимальная плотность составляла  $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при давлении 90 атм. Фронтальная поверхность вольфрама при этом располагалась параллельно центральной плоскости газовой завесы на расстоянии 2 см от нее и перпендикулярно оси водородного плазменного потока.

Для оценки плотности энергии, поглощаемой вольфрамовой мишенью, и анализа ее распределения по поверхности использовался многоканальный термопарный калориметр [5]. Чувствительными датчиками калориметра служили восемь термопар, размещенных на обратной стороне прямоугольной пластины-мишени из вольфрама с размерами 120 мм  $\times$  140 мм и толщиной 8 мм. Размеры калориметра обеспечивали полное перекрытие плазменного потока в поперечном сечении плазмопровода. Распределение по поверхности плотности поглощаемой калориметром энергии  $Q$  определялась по разнице температур на задней поверхности мишени до и после облучения плазмой в точках крепления термопар.

Регистрация спектров излучения примишенной плазмы производилась спектрометром с пропускающей дифракционной решеткой и многокадровой МКП-камерой [6]. Период решетки составлял 500 нм и использование ее совместно с коллиматором, состоящим из двух, отстоящих друг от друга на расстоянии 200 мм, щелей шириной 100 мкм, позволяло регистрировать спектры в диапазоне длин волн 1–60 нм с пространственно-временным разрешением.

Регистрация пространственного распределения излучения примишенной плазмы в спектральном диапазоне длин волн 1–200 нм осуществлялась с использованием системы обскур и МКП-камеры. Камера позволяла получать в каждом пуске четыре последовательных кадра и регистрировать динамику взаимодействия водородного плазменного потока с вольфрамовой мишенью и газовой струей. Регистрация излучения в течение всего процесса взаимодействия проводилась в серии пусков за счет изменения времени начала съемки четырехкадровой МКП-камерой. Экспозиция каждого кадра в экспериментах составляла 40 нс, интервал между кадрами 1 мкс.

Полная энергия излучения из примишенной плазмы измерялась с помощью радиационного фольгового болометра, аналогичного описанному в работе [7]. Приемным элементом излучения плазмы служила платиновая фольга толщиной

9 мкм. Для регистрации излучения с тыльной поверхности фольги использовался фотодиод ФД-9Э111Б. Временное разрешение болометра определялось временем выравнивания температуры по толщине фольги и составляло  $\approx 1.5$  мкс. За секунду до пуска ускорителя фольга разогревалась до температуры 1300 К при подаче импульса электрического тока  $I \approx 20$  А, длительностью 2 с. Спектральный диапазон чувствительности фотодиода охватывает длины волн от 0.4 до 1.8 мкм, что соответствует спектральному диапазону излучения нагретой фольги. Использование болометра совместно с маской  $\varnothing$  5.5 мм непосредственно перед фольгой и квадратной диафрагмой с размерами 16 мм  $\times$  16 мм позволяло регистрировать излучение области, контуры которой представлены на рис. 2.

Исследование динамики температуры поверхности облучаемой мишени в течение всего времени взаимодействия водородного плазменного потока с газовой завесой и вольфрамовой мишенью производилось с помощью трехволнового инфракрасного пирометра. Пирометр состоит (рис. 3) из тонких светоделительных пластин (50%), разделяющих световой пучок  $\varnothing$  1 мм, интерференционных инфракрасных светофильтров с полушириной пропускания  $\Delta\lambda = 10$  нм на длины волн  $\lambda_1 \approx 850$  нм,  $\lambda_2 \approx 1064$  нм,  $\lambda_3 \approx 1550$  нм, фотодиодов ФД-256 ( $\lambda_1$ ) и ФД9Э-111 ( $\lambda_2$ ) и ФД-10ГА ( $\lambda_3$ ), а также усилителей сигналов фотодиодов.

Пирометр регистрировал динамику температуры поверхности вольфрама в геометрическом центре мишени в диапазоне температур до  $\approx 6000$  К с временным разрешением 0.1 мкс. Взаимное расположение водородного плазменного потока, газовой завесы, вольфрамовой мишени и комплекса диагностических средств представлено на рис. 4.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты экспериментов по взаимодействию водородного плазменного потока с газовой струей перед вольфрамовой мишенью. Динамика взаимодействия водородного плазменного потока с азотной газовой струей и мишенью представлена на рис. 5. Двумерные изображения в ВУФ-МР спектральных диапазонах получены с использованием четырехкадровой МКП-камеры. Указанное на кадрах значение является временем в микросекундах после пуска ускорителя, т. е. подачи высокого напряжения на его электроды. Две тем-

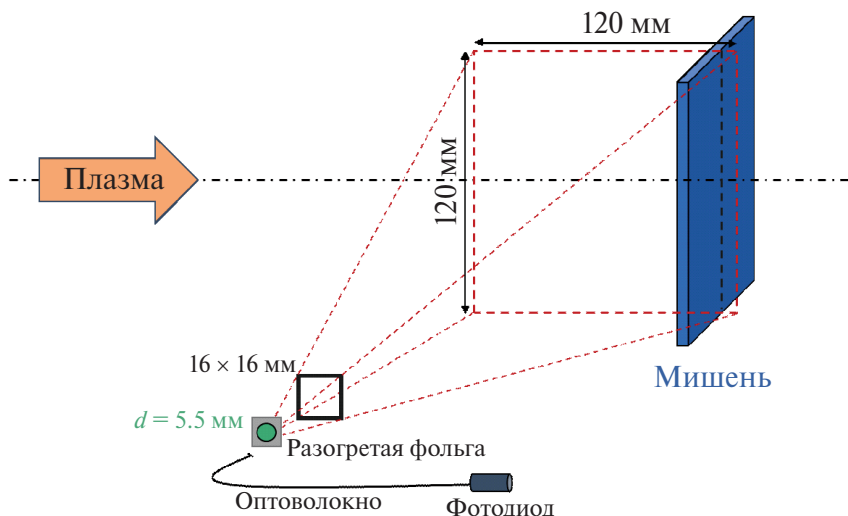


Рис. 2. Схема регистрации излучения плазмы с помощью радиационного фольгового болометра.

