

## Реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2 инжектора атомов сферического токамака Глобус-М2

© А.Ю. Тельнова,<sup>1</sup> В.Б. Минаев,<sup>1</sup> А.А. Панасенков,<sup>2</sup> П.Б. Щёголев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123098 Москва, Россия  
e-mail: anna.telnova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 23 декабря 2021 г.

Принято к публикации 24 декабря 2021 г.

Рассмотрена подготовка ионно-оптической системы ионного источника ИПМ-2 к эксперименту по нагреву плазмы нейтральным пучком на сферическом токамаке Глобус-М2. Проведена полная реновация ионно-оптической системы ионного источника, включающая в себя ее сборку, настройку и испытания. Для оценки качества проведенных работ выполнены измерения основных параметров высокоэнергичного пучка, его энергетического спектра и сигналов с вторично-эмиссионных зондов. На основе полученных данных восстановлен профиль распределения плотности мощности пучка, его характерные размеры, а также рассчитаны относительные концентрации энергетических компонентов пучка.

**Ключевые слова:** термоядерный синтез, нейтральная инжекция, инжектор атомов, источник ионов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52240.292-21

### Введение

В экспериментах на сферическом токамаке Глобус-М [1] инжектор атомов НИ-1 [2], разработанный в 70-е гг. в НИЦ „Курчатовский институт“ для токамака Т-11, используется в качестве основного инструмента для нагрева плазмы. Глобус-М2 — новый компактный сферический токамак [3,4], являющийся модернизированной версией токамака Глобус-М (с аспектным отношением  $A = 1.5$ , большим радиусом  $R = 0.36$  м, малым радиусом  $a = 0.24$  м). В новой установке тороидальное магнитное поле  $B_T$  и ток плазмы  $I_p$  могут быть увеличены до 1 Т и 500 кА соответственно. Для Глобуса-М2 был обновлен диагностический комплекс [5], а также комплекс нейтральной инжекции, в который был введен второй инжектор НИ-2 [6].

Инжектор НИ-1 обеспечивает возможность инжекции водородного или дейтериевого пучка с энергией частиц до 30 keV длительностью до 50 ms. Максимальная мощность нейтрального пучка на выходном патрубке инжектора составляет 0.5 или 1.0 MW в зависимости от типа установленного источника ионов (ИПМ-2 или ИПМ-1). В настоящей работе описывается работа по реновации ионно-оптической системы источника ИПМ-2, анализу качества проведенных работ и подготовке источника к экспериментам по дополнительному нагреву плазмы сферического токамака Глобус-М2. Настоящая работа содержит множество специфических терминов, связанных с физикой ионных источников и атомных пучков, для более глубокого и детального представления

о данной сфере можно ознакомиться с источниками литературы [7–10].

### 1. Настройка ионно-оптической системы источника ИПМ-2

#### 1.1. Устройство ионно-оптической системы

Формирование и извлечение пучка ионов в источнике типа ИПМ (источник с периферийным магнитным полем) происходит с помощью многощелевой ионно-оптической системы (ИОС), состоящей из трех электродов: эмиссионного (ЭЭ), отрицательного (ОЭ) и заземленного (ЗЭ). На щелях линз ЭЭ электрическое поле, созданное в ускорительном промежутке, формирует плазменный эмиттер и извлекает поток ионов. ОЭ обеспечивает общую фокусировку пучка и служит для запирающего обратного потока электронов вторичной плазмы. ЗЭ обеспечивает „нулевой“ потенциал выходящего ионного пучка. На рис. 1 представлена собранная линза ОЭ источника ИПМ-2 в сборе, а также сменные решетки для нее.

ИОС источника обеспечивает общую фокусировку пучка в двух направлениях: горизонтальном — за счет того, что решетки ЭЭ и ОЭ выгнуты вдоль щелей с радиусом кривизны порядка 2.5 м, и вертикальном — за счет того, что крайние решетки (верхняя и нижняя на рис. 1) ОЭ раздвинуты в вертикальном направлении относительно соответствующих решеток ЭЭ.

В ионном источнике ИПМ-2 смещение крайних решеток ОЭ относительно центральной оси должно со-



Рис. 1. Линза ОЭ ионного источника ИПМ-2 в сборе и сменные решетки для него.

