

## Измерение параметров плазменной струи в процессе облучения материалов

© А.В. Воронин,<sup>1</sup> В.К. Гусев,<sup>1</sup> Я.А. Герасименко,<sup>2</sup> Ю.В. Судьенков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
199164 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 14 ноября 2012 г.)

Представлена методика контроля параметров высокоэнергичной плазменной струи в процессе облучения материалов первой стенки термоядерного реактора на стенде плазменной пушки. Плотность плазмы измерена интерферометром, собранным на проходном фланце по схеме Майкельсона. Скорость движения плазмы регистрировалась по распространению фронта ионизации с помощью стрик камеры K008. Состав плазмы на выходе ускорителя и вблизи облучаемой мишени определен с помощью обзорного спектрометра AvaSpec 3648. Кинетическая энергия струи зарегистрирована калориметрическим методом. Давление струи плазмы на образец зарегистрировано пьезоэлектрическим и интерферометрическим методами одновременно в течение каждого облучения. Исследования показали, что стенд плазменной пушки позволяет создавать плазму с плотностью потока энергии, аналогичного ELM-событиям в токамаке, и проводить исследования по разработке защитных материалов для ITER.

### Введение

Изучение процессов взаимодействия плазмы с защитными материалами, разрабатываемыми для первой стенки токамаков, является одной из актуальных задач при создании термоядерных реакторов ITER и DEMO. Для решения этой и других задач управляемого термоядерного синтеза в ФТИ им. А.Ф. Иоффе создан стенд плазменной пушки. Стенд предназначен для разработки источника плотной водородной плазменной струи с большой кинетической энергией, пригодной для подпитки топливом установки с магнитным удержанием плазмы, а также для исследования процессов взаимодействия плазмы с поверхностью материалов первой стенки токамака-реактора, находящихся в условиях большой тепловой нагрузки. Источник струи постоянно совершенствуется и представляет собой модификацию коаксиального плазменного ускорителя с интенсивным напуском газа, высвобождаемым разрядом из гранул гидрида титана [1]. Энергия протонов в струе может достигать 300 eV, а плотность чистой водородной плазмы — до  $4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . В настоящей работе представлены методика и результаты контроля параметров струи в процессе облучения материалов импульсным источником плотной плазмы с большой кинетической энергией.

### Стенд плазменной пушки

На рис. 1 представлены общий вид стенда и схема экспериментальных исследований параметров плазменной пушки. Стенд состоит из плазменной пушки, большой вакуумной камеры объемом  $2.5 \text{ м}^3$ , малой вакуумной

камеры, а также диагностик для контроля параметров плазменной струи. Пушка присоединялась к большой камере непосредственно (положение 1) или через малую камеру (положение 2). В первом случае проводились измерения параметров невозмущенной струи, так как плазма могла свободно вытекать в вакуумный объем, не взаимодействуя с ее стенками. Во втором случае контролировались параметры плазменной струи в процессе ее взаимодействия с исследуемым образцом.

### Измерение плотности плазмы

Плотность плазмы в струе регистрировалась интерферометрическим методом по измерению концентрации ее электронной компоненты. Метод основан на измерении фазового сдвига прошедшей электромагнитной волны через исследуемый объект. Связь между фазовым сдвигом  $\varphi(t)$  и концентрацией электронов  $n(t)$  определялась по формуле [2]

$$\varphi(t) = \pi K \frac{ln(t)}{\lambda n_c}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина пути, пройденная зондируемой волной через плазму,  $\lambda$  — длина зондирующей волны,  $K$  — коэффициент, учитывающий распределение концентрации вдоль длины пути,  $n_c$  — критическая концентрация электронов в плазме, при которой излучение лазера не проходит сквозь плазму. Критическая концентрация определялась по формуле

$$n_c = \frac{m\omega^2}{4\pi l^2} = \frac{1.12 \cdot 10^{21}}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса электрона,  $\omega$  — плазменная частота.