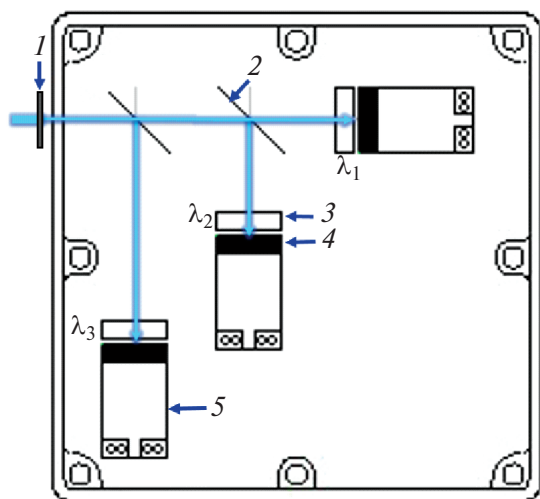


Рис. 3. Схема пирометра: 1 – диафрагма, 2 – светоделительные пластины, 3 – светофильтры, 4 – фотодиоды, 5 – усилители сигналов фотодиодов.

ные линии на кадрах соответствуют: горизонтальная – оси водородного плазменного потока, вертикальная – оси газовой струи. Штриховой белой линией отмечено положение фронтальной поверхности мишени. Расстояние от поверхности вольфрама до вертикальной оси завесы составляет 2 см. Плотность молекулярного азота в завесе  $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На начальных кадрах видно формирование области повышенной светимости толщиной 4–6 см в зоне взаимодействия. Вертикальный профиль излучения обусловлен неоднородностью водородного плазменного потока в поперечном сечении. На первых четырех кадрах наблюдается движение фронта излучения в направлении мишени со скоростью  $\approx 2 \times 10^6 \text{ см/с}$ .

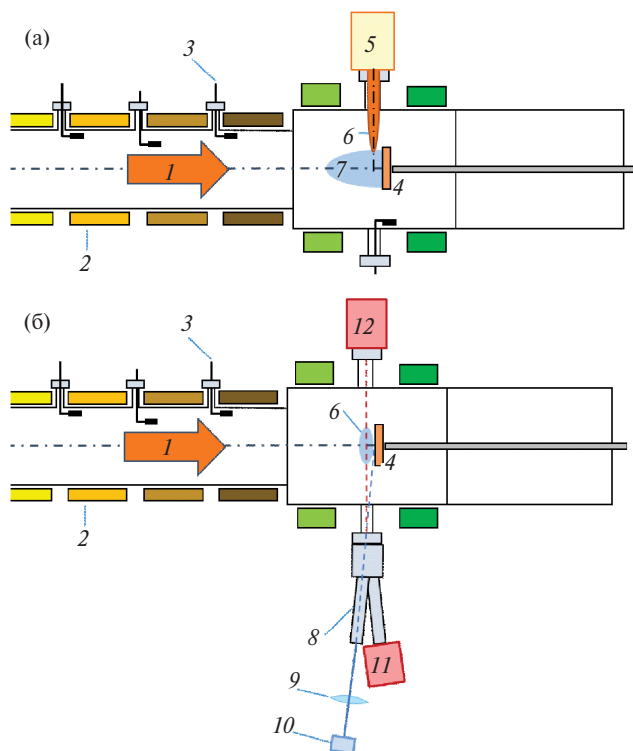


Рис. 4. Схема взаимного расположения плазменного потока, газовой завесы, вольфрамовой мишени и диагностических средств: вид сбоку (а), вид сверху (б): 1 – плазменный поток, 2 – соленоиды, 3 – магнитные зонды, 4 – вольфрамовая мишень, 5 – газовый клапан, 6 – газовая завеса, 7 – мишенная плазма, 8 – система патрубков, 9 – линза, 10 – пирометр, 11 – МКП-камера/спектрограф, 12 – болометр.

Следует отметить, что на первых кадрах отсутствует свечение поверхности вольфрама в ВУФ–МР-диапазоне. Спектральный состав излучения плазмы азотной струи в интервале 18–20 мкс