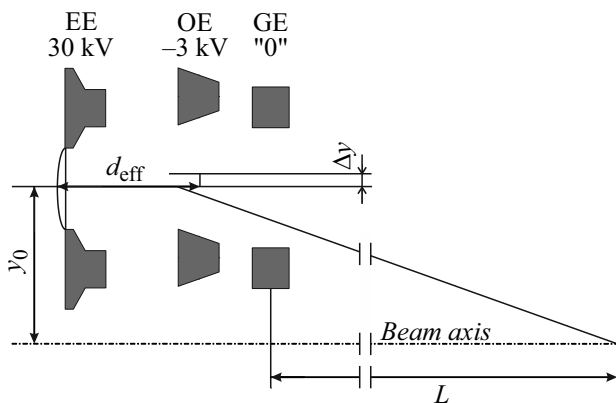


Рис. 2. Геометрия щелевой ячейки ИОС источника ИПМ и фокусировка пучка в направлении поперек щелей за счет смещения ОЭ относительно ЭЭ.

ставлять по проекту  $\Delta y = 200 \mu\text{m}$ , что соответствует фокусному расстоянию 2.5 м.

В области щели ОЭ при отсутствии смещения конфигурация эквипотенциал образует рассеивающую линзу с фокусным расстоянием  $F \approx 1.6d$  ( $d$  — величина зазора между ЭЭ и ОЭ) [7,8] (рис. 2) [9]. Следует отметить, что в качестве  $d$  берется некоторая эффективная величина  $d_{\text{eff}}$ , большая фактического расстояния между электродами, поскольку она учитывает как толщину эмиссионного электрода, так и „провисание“ электрического поля в щели линзы ОЭ. Эффективный размер ускоряющего промежутка  $d_{\text{eff}} = t_1 + d + \delta_2$ , где  $t_1$  — толщина эмиссионного электрода,  $\delta_2$  — полуширина

целевой апертуры ОЭ. С достаточной точностью можно сказать, что каждая ячейка функционирует независимо, и пучок в целом складывается из отдельных элементарных пучков, угол наклона оси которых определяет фокусировку пучка в вертикальном направлении (поперек щелей). Для того чтобы элементарный пучок, выходящий из некоторой щели в ЭЭ, расположенной на расстоянии  $y_0$  от центральной щели (через которую проходит ось пучка), пересек ось пучка в точке, находящейся на расстоянии  $L$  от источника, необходимо, чтобы центр щели в ОЭ был расположен на расстоянии  $y_0 + \Delta y$  от оси пучка, причем смещение  $\Delta y$  находится из условия  $y_0/L = 0.625\Delta y/d_{\text{eff}}$ ,  $\Delta y = 1.6d_{\text{eff}} : y_0/L$ . При этом размер пучка в целом определяется угловой расходимостью элементарных пучков и расстоянием  $L$ . Ограничение на размеры пучка накладывается размерами входного патрубка токамака, которые составляют  $26.5 \times 8.5 \text{ cm}$ .

### 1.2. Сборка ИОС ИПМ-2

Основные проектные характеристики источника ИПМ-2 приведены в табл. 1.

После аварии на источнике ИПМ-1 на инжектор был установлен источник ИПМ-2. Анализ сигналов вторично-эмиссионных зондов, установленных на приемнике пучка [2] во время выстрела инжектора, показал заметное увеличение размера пучка в вертикальном направлении. Оно свидетельствует о проблемах с фокусировкой в ИОС. Необходимо заметить, что одной из основных трудностей при сборке и юстировке многощелевой ИОС является выдерживание заданной проектной точности выставления решеток на ее электродах, при этом допустимая погрешность при изготовлении решеток составляет  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Проверка качества изготовления решеток и юстировка ИОС проводились с помощью

Таблица 1. Основные параметры источника ИПМ-2

Максимальная мощность пучка ионов, MW	водород	1.0
	дейтерий	0.7
Максимальное ускоряющее напряжение, kV		30
Максимальный ток ионного пучка на водороде, A		35
Максимальный ток ионного пучка на дейтерии, A		25
Количество решеток в электродах		3
Фокусное расстояние, m	— в горизонтальной плоскости	2.5
	— в вертикальной плоскости	2.5
Угол расхождения пучка, градус:	— горизонтальный (вдоль щелей)	$\pm 0.6$
	— вертикальный (поперек щелей)	$\pm 1.5$
Содержание компонентов $\text{H}_1^+/\text{H}_2^+/\text{H}_3^+$ (при плотности тока $0.4 \text{ A/cm}^2$ ), %		75/18/7

линейного компаратора ИЗА-2 [11], который предназначен для измерения длин с точностью до  $1\ \mu\text{m}$ . Как было отмечено ранее, ИОС ионного источника ИПМ-2 состоит из трех линз (электродов), каждая из которых состоит из трех решеток по 14 щелей в каждой (т.е. всего 42 элементарные ячейки) (рис. 1).