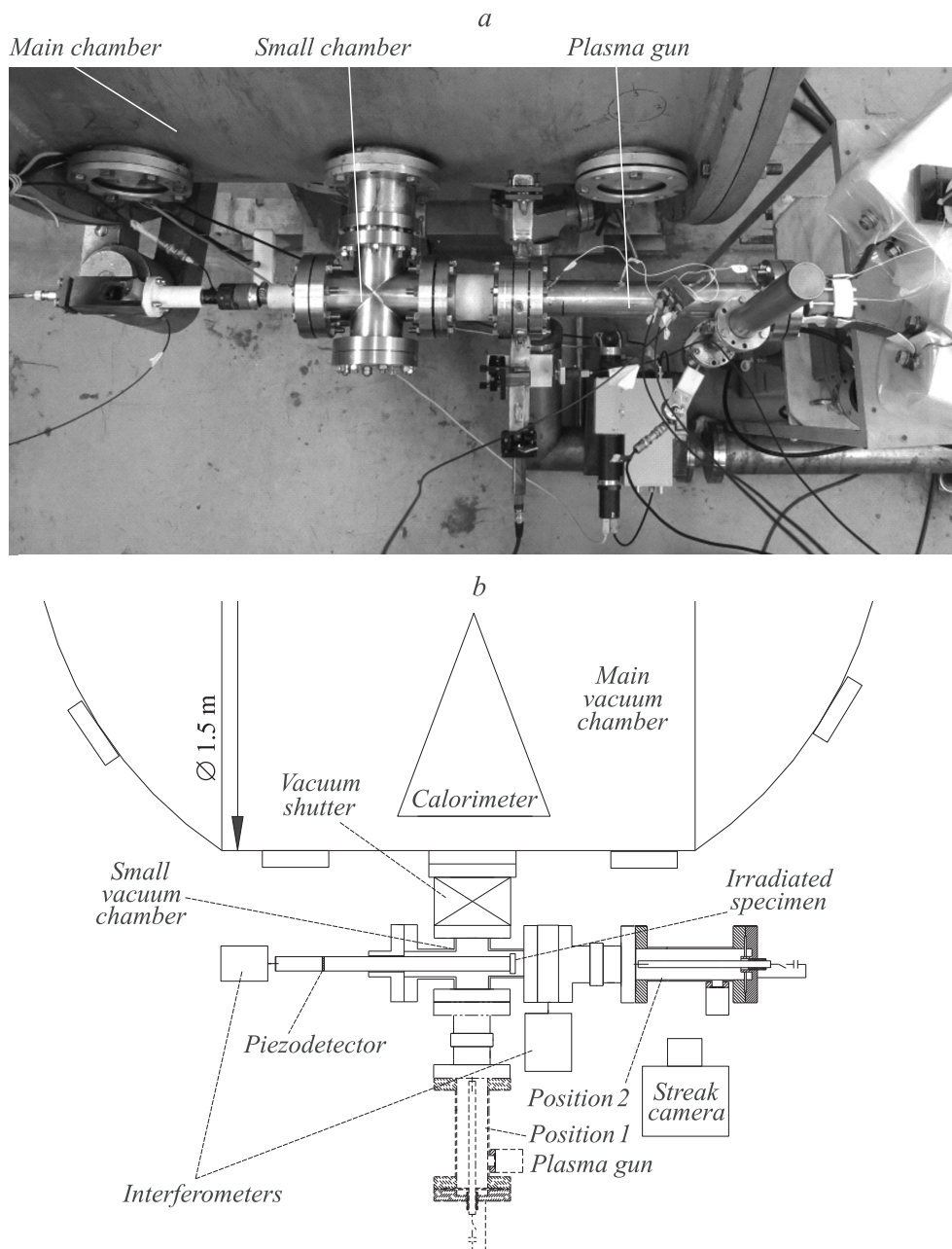


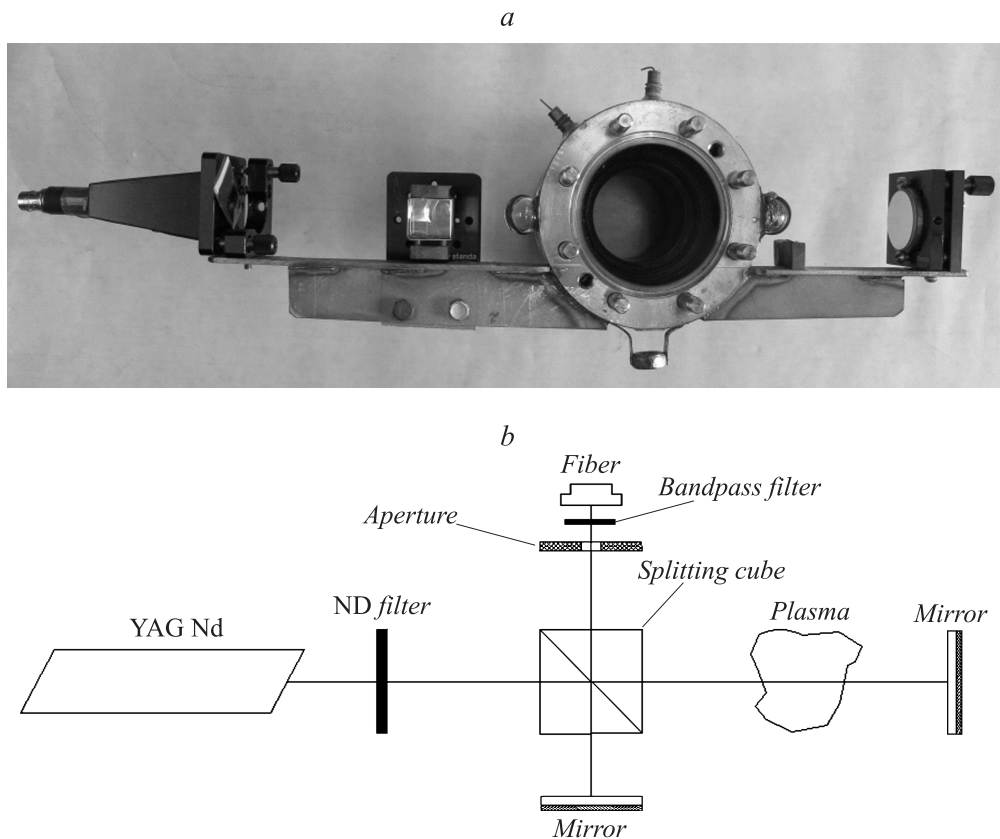
Рис. 1. Внешний вид стенда плазменной пушки (а), схема эксперимента (b).

Для значений концентрации плазмы  $\sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$  коэффициент  $K = 1$ . Усредненная плотность  $\bar{n}(t)$  электронной компоненты плазмы вдоль зондируемого направления рассчитывалась по формуле

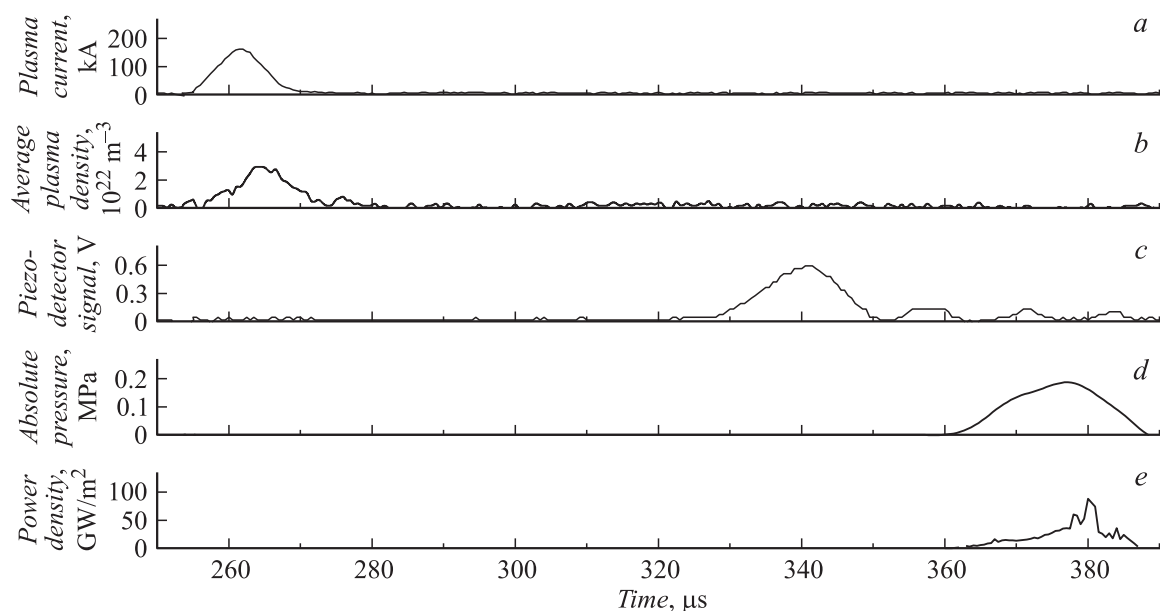
$$\bar{n}(t) = \frac{3.57 \cdot 10^{12} \varphi(t)}{\lambda l}. \quad (3)$$