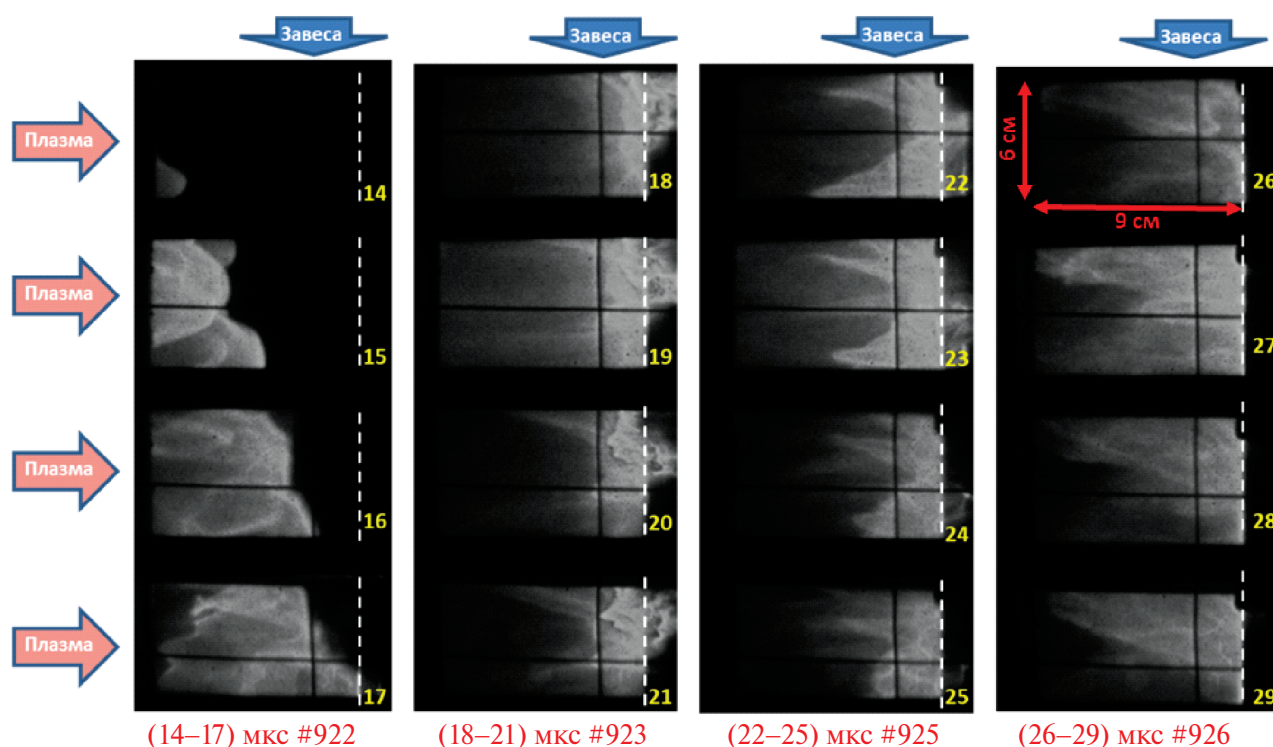


Рис. 5. Динамика взаимодействия водородного плазменного потока с азотной газовой струей и вольфрамовой мишенью.  $t = 0$  — момент подачи высокого напряжения на электроды ускорителя.

с пространственным разрешением представлен на рис. 6. Спектр излучения содержит линии ионов He-подобного азота  $2.88 \text{ нм}$  ( $1s^2-1s2p$ ) и Li-подобного —  $18.6 \text{ нм}$  ( $1s^22p-1s^24d$ ),  $20.9 \text{ нм}$  ( $1s^22s-1s^23p$ ),  $24.8 \text{ нм}$  ( $1s^22p-1s^23d$ ),  $26.6 \text{ нм}$  ( $1s^22p-1s^23s$ ). Широкополосный спектр, характерный для вольфрама, наблюдается лишь в узком слое перед поверхностью мишени.

Эксперименты с неоновой газовой завесой показали похожие результаты. Динамика взаимодействия водородного плазменного потока с неоном и мишенью представлена на рис. 7. Плотность неона в струе составляла  $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Передний фронт образующейся неоновой плазмы двигался к вольфрамовой мишени также со скоростью  $\approx 2 \times 10^6 \text{ см/с}$ .

Спектр излучения приповерхностной плазмы (рис. 8) в интервале 18–20 мкс содержит только линии неона от Li-подобных до Be-подобных. Непрерывный спектр неоновой плазмы связан с рекомбинационным и тормозным излучением. Представленные спектры излучения неоновой плазмы указывают на отсутствие паров вольфрама перед поверхностью мишени. Интенсивные линии, наблюдаемые на этих спектрах, принадлежат ионам неона, который формировал струю. Таким образом, наличие азотной или неоновой завесы

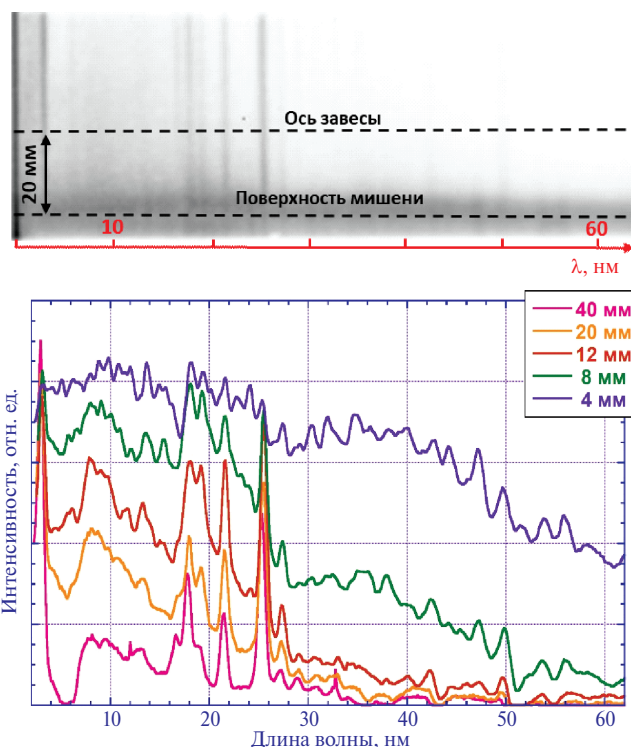


Рис. 6. Спектр излучения приимешенной плазмы с использованием азотной газовой завесы. Время начала кадра 18 мкс от пуска ускорителя. Экспозиция кадра 2 мкс. Указаны расстояния от поверхности мишени, для которых проведено сканирование спектров.