В первую очередь были промерены линзы ЭЭ, ОЭ, ЗЭ, и на основе измерений была определена величина смещение щелей ОЭ относительно ЭЭ. В результате выяснилось, что за время эксплуатации изменились линейные размеры некоторых элементарных ячеек, а также смещения в целом крайних решеток ОЭ относительно ЭЭ, что отражает рис. 3, на котором изображены смещения центров щелей ОЭ относительно центров щелей ЭЭ для каждой элементарной ячейки. Полученные данные свидетельствуют о том, что смещение как нижней, так и верхней решеток существенно отличается от проектного значения (составляет около  $100\ \mu\text{m}$  для нижней и  $250\ \mu\text{m}$  для верхней). При этом смещение сверх  $250\ \mu\text{m}$  недопустимо, так как в целом снижается прозрачность оптической системы и увеличивается риск попадания элементарного пучка напрямую в конструктивный элемент решетки ОЭ. На основании измерений решеток и оценки их смещений друг относительно друга рассчитаны фокусные расстояния для каждой элементарной ячейки ИОС. Результаты расчета показали существенное ухудшение фокусировки ИОС, которое связано с возникающими в процессе эксплуатации источника неравномерными тепловыми нагрузками на ее электроды (пробои, локальные перегревы и т.д.), которые приводят к неизбежному изменению геометрии линз ИОС, в том числе вследствие деформации образующих щелевую апертуру конструктивных элементов решеток.

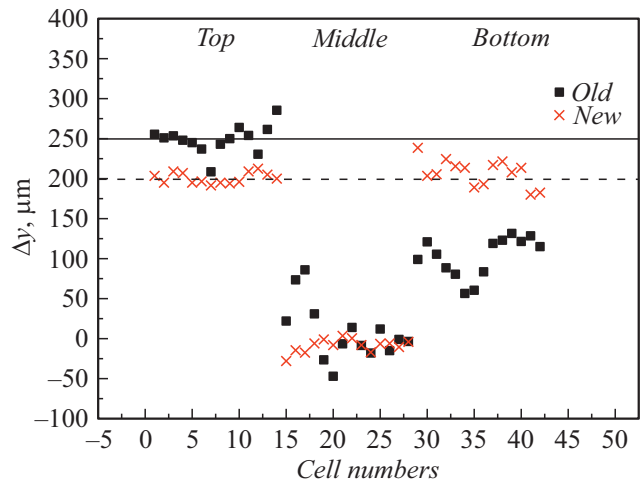
Результаты измерений свидетельствуют о необходимости реновации источника ИПМ-2, некоторые решетки ИОС требуют замены, а затем вся система в целом — сборки, настройки и юстировки. После тщательного осмотра и анализа было решено сохранить существующие решетки ЭЭ, но заменить весь комплект поврежденных решеток ОЭ и ЗЭ. Подбор оптимального соответствия отдельных решеток ЭЭ и ОЭ проводился следующим образом.

1. Все решетки ЭЭ и ОЭ были измерены для оценки качества их изготовления. На основе результатов измерений решетки сравнивались между собой, чтобы подобрать их оптимальное соответствие по парам из разных электродов.

2. Решетки раскладывались на линзах электродов, чтобы обеспечить заданное смещение для крайних решеток ОЭ.

В результате проведенной работы выбран оптимальный вариант расположения решеток относительно друг друга в сборках линз, при котором обеспечивается требуемая фокусировка пучка.

Результаты измеренных смещений для новой сборки ИОС приведены на рис. 3 (крестики): достигнута необходимая точность юстировки ЭЭ и ОЭ, фокусное расстояние



**Рис. 3.** Смещения центров щелей ОЭ относительно центров щелей ЭЭ, отсчитанные от оси пучка, в старой и новой ИОС ИПМ-2.

яние составляет около  $2.5\ \mu\text{m}$ , а смещение решеток ЭО не превышает  $250\ \mu\text{m}$ . Измерения решеток ЗЭ показали, что их сегменты подверглись деформации, что могло сказываться на прозрачности ИОС, поэтому они были заменены на новые. Влияние линзы ЗЭ непосредственно на фокусировку незначительно, но ее сегменты не должны препятствовать прохождению пучка.