Разработанный и изготовленный интерферометр позволял измерять усредненную плотность плазмы вдоль диаметра струи на различном расстоянии от ускорителя. Для этого лазерный интерферометр Майкельсона с фотоэлектронным счетом полос был собран на

проходном фланце (рис 2,а). В интерферометре использовалась вторая гармоника ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) излучения лазера YAG : Nd с мощностью 30 mW. Выходящее из лазера излучение делилось полупрозрачным зеркалом на две когерентные волны (рис. 2, b). Одна из них проходила через струю плазмы дважды в прямом и обратном направлениях, создавая набег фазы по отношению к волне в опорном плече. Результирующее излучение после интерференции волн на полупрозрачном зеркале передавалось по волоконному кабелю на фотоумножитель. Для уменьшения влияния излучения плазмы на интерференционный сигнал использовалась



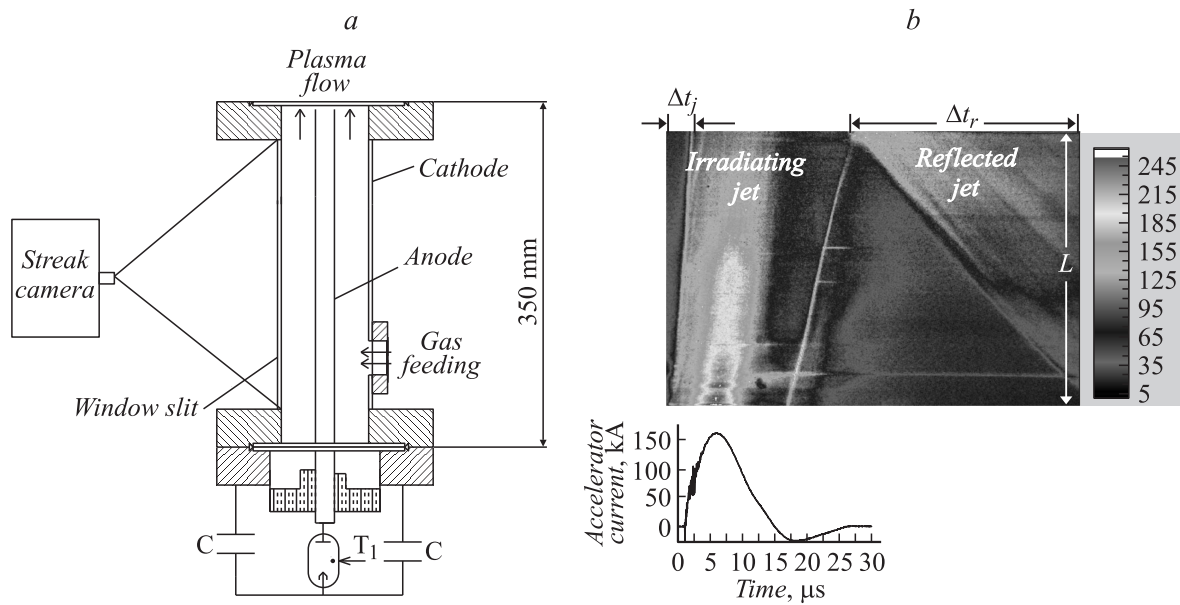
**Рис. 2.** Лазерный интерферометр, собранный на проходном фланце (a), схема интерферометра Майкельсона для измерения плотности плазмы (b).



**Рис. 3.** Зависимости параметров плазменной струи от времени (разряд 4195), напряжение на конденсаторном накопителе 4.5 kV, расстояние между облучаемым образцом и ускорителем 155 mm.