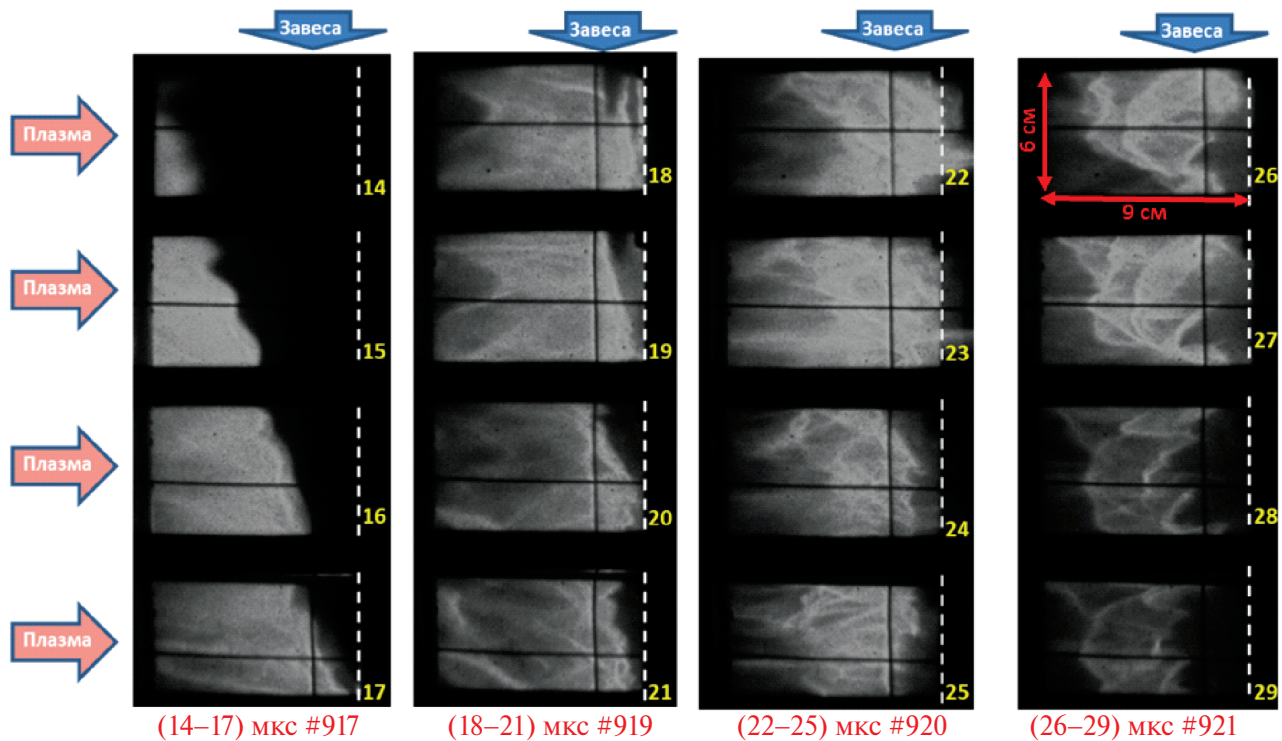


Рис. 7. Динамика взаимодействия водородного плазменного потока с неоновой газовой завесой и вольфрамовой мишенью.  $t = 0$  – момент подачи высокого напряжения на электроды ускорителя.

перед вольфрамовой мишенью приводит к отсутствию либо к локализации паров вольфрама на расстояниях менее 1 см от поверхности, и предотвращает распространение тяжелых примесей вдоль силовых линий магнитного поля навстречу налетающему плазменному потоку.

Для оценки электронной температуры  $T_e$  и ионной плотности  $n_i$  в приповерхностной плазме были проведены численные расчеты плазменной кинетики с использованием радиационно-столкновительного кода PrismSPECT [1, 8]. В случае с азотной газовой завесой сравнение экспериментального и расчетного спектров для расстояний 2–4 см от поверхности мишени показало, что наилучшее совпадение результатов наблюдается при  $T_e \approx 50$  эВ и  $n_i \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для неона расчеты показали, что отсутствие спектральных линий в диапазоне длин волн 10.5–13 нм, в частности, линии с длиной волны  $\approx 10.6$  нм, формируемой переходами в Ве-подобных ионах неона, говорит о том, что электронная температура на расстояниях более 2 см от поверхности мишени превышает 50 эВ. Следует отметить, что при численном моделировании экспериментальных спектров учитывалось самопоглощение линейчатого излучения.

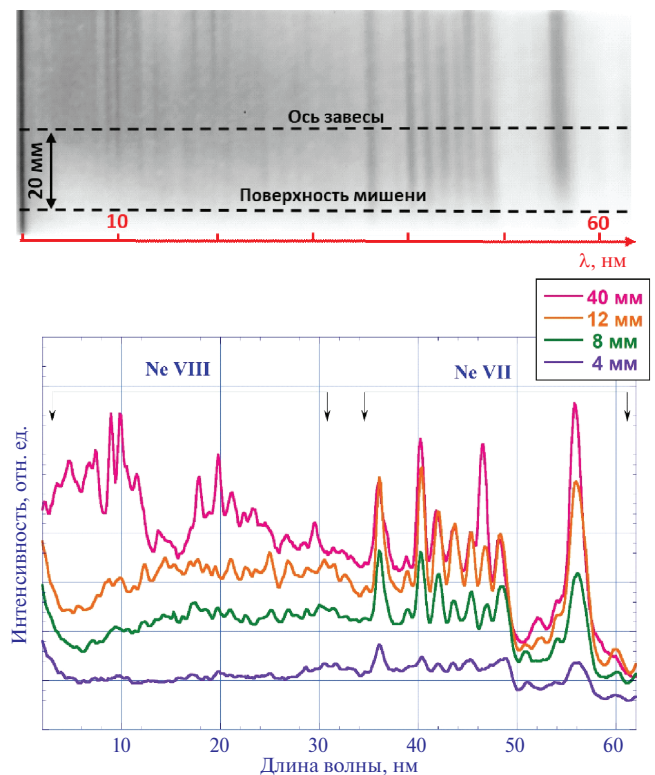


Рис. 8. Спектр излучения примешенной плазмы с использованием неоновой газовой завесы. Время начала кадра 18 мкс от пуска ускорителя. Экспозиция кадра 2 мкс. Указаны расстояния от поверхности мишени, для которых проведено сканирование спектров.

Характерной особенностью взаимодействия водородного плазменного потока с газовыми струями-завесами азота или неона перед вольфрамовой мишенью является то, что в обоих случаях в течение первых 3–4 мкс взаимодействия поверхность вольфрама находится под воздействием только излучения плазмы газовой струи. В этот период времени фронтальная поверхность вольфрама контактирует с нейтральным газом завесы.