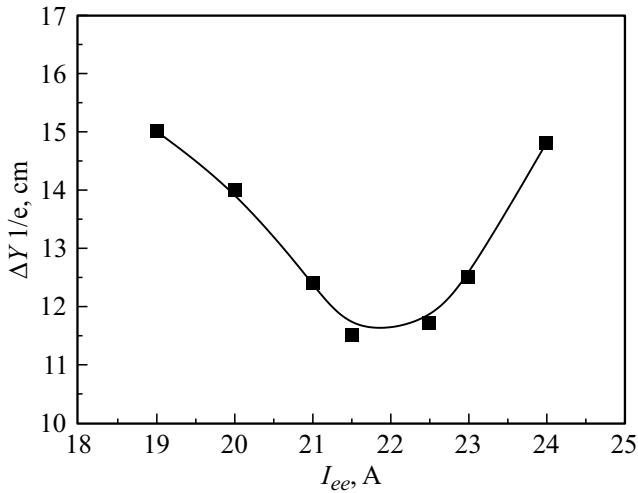
## 2. Испытания источника ИПМ-2 и оценка качества проведенной реновации ИОС

Для испытаний ИПМ-2 и контроля качества фокусировки обновленной ИОС ионный источник был установлен на инжектор, где проведены его вакуумные испытания, а затем высоковольтная тренировка. Проведение этой процедуры необходимо для очистки поверхностей электродов ИОС посредством многократных высоковольтных пробоев ограниченной энергии. После выполнения всех испытаний и вывода инжектора на рабочий режим была проведена проверка качества сборки ИОС путем подбора оптимального тока ЭЭ при фиксированном ускоряющем напряжении с контролем размера пучка (данные с вторично-эмиссионных зондов на приемнике пучка). Параметры работы инжектора во время проверки качества сборки ИОС приведены в табл. 2.

При оптимальном значении тока ЭЭ пучок будет иметь наилучшую фокусировку поперек щелей ИОС и соответственно наименьший размер, в противном случае он будет размыт по вертикали. Оценка фокусировки проводилась на основании данных о профиле плотности мощности атомарного пучка, реконструируемом по сигналам с вторично-эмиссионных зондов (22 шт.) приемника пучка. Методика реконструкции, описанная

**Таблица 2.** Параметры работы инжектора во время проверки качества сборки ИОС

Напряжение ЭЭ, kV	26
Ток ЭЭ, А	19–24
Длительность импульса, ms	40
Рабочий газ	дейтерий



**Рис. 4.** Зависимость высоты пучка на уровне 1/e от тока ЭЭ при фиксированном ускоряющем напряжении 26 kV.

в работе [2], позволяет восстановить профиль распределения плотности мощности по сечению пучка и, таким образом, оценить качество фокусировки. Для визуализации и анализа данных зондовых измерений используется код DAS Tools [12]. Для оценки качества фокусировки пучков проводили сравнение их высоты  $\Delta Y$ , [cm] на уровне плотности мощности 1/e при разных токах ЭЭ, результаты этого сравнения приведены на рис. 4.

Минимум полученной зависимости седлового вида приходится на ток 21.5–22 А, который и соответствует оптимальному для ускоряющего напряжения 26 kV, вертикальный размер пучка при этом на уровне 1/e составляет 11.5–12 см, что соответствует 16–17 см на уровне плотности мощности 0.9 и свидетельствует о хорошей фокусировке.

Теперь возможно провести оценку мощности ионного и атомного пучка при оптимальном токе эмиссионного электрода, для этого воспользуемся формулами, приведенными в [2]. Коэффициенты преобразования ионного пучка в атомный, а также коэффициент транспортировки  $\eta_{io} \times \eta_{tr}$  можно оценить из соотношения сигналов одинаковых зондов с включенным и выключенным электромагнитом. В результате мощность дейтериевого пучка при энергии 26 keV составляет 400 kW.

Для оценки качества реновации ИОС проведено сравнение размеров полученного с ее помощью пучка с размерами пучков, полученных в прошлых экспериментальных кампаниях источника ИПМ-2 с другой сборкой ИОС при оптимальных параметрах пучка и ускоряющем напряжении 26 kV. Параметры разрядов приведены в табл. 3. Разряд N 407815 относится к серии с новой сборкой ИОС. Напряжение ОЭ в данных разрядах составляло 3 kV, а ток ОЭ 1.5 А.