диафрагма и интерференционный фильтр с полосой пропускания ( $532.56 \pm 5 \text{ nm}$  (Andover Corporation 532FS10-12.5)). Аналого-цифровой преобразователь преобразовы-

вал сигнал умножителя для компьютерной обработки и анализа. Измеренные зависимости тока ускорителя и плотности плазменной струи от времени представлены



**Рис. 4.** Схема регистрации скорости движения плазмы (а), осциллограмма тока разряда и эволюция ионизационного фронта в ускорителе в процессе облучения мишени с расстояния 210 мм (b), (разряд 1542).

на рисунке 3, а, b. Видно, что длительность истечения плазменной струи составляла  $\sim 15 \mu\text{s}$ , а плотность и ток разряда достигали  $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$  и 200 кА соответственно. Фронт нарастания тока составлял  $\sim 5 \mu\text{s}$ .

### Измерение скорости движения плазменной струи

Скорость движения плазмы измерялась по распространению фронта ионизации в ускорителе с помощью стрик камеры. Электронно-оптическая камера K008 имела мультищелочной фотокатод и предназначена для регистрации изображений быстропротекающих процессов в однокадровом режиме и режиме линейной развертки [3]. Измерения пространственно-временных параметров проводились в видимом спектральном диапазоне с линейной разверткой длительностью от 0.1 до  $300 \mu\text{s}$  и таким же диапазоном длительностей кадров. Запись изображения с экрана электронно-оптического преобразователя (ЭОП) проводилась с помощью ПЗС считывающего устройства с вводом изображения в персональный компьютер. Программное обеспечение предоставляло пользователю возможности обработки зарегистрированного изображения.

Регистрация скорости движения ионизационного фронта проводилась в режиме линейной развертки регистрируемого изображения. Через узкую щель, вырезанную вдоль образующей наружного цилиндрического электрода, регистрировалось излучение разряда внутри коаксиального ускорителя в зависимости от времени (рис. 4, а). Длина щели от входа (нижняя часть) до выхода (верхняя часть) ускорителя составляла  $L = 300 \text{ mm}$ .

Время отображалось в горизонтальном направлении (рис. 4, b). Скорость движения ионизационного фронта плазмы измерялась по отношению длины ускорителя к интервалам времени между излучением, возникающим на входе и выходе ускорителя ( $\Delta t_j$  — падающей и  $\Delta t_r$  — отраженной от мишени струи). Движение плазмы в процессе облучения мишени представлено на рис. 4, b. Видно движение падающей и отраженной от мишени струй плазмы. Мишень находилась за пределами верхней части ускорителя и поэтому не видна. Измеренная скорость выходящей струи составила 150 км/с, отраженной от мишени — 10 км/с. Амплитуда и положение токового слоя в ускорителе измерялись с помощью светодиодных датчиков. Эта методика подробно описана в работе [4].

### Контроль элементного состава плазмы

Состав плазмы определялся спектрометрическим методом. Исследовалось излучение плазменной струи на выходе ускорителя с помощью обзорного AvaSpec 3648 спектрометра [5]. Опволоконный спектрофотометр разработан для проведения измерений в диапазоне 200–1100 нм с разрешением от 0.25 нм. Детектор спектрофотометра обладал покрытием, усиливающим чувствительность матрицы в УФ-диапазоне. Коллекторные линзы детектора дополнительно увеличивали чувствительность измерений. Измерительный модуль спектрофотометра построен на базе AvaBench-75 платформы с симметричной оптической скамьей Czerny-Turner и 3648 элементной CDD детекторной матрицей.

Спектральный состав плазмы на выходе ускорителя был насыщен примесями материала электродов и линиями возбужденного водорода, когда разряд горел на входе

или выходе ускорителя. При распределенном горении разряда вдоль ускорителя спектрометр практически не регистрировал какого-либо излучения, что свидетельствовало о полной ионизации потока водородной плазмы. Вблизи мишени в излучении присутствовали линии облученного материала.