Для определения решающей роли газовой струи в качестве защиты вольфрамовой мишени при взаимодействии с водородным плазменным потоком была проведена серия экспериментов без напуска газа перед мишенью. В этом случае на вольфрам воздействовал непосредственно водородный плазменный поток. Динамика взаимодействия плазменного потока с вольфрамовой мишенью без газа перед ней представлена на рис. 9.

Из анализа последовательных кадров определяется момент прилета плазмы на мишень, продолжительность свечения плазменного образования перед поверхностью в ВУФ-МР диапазонах излучения, а также скорость распространения вольфрама навстречу налетающему водородному плазменному потоку. В первые микросекунды после начала взаимодействия скорость распространения вольфрама составляет  $\approx 4 \times 10^6$  см/с.

Спектр излучения приповерхностной плазмы, сформировавшейся в результате взаимодействия водородного плазменного потока с вольфрамом, представлен на рис. 10. Без использования газовой завесы спектр излучения плазмы вольфрама на расстояниях до 5 см от поверхности мишени находится в широком спектральном диапазоне до 60 нм, с максимумом светимости в диапазоне от 2 до 26 нм.

Таким образом, в случае взаимодействия водородного плазменного потока непосредственно с вольфрамом перед поверхностью мишени также формируется мощный источник ВУФ-МР излучения. Но, благодаря большому количеству линий ионов вольфрама, спектр выглядит широкополосным и квазинепрерывным. Кардинальное отличие спектров плазмы газовой струи от спектров плазмы вольфрама заключается в ярко выраженном линейчатом характере излучения азотной и неоновой плазмы.

Динамика температуры поверхности облучаемой мишени, измеренная пирометром в ходе экспериментов представлена на рис. 11. Полученные данные о температуре указывают на то, что при отсутствии газовой завесы большая часть поверхности вольфрамовой мишени достигает температуры кипения  $\approx 5800$  К. Азотная и неоновая завесы эффективно защищают вольфрам от

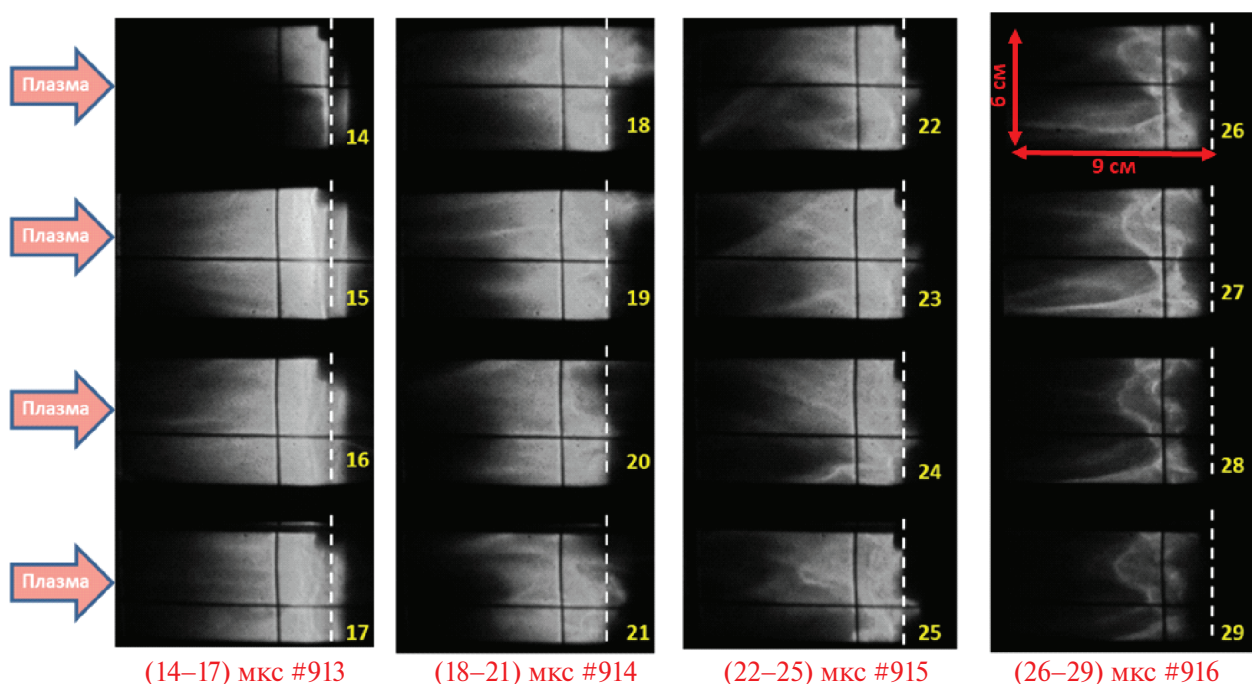
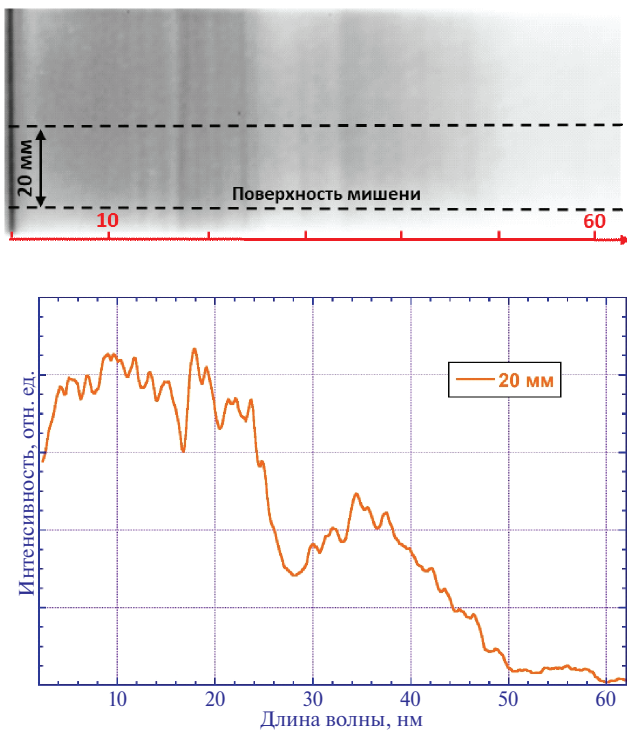


Рис. 9. Динамика взаимодействия водородного плазменного потока с вольфрамовой мишенью без газовой завесы.  $t = 0$  — момент подачи высокого напряжения на электроды ускорителя.