На рис. 5 приведены осциллограммы основных сигналов для соответствующих разрядов для пучка с энергией 26 keV.

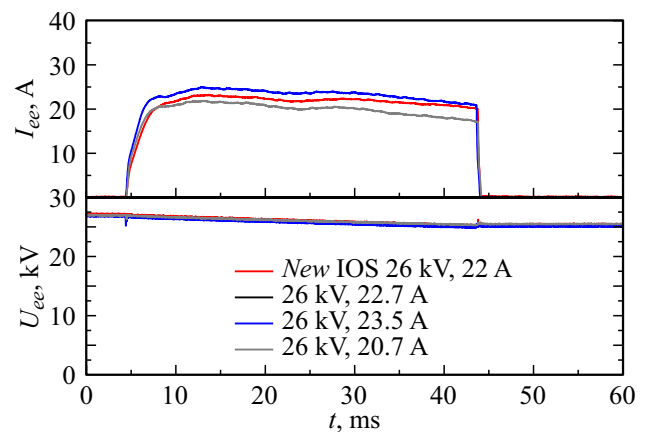
Результаты восстановления ширины и высоты пучков для рассмотренных разрядов представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Рис. 5 демонстрирует увеличение ширины пучка для новой сборки ИОС почти в два раза, что объясняется установкой нового комплекта решеток ОЭ без формовки (т.е. радиус кривизны равен нулю). Высоты пучков для разных сборок ИОС практически совпадают, что свидетельствует о хорошей фокусировке по вертикали.

Таким образом, размеры пучка ИПМ-2 после реновации на приемнике составляют  $X \times Y = 5 \times 13$  cm на уровне плотности мощности 1/e, а размер пучка по горизонтали не превышает 8 см, что не превосходит ширину стыковочного патрубка инжектора, которая составляет 8.5 см.

**Таблица 3.** Основные параметры разрядов из разных серий ИПМ-2

N NBI	$U_{ee}, kV$	$I_{ee}, A$	$t, ms$	Газ
318961	26	20.7	40	D
318962	26	22.7	40	D
321256	26	23.5	40	D
407815	26	22	40	D



**Рис. 5.** Осциллограммы основных сигналов для разрядов из табл. 3: ток ЭЭ и напряжение ЭЭ.

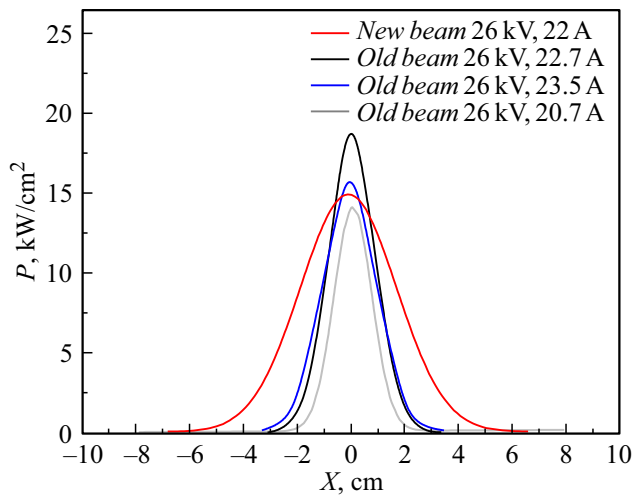


Рис. 6. Профиль распределения плотности мощности пучков по ширине.

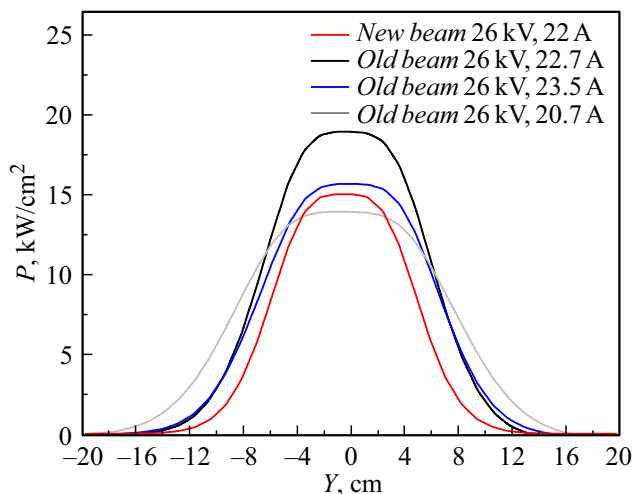


Рис. 7. Профиль распределения плотности мощности пучков по высоте.