## Измерение энергии плазменной струи

Кинетическая энергия струи плазмы регистрировалась калориметром, изготовленным в Лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе (рис. 5). Калориметр состоял из титанового конуса диаметром 185 mm и высотой 370 mm. Толщина стенки конуса 0.2 mm. Масса конуса  $M = 34\text{g}$ . К наружной поверхности конуса на равном расстоянии друг от друга были приварены 20 термопар, которые соединялись параллельно и подключались к цифровому датчику измерения температуры, например DT838. Калориметр был установлен на подвижной платформе в вакуумной

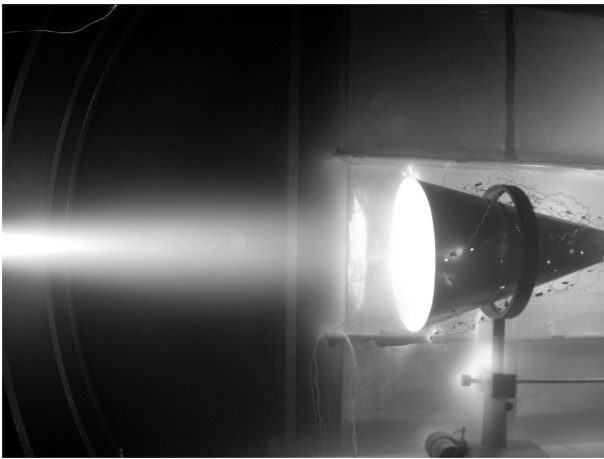


Рис. 5. Внешний вид калориметра, облученного плазмой пушки.

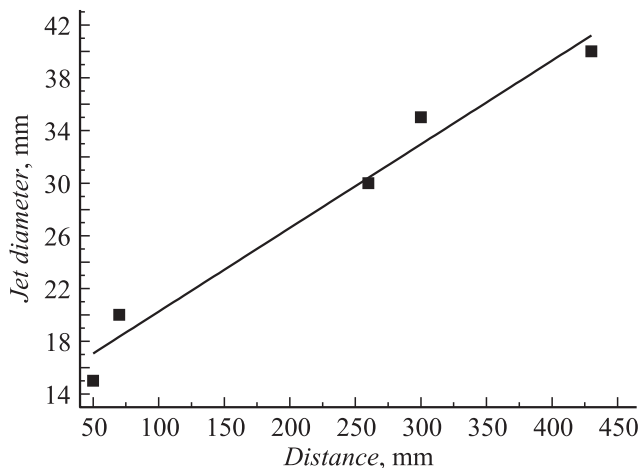


Рис. 6. Зависимость диаметра струи от расстояния до коаксиального ускорителя плазмы.

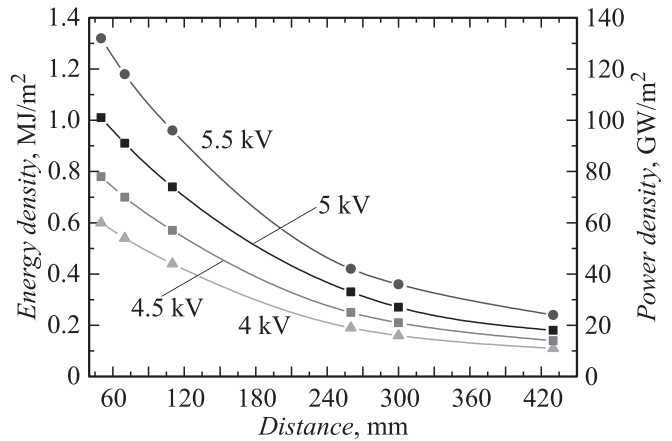


Рис. 7. Зависимость от расстояния плотности потока энергии струи до ускорителя для разных напряжений на конденсаторном накопителе.

камере вблизи выхода коаксиального ускорителя плазмы. Измерение температуры  $\Delta T$  калориметра производилось сразу после его облучения плазмой пушки. Кинетическая энергия  $Q$  струи плазмы рассчитывалась по формуле

$$Q = MC\Delta T, \quad (4)$$

где  $C = 523 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{grad})$  — удельная теплоемкость титана.

Измеренные значения кинетической энергии плазменной струи достигали 700 J. Зависимость поперечного размера струи от расстояния до ускорителя определялась по измерению характерных размеров пятен, полученных на образцах после облучения с различного расстояния (рис. 6). Видно, что струя расходится, а ее диаметр увеличивается по линейному закону.