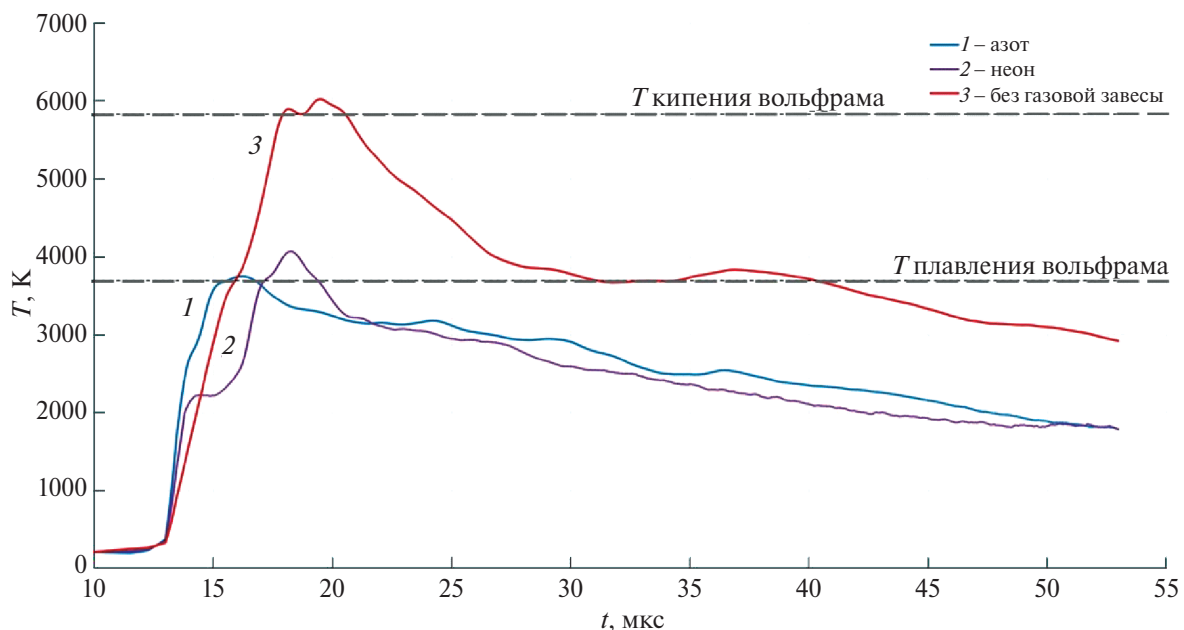


**Рис. 10.** Спектр излучения примешенной плазмы вольфрама без использования газовой завесы. Время начала кадра 18 мкс от пуска ускорителя. Экспозиция кадра 2 мкс. Сканирование спектра проведено для расстояния 20 мм от поверхности мишени.

теплового воздействия водородного плазменного потока, а максимальная температура поверхности мишени находится вблизи точки плавления вольфрама  $\approx 3700$  К.

Обращает на себя внимание тот факт, что в экспериментах без газовой завесы уже на первых микросекундах взаимодействия водородного плазменного потока с поверхностью мишени наблюдается (см. рис. 9) яркое свечение ионов вольфрама на расстояниях до 4–6 см. При зарегистрированной скорости распространения вольфрама на уровне  $\approx 4 \times 10^6$  см/с кинетическая энергия ионов вольфрама должна составлять не менее 1 кэВ, что явно превышает возможную тепловую энергию атомов вольфрама при испарении с поверхности. Тем более, что только к  $\approx 5$  мкс от начала взаимодействия температура поверхности вольфрама достигает температуры кипения, когда может начинаться его интенсивное испарение. На этой начальной стадии взаимодействия приповерхностная область может заполняться атомами вольфрама за счет распыления вольфрама потоком водородной плазмы. Коэффициент распыления атомов вольфрама протонами с энергией  $\approx 1$  кэВ находится на уровне  $10^{-3}$  [9, 10], что может обеспечить поступление до  $10^{14}$  см $^{-2}$   $\times$  мкс $^{-1}$  атомов вольфрама в приповерхностную плазму. Однако вопрос о полном количестве атомов/ионов вольфрама, формирующем экранирующий плазменный слой, остается открытым.

Рассмотрим энергетические параметры излучения плазмы перед поверхностью мишени. Для измерения радиационных потерь использовался радиационный фольговый болометр. Динамика



**Рис. 11.** Динамика температуры поверхности облучаемой мишени.  $t = 0$  — момент подачи высокого напряжения на электроды ускорителя.



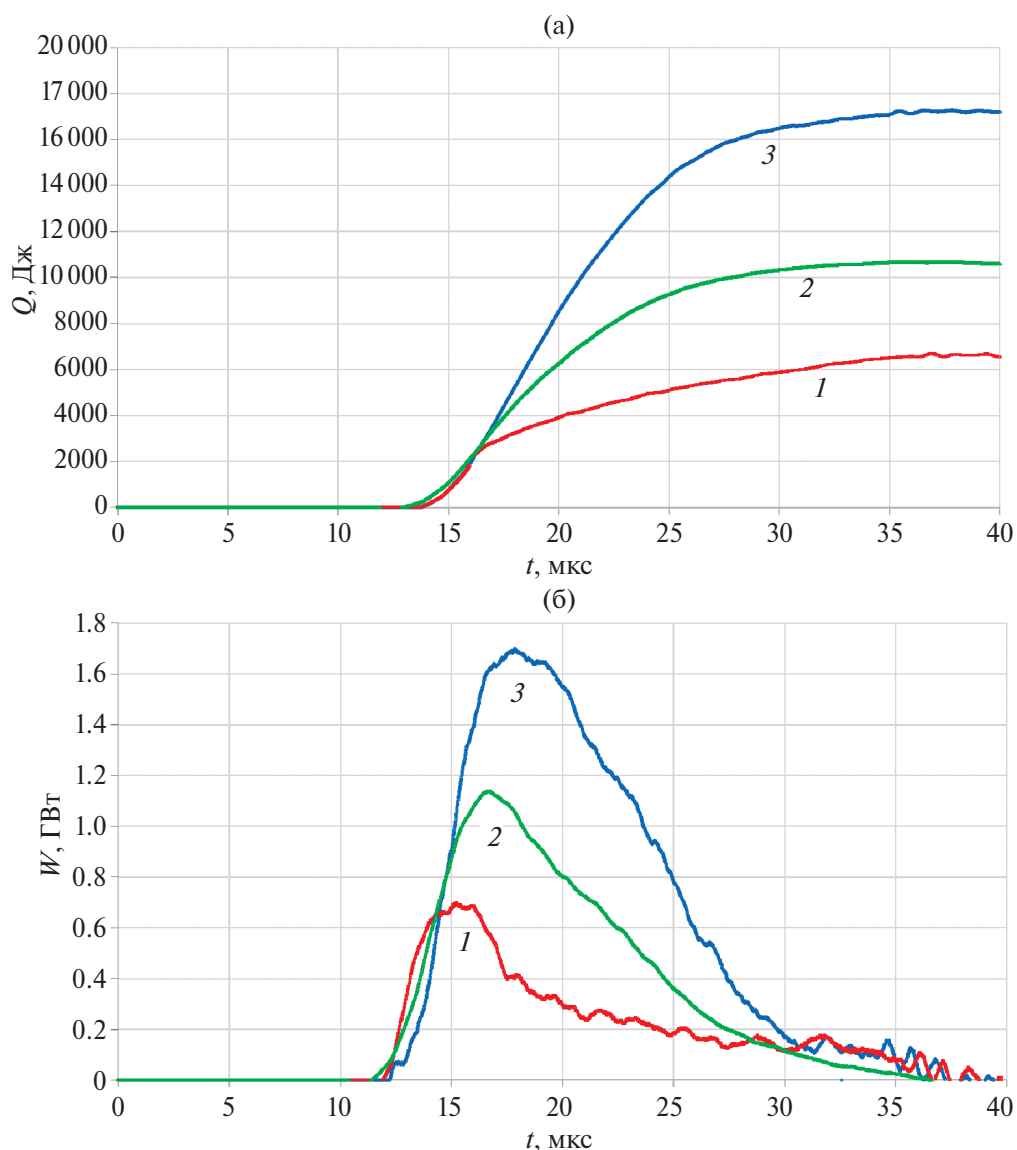
полной энергии излучения  $E(t)$  из примешенной области приведена на рис. 12а. Дифференцирование  $E(t)$  по времени позволяет вычислить мощность излучения плазмы  $W(t)$ , которая проиллюстрирована на рис. 12б.

Полная энергия излучения вольфрамовой плазмы в отсутствие завесы составляет  $\approx 17$  кДж. Пиковая мощность этого излучения составляет  $\approx 1.7$  ГВт. При применении азотной и неоновой газовых завес, общая энергия излучения плазмы составляет  $\approx 6.6$  кДж для азота и  $\approx 10.5$  кДж для неона. Максимальные значения  $W(t)$  — мощности излучения составляют 0.7 ГВт для азотной плазмы и 1.15 ГВт для неоновой плазмы. Результаты из-

мерений радиационных потерь свидетельствуют о том, что неон в полтора раза эффективнее азота переизлучает энергию падающего плазменного потока.

Перейдем к энергетическим параметрам результирующего теплового воздействия на мишень. На рис. 13 представлены результаты восьмиканальной калориметрии энергии, поглощенной вольфрамовой мишенью.

Для каждого режима приведены максимальная плотность поглощенной энергии  $Q_{\max}$ , полная энергия, поглощенная мишенью  $Q_{\text{full}}$  и значение плотности поглощенной энергии в точке измерения температуры поверхности мишени пироме-



**Рис. 12.** Динамика полной энергии (а) и мощности (б) излучения азотной плазмы 1, неоновой плазмы 2 при воздействии водородного плазменного потока на вольфрамовую мишень с газовой завесой и вольфрамовой плазмы в отсутствие завесы (3).  $t = 0$  — момент подачи высокого напряжения на электроды ускорителя.

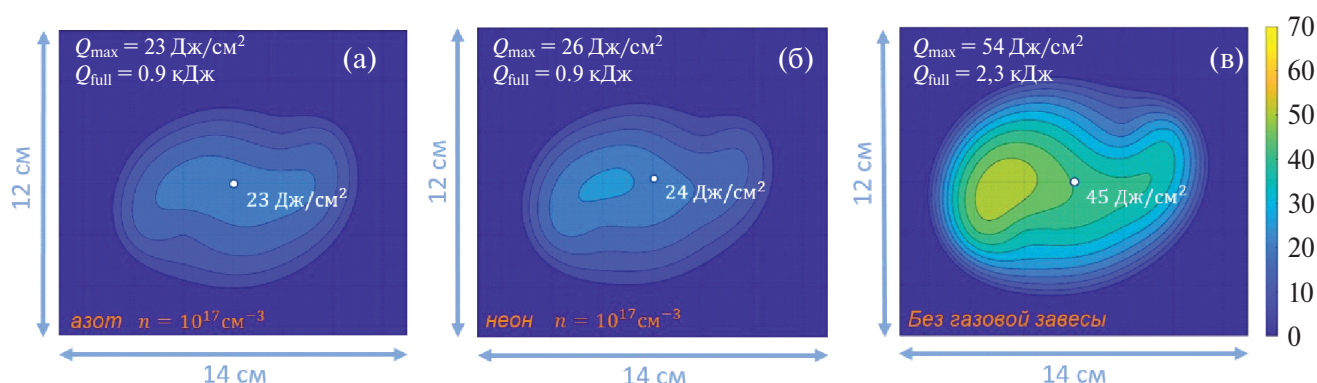


Рис. 13. Распределение плотности поглощенной мишенью энергии в экспериментах: азотная завеса (а); неоновая завеса (б); без газовой завесы (в).

тром. Данные калориметрии демонстрируют, что газовая завеса азота и неона с плотностью  $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  снижает плотность поглощаемой мишенью энергии до  $\approx 25 \text{ Дж/см}^2$ , что оказывается вдвое меньше уровня энергии, поглощаемой вольфрамом при импульсном воздействии мощного потока водородной плазмы без газовой завесы  $\approx 50 \text{ Дж/см}^2$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование взаимодействия мощных потоков водородной плазмы с газовой завесой азота или неона перед вольфрамовой мишенью. Газ перед поверхностью мишени эффективно преобразует энергию плазменных потоков в энергию излучения и является мощным  $\sim 1 \text{ ГВт}$  источником линейчатого ВУФ–МР-излучения, в спектрах которого наблюдаются только линии ионов газа, формирующего струю. Установлено, что неон почти вдвое эффективнее азота переизлучает энергию падающего водородного плазменного потока.

Результаты спектрального анализа и регистрации двумерных изображений плазмы с пространственно-временным разрешением показали, что присутствие газа перед мишенью приводит к локализации паров вольфрама на расстояниях менее 1 см от поверхности и предотвращает распространение тяжелых примесей вдоль силовых линий магнитного поля навстречу налетающему плазменному потоку.

Показано, что газовая завеса с плотностью  $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  снижает плотность поглощаемой мишенью энергии до  $\approx 25 \text{ Дж/см}^2$ , что оказывается вдвое меньше уровня энергии, поглощаемой вольфрамом при импульсном воздействии мощного

потока водородной плазмы без газовой завесы  $\approx 50 \text{ Дж/см}^2$ . Максимальная температура поверхности вольфрама за газовой завесой находится в окрестности точки плавления, в то время как при отсутствии завесы достигает точки кипения.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4з.241.09.21.1069 от 20.04.2021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toporkov D.A., Burmistrov D.A., Gavrilov V.V., Zhitlukhin A.M., Kostyushin V.A., Lidzhigoryaev S.D., Pushina A.V., Pikuz S.A., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu. // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49. P. 1000.
2. Skovorodin D.I., Pshenov A.A., Arakcheev A.S., Eksaeva E.A., Marenkov E.D., Krashenninnikov S.I. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 022501.
3. Kostyushin V.A., Poznyak I.M., Toporkov D.A., Burmistrov D.A., Zhuravlev K.V., Lidzhigoryaev S.D., Usmanov R.R., Tsybenko V. Yu., Nemchinov V.S. // Instruments Experimental Techniques. 2023. V. 66. P. 920.
4. Житлухин А.М., Илюшин И.В., Сафронов В.М., Скворцов Ю.В. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. С. 509.
5. Лиджигорьяев С.Д., Бурмистров Д.А., Гаврилов В.В., Костюшин В.А., Позняк И.М., Пушина А.В., Топорков Д.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2023. Т. 46. С. 63.
6. Архипов Н.И., Васенин С.Г., Житлухин А.М., Половцев Н.А., Сафронов В.М., Топорков Д.А. // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 1. С. 128.
7. Волков Г.С., Лахтюшко Н.И., Терентьев О.В. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 115.
8. Prism Computational Sciences. Software tools for scientific research and commercial applications in the physical sciences and engineering. <http://www.prism-cs.com>
9. Mutzke A., Bandelow G., Schneider R. // J. Nuclear Materials. 2015. V. 467. P. 413.
10. Mikhailov V.S., Babenko P.Yu., Shergin A.P., Zinoviev A.N. // Plasma Phys. Rep. 2024. V. 50. P. 23.

## INTERACTION OF A POWERFUL HYDROGEN PLASMA FLOW WITH A SUPERSONIC GAS JET AND A TUNGSTEN TARGET

**S. D. Lidzhigoriaev<sup>a, b, \*</sup>, D. A. Burmistrov<sup>a, c</sup>, V. V. Gavrilov<sup>a</sup>, V. A. Kostyushin<sup>a</sup>,  
I. M. Poznyak<sup>a, b</sup>, A. V. Pushina<sup>a, b</sup>, and D. A. Toporkov<sup>a, b</sup>**

<sup>a</sup>*State Scientific Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Research,  
Troitsk, Moscow, 108840, Russia*

<sup>b</sup>*National Research University Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, 141701, Russia*

<sup>c</sup>*National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russia*

*\*e-mail: sandji@triniti.ru*

The results of a study of the interaction of a powerful flow of hydrogen plasma with a supersonic gas jet in front of a tungsten target are presented. Nitrogen or neon injected in front of the target surface provides a reliable method of shielding tungsten from direct exposure to hydrogen plasma. It has been experimentally shown that the resulting plasma of the gas jet is a powerful source of short-wave line radiation. Energy density absorbed by a tungsten target  $\approx 25$  J/cm<sup>2</sup> is half the energy absorbed by tungsten during pulsed action of a hydrogen plasma flow without a gas jet  $\approx 50$  J/cm<sup>2</sup>. The maximum temperature achieved by the tungsten surface is  $\approx 3700$  K with the use of a gas jet and  $\approx 5800$  K without a gas jet. The presence of a gas jetscreen in front of the tungsten leads to the localization of evaporated tungsten near the target at distances of up to 1 cm from the surface.

**Keywords:** plasma accelerator, hydrogen plasma flow, gas jet, gas screen, SXR–VUV radiation, tungsten, shielding, dissipative divertor