### 3. Подготовка нейтрального пучка к экспериментам на сферическом токамаке Глобус-М2

В экспериментах на токамаке Глобус-М2 для получения наибольшего нейтронного выхода в разрядах с дополнительным нагревом плазмы необходимо инжектировать дейтериевый пучок максимально возможной энергии и мощности. Согласно проектным параметрам (табл. 1) источника ИПМ-2, максимальная мощность ионного дейтериевого пучка достигает 0.7 MW при энергии 30 kV. Путем постепенного повышения напряжения эмиссионного электрода ( $U_{ee}$ ) и пропорционального увеличения его тока ( $I_{ee}$ ) получены и оптимизированы параметры пучка, близкие к проектным (рис. 8).

Для максимального проектного значения напряжение ЭЭ 30 kV для источника ИПМ-2 оптимальный ток ЭЭ на дейтерии составил 25 A. Мощность ионного пучка оценивалась по формуле  $P_i = U_{ee} \cdot (I_{ee} - (1/2)I_{oe})$ ,  $I_{oe}$  — ток отрицательного электрода, которая дает среднюю по времени мощность ионного пучка ( $P_i$ ) около 700 kW. За время импульса инжекции происходит небольшое уменьшение ускоряющего напряжения из-за разрядки питающего емкостного накопителя. Кроме того, газовый разряд в источнике не вполне стационарен — за время инжекции заметно изменяется величина разрядного напряжения, несмотря на постоянство тока разряда. Обе причины вместе влияют на форму импульса вытягиваемого ионного тока и, следовательно, на фокусировку. Тем не менее колебания размеров пучка поперек решеток с течением времени незначительны, а значит, фокусировку пучка во время всего импульса инжекции можно считать удовлетворительной, что подтверждает временная эволюция высоты пучка на уровне плотности мощности  $1/e$  (рис. 7). В результате полная вводимая в токамак мощность атомного пучка в среднем составляет 500 kW, а ее вариации не превышают 10%.

Важнейшим параметром инжектированного в токамак пучка является его энергетический состав, представляющий собой процентное соотношение на выходе из нейтрализатора между компонентами пучка с различной энергией. В ионном пучке, выходящем из источника, наряду с атомарными ионами  $D_1^+$  присутствуют в некотором количестве молекулярные ионы  $D_2^+$ ,  $D_3^+$  и примесные гидроксильные ионы  $D_2O^+$ , чье наличие обусловливается процессами, происходящими в плазме дугового разряда в газоразрядной камере. Молекулярные ионы, проходя в нейтрализаторе через перезарядную мишень, захватывают электрон и диссоциируют на атомы

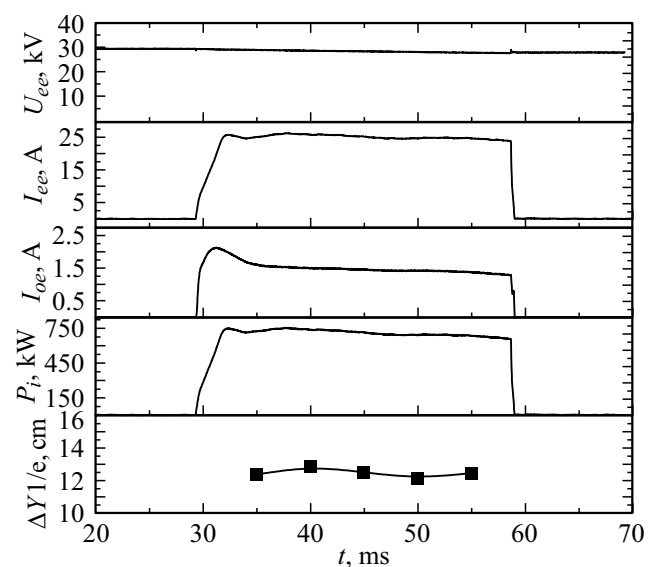
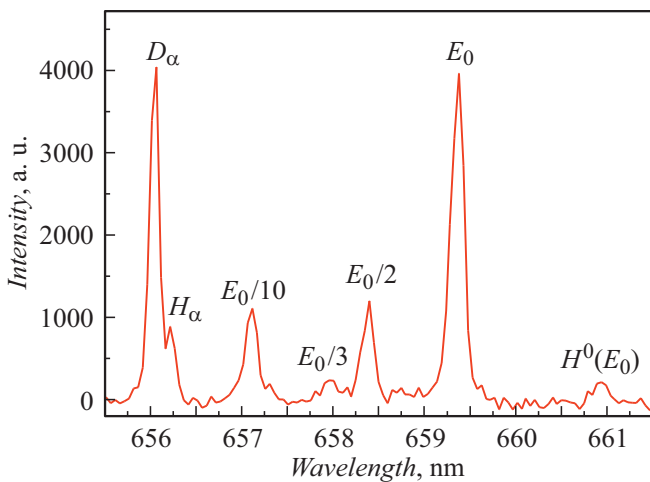


Рис. 8. Временные зависимости напряжения ЭЭ, тока ЭЭ, тока ОЭ, мощности ионного пучка, высоты пучка на уровне плотности мощности  $1/e$ .



**Рис. 9.** Спектр излучения пучка дейтерия при его инжекции в плазму токамака.

с энергиями  $E$ ,  $E/2$ ,  $E/3$  и ( $E$  — основная энергия) соответственно из быстрых ионов  $D_1^+$ ,  $D_2^+$ ,  $D_3^+$ , а гидроксильные ионы  $D_2O^+$  — на атомы с энергией  $E/10$ . На выходе из нейтрализатора магнитным полем из пучка удаляются заряженные частицы. Оставшиеся в пучке атомы из-за соударений с фоновым газом возбуждаются и излучают линию  $D_\alpha$ . Распределение частиц пучка по энергии определяют, используя бесконтактный метод диагностики, основанный на регистрации излучения с длиной волны, смещенной вследствие эффекта Доплера и описанный подробно в [13]. Группы атомов благодаря доплеровскому смещению излучают разделенные по длине волны спектральные линии, соответствующие частицам с энергией  $E$ ,  $E/2$ ,  $E/3$  и  $E/10$ . Наблюдение излучения, рожденного взаимодействием пучка с остаточным газом, позволяет различить эти спектральные линии. Пример такого спектра для пучка атомов максимальной мощности, основные осциллограммы которого приведены на рис. 8, представлен на рис. 9.

Различают пять линий: одна интенсивная линия слева соответствует свечению атомарного дейтерия при возбуждении фонового газа пучком (линия  $D_\alpha$ ), и три сильно смещенных линии справа соответствуют свечению быстрых атомов с энергиями  $E$ ,  $E/2$ ,  $E/3$ . Линия, ближайшая к несмещенной, соответствует излучению атомов дейтерия  $E/10$ . В спектре для дейтериевого пучка также присутствует небольшой пик справа от линии, соответствующей свечению атомов с энергией  $E$ , указывая на наличие примеси водорода в дейтерии. Анализ полученного спектра дейтериевого пучка дает относительную концентрацию атомов с энергией  $E$  — 59%,  $E/2$  — 19%,  $E/3$  — 6% и  $E/10$  — 16%. Если исключить компонент, связанный с присутствием гидроксильного иона, то для компонентов „чистого“ пучка соотношение будет:  $E$  — 70%,  $E/2$  — 23%,  $E/3$  — 7%. При пересчете в доли мощности, переносимые соответствующим компонентом с энергией  $E$ , получаем, что подавляющая

доля мощности пучка ( $\sim 70\%$ ) приходится на атомы с энергией  $E$ , а мощность, приходящаяся на частицы с энергией  $E/10$ , пренебрежимо мала (менее 1%).

## Выводы

В процессе подготовки комплекса нейтральной инжекции к экспериментам по нагреву плазмы и генерации тока на сферическом токамаке Глобус-М2 проведена реновация ионного источника ИПМ-2. Оценка фокусировки ИОС первоначально показала, что фокусное расстояние не соответствует заявленному, вследствие чего была собрана и настроена новая ИОС. После установки ИПМ-2 на инжектор для выбранного значения напряжения ЭЭ было подобрано оптимальное значение тока ЭЭ, при котором пучок имеет наилучшую фокусировку поперек щелей ИОС, и проведено сравнение с фокусировкой пучка из предыдущих экспериментальных кампаний ИПМ-2. В результате подтверждено, что фокусировка по вертикали в источнике удовлетворительная и с хорошей точностью соответствует проектным параметрам. Однако из-за отсутствия формовки нового комплекта решеток ОЭ, фокусировка пучка в горизонтальной плоскости ухудшилась, и новые размеры пучка составили  $X \times Y = 5 \times 13$  см на уровне плотности мощности 1/e. Кроме того, на источнике вновь достигнуты максимальные проектные параметры для пучка дейтерия, а полная инжектируемая мощность составляет 500 kW. Таким образом, проведенная реновация и высоковольтная подготовка ИПМ-2 позволяют проводить эксперименты по нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М2.

## Благодарности

Измерения основных параметров пучка были проведены на уникальной научной установке „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

## Финансирование работы

Работы, представленные в разд. 1, выполнены при поддержке ФТИ им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного задания 0040-2019-0023. Работы, представленные в разд. 2, выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-72-20076. Работы, представленные в разд. 3, выполнены в рамках государственного задания 0034-2021-0001.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко, М.А. Ирзак, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, К.А. Подушникова, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, Е.Н. Трегубова, В.С. Узлов, О.Н. Щербинин, В.А. Беляков, А.А. Кавин, Ю.А. Косцов, Е.Г. Кузьмин, В.Ф. Соикин, Е.А. Кузнецов, В.А. Ягнов. *ЖТФ*, **69** (9), 58 (1999). [V.K. Gusev, V.E. Golant, E.Z. Gusakov, V.V. D'yachenko, M.A. Irzak, V.B. Minaev, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatskii, K.A. Podushnikova, G.T. Razdobarin, N.V. Sakharov, E.N. Tregubova, V.S. Uzlov, O.N. Shcherbinin, V.A. Belyakov, A.A. Kavin, Yu.A. Kostsov, E.G. Kuz'min, V.F. Soikin, E.A. Kuznetsov, V.A. Yagnov. *Tech. Phys.*, **44** (9), 1054 (1999). DOI: 10.1134/1.1259469]
- [2] В.К. Гусев, А.В. Деч, Л.А. Есипов, В.Б. Минаев, А.Г. Барсуков, Г.Б. Игонькина, В.В. Кузнецов, А.А. Панасенков, М.М. Соколов, Г.Н. Тилинин, А.В. Лупин, В.К. Марков. *ЖТФ*, **77** (9), 28 (2007). [V.K. Gusev, A.V. Dech, L.A. Esipov, V.B. Minaev, A.G. Barsukov, G.B. Igon'kina, V.V. Kuznetsov, A.A. Panasenkov, M.M. Sokolov, G.N. Tilinin, A.V. Lupin, V.K. Markov. *Tech. Phys.*, **52** (9), 1127 (2007). DOI: 10.1134/S1063784207090058]
- [3] В.Б. Минаев, В.К. Гусев, Н.В. Сахаров, В.И. Варфоломеев, Н.Н. Бакhareв, В.А. Беляков, Е.Н. Бондарчук, Р.Н. Брунков, Ф.В. Чернышев, В.И. Давыденко, В.В. Дьяченко, А.А. Кавин, С.А. Хитров, Н.А. Хромов, Е.О. Киселев. *Nucl. Fusion*, **57**, 066047 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0
- [4] В.К. Гусев, Н.Н. Бакhareв, В.А. Беляков, В.Я. Бер, Е.Н. Бондарчук, В.В. Буланин, А.С. Выков, Ф.В. Чернышев, Е.В. Демина, В.В. Дьяченко, Р.Р. Гончаров, А.Е. Городetsky, Е.З. Гусаков, А.Д. Иблямина, А.А. Иванов. *Nucl. Fusion*, **55**, 104016 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/10/104016
- [5] Н.Н. Бахарев, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, М.В. Ильясова, Е.О. Киселев, А.Н. Коновалов, Г.С. Курский, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, А.Н. Новохацкий, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Е.М. Хилькевич, Н.А. Хромов, Ф.В. Чернышев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, П.Б. Щёголев. *Физика плазмы*, **46** (7), 579 (2020). DOI: 10.31857/S036729212007001X [N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, V.V. Dyachenko, V.K. Gusev, M.V. Iliasova, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, A.D. Melnik, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tuxhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin. *Plasma Phys. Reports*, **46** (7), 675 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20070016]
- [6] А.Ю. Тельнова, В.Б. Минаев, Р.В. ШчегOLEV, Н.Н. Бакhareв, И.В. Шиховтсев, В.И. Варфоломеев. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1400**, 077015 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077015
- [7] Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов, В.М. Кулыгин, А.А. Панасенков. *Инжекторы быстрых атомов водорода* (Энергоиздат, М., 1981), 168 с.
- [8] М.Д. Габович, Н.В. Плешивцев, Н.Н. Семашко. *Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей* (Энергоатомиздат, М., 1