Усредненная по времени плотность потока энергии струи рассчитывалась по формуле

$$\tilde{w} = \frac{Q}{S\Delta t_p}, \quad (5)$$

где  $Q$  — кинетическая энергия струи, измеренная калориметром,  $S$  — площадь пятна на облученном образце,  $\Delta t_p$  — длительность однократного облучения ( $\sim 15 \mu\text{s}$ ). Зависимости усредненной плотности потока энергии струи от расстояния до ускорителя плазмы представлены на рис. 7. Видно, что плотность потока энергии увеличивается по мере увеличения напряжения на конденсаторном накопителе и приближения к ускорителю и может достигать значения  $130 \text{ GW}/\text{m}^2$ .

В реакторе ITER плотность потока энергии на стенку при возникновении ELM-событий может составить около  $30 \text{ GW}/\text{m}^2$ . Изучение процессов взаимодействия плазмы с материалами при таких потоках является наиболее актуальным. Стенд плазменной пушки позволяет создавать такие потоки энергии и проводить исследования по разработке защитных материалов для установки ITER.



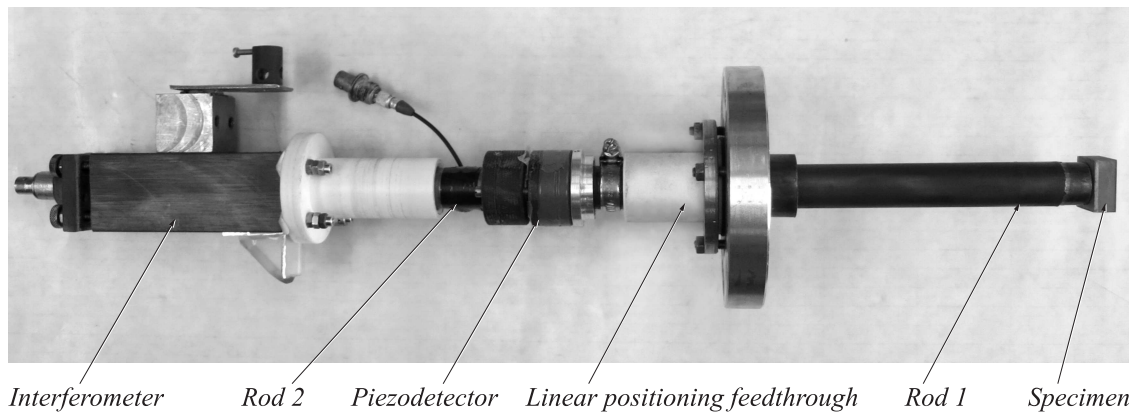


Рис. 8. Внешний вид пьезоэлектрического и интерферометрического датчиков давления.

## Измерение давления плазменной струи

Давление струи плазмы на образец регистрировалось пьезоэлектрическим и интерферометрическим методами одновременно в течение каждого облучения (рис. 8). Пьезоэлектрический датчик позволял получать временные зависимости относительных величин давления, а интерферометр — их абсолютные значения. Исследуемый образец прикреплялся к переднему торцу латунного стержня клеем (цианокрилат-гель). Боковая поверхность стержня была покрыта термоусадочной трубкой, которая демпфировала воздействие потока плазмы, огибающего преграду, на боковую поверхность стержня. Через вакуумный ввод стержень мог перемещаться вдоль оси и его передний торец с образцом мог располагаться на различном расстоянии от источника плазмы. Диаметр и длина стержня составляли соответственно 20 и 270 мм. К заднему торцу стержня был приклеен диск пьезоэлемента ЦТС-19 толщиной 0,5, диаметром 20 мм. К тыльной поверхности диска был приклеен торец аналогичного стержня длиной 100 мм со свободной зеркальной поверхностью на конце, контроль движения которого осуществлялся лазерным интерферометром Майкельсона с фотоэлектронным счетом полос. Склейки обеспечивали качественный акустический контакт на границах стержень–датчик–стержень. Интерферометр позволял с высоким временным разрешением регистрировать движение свободной поверхности стержня, вызванное облучением образца потоком плазмы. Смещение свободной поверхности  $\delta(t)$  связано с разностью фаз  $\varphi(t)$  интерферирующих волн соотношением [6]

$$\delta(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t), \quad (6)$$

где  $\lambda$  — длина волны источника излучения.

Давление, создаваемое плазменной струей на передней поверхности стержня, в упругом приближении и в пренебрежении затухания упругой волны в нем, может

быть рассчитано по соотношению [7]

$$P(t) = \frac{\rho c v_s(t)}{2} = \frac{\rho c}{2} \frac{\partial}{\partial t} [\delta(t)] = \frac{\rho c \lambda}{8\pi} \frac{\partial}{\partial t} [\varphi(t)], \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность материала стержня,  $c$  — скорость звука в стержне,  $v_s(t)$  — скорость движения свободной поверхности стержня.

Зависимость плотности потока энергии водородной струи от времени рассчитывалась по формуле

$$w(t) = P(t)v(t) = P(t)^{3/2} \sqrt{\frac{2}{m_p \bar{n}(t)}} = \frac{3.5 \cdot 10^{13} P(t)^{3/2}}{\sqrt{\bar{n}(t)}}, \quad (8)$$

где  $v(t)$  — скорость движения струи,  $n(t)$  — плотность плазмы,  $m$  — масса покоя протона. Временные зависимости давления, измеренные двумя методами, и плотности потока энергии плазменной струи представлены на рис. 3, *c, d, e*. Задержка импульсов давления относительно тока ускорителя обусловлена временем, необходимым для прохождения акустической волны через стержень. Видно, что формы импульсов давления, измеренных двумя способами, хорошо совпадают. Для напряжения на конденсаторном накопителе ускорителя 4.5 кВ и расстояния до мишени 155 мм максимальное значение давления плазменной струи составляет 0.23 МПа, а плотность потока энергии достигает 88 GW/m<sup>2</sup>.

## Заключение

Разработана методика контроля параметров высокоэнергичной плазменной струи в процессе облучения материалов первой стенки термоядерного реактора на стенде плазменной пушки. Изготовлен интерферометр, позволяющий измерять усредненную плотность плазмы вдоль диаметра струи на различном расстоянии от ускорителя. Плотность плазмы вблизи облучаемого образца превышала  $3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Проведены исследования движения плазменных потоков в процессе облучения мишени. Измерена скорость движения плазмы

по распространению фронта ионизации с помощью стрик камеры. Скорость выходящей струи составила 100–200 km/s, отраженной от мишени 5–15 km/s. Проведены исследования состава плазмы на выходе ускорителя и вблизи облучаемой мишени с помощью обзорного спектрометра. На выходе ускорителя при распределенном горении разряда вдоль электродов спектрометр практически не регистрировал какого-либо излучения, что свидетельствовало о полной ионизации водородной плазмы. Вблизи мишени в излучении присутствовали линии облученного материала. Разработан и изготовлен калориметр для измерения энергии плазменной струи. Измеренная средняя плотность потока энергии струи увеличивалась по мере приближения к ускорителю и могла достигать значений  $130 \text{ GW/m}^2$ . Разработаны и опробованы пьезоэлектрический и интерферометрический методы измерения давления струи плазмы. Оба метода дополняют друг друга и позволяют получать абсолютные значения и временные зависимости давления. Результаты измерений давления и плотности плазмы позволили определить временную зависимость плотности потока энергии струи вблизи облучаемого образца. Исследования показали, что стенд плазменной пушки позволяет создавать плазму с плотностью потока энергии, аналогичного ELM-событиям в токамаке, и проводить исследования по разработке защитных материалов для ITER.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 11-08-00813-а, IAEA Research Contract N 16939, а также при поддержке президиума РАН, Министерства образования и науки, ГК № 16.552.11.7002, 16.518.11.7003, 14.518.11.7004. 11.G34.31.0041.

## Список литературы

- [1] *Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V. et al. // Nukleonika. 2008. Vol. 53. P. 103.*
- [2] *Голант В.Е. // Сверхвысокочастотные методы диагностики плазмы. М.: Наука, 1968. С. 69.*
- [3] *Техническая документация электронно-оптической камеры K008 фирмы-изготовителя ООО БИФО <http://www.bifocompany.com/rus/p-cam-k008.php.htm>.*
- [4] *Воронин А.В., Гусев В.К., Кобяков С.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 63–67.*
- [5] *Техническая документация спектрометра AvaSpec 3648 <http://www.avantes.com/Chemistry/AvaSpec-3648-Fiber-Optic-Spectrometer/Detailed-product-flyer.html>, <http://www.avantes.ru/spectroavaspec3648.php>.*
- [6] *Осинов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А. // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 38–41.*
- [7] *Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. С. 192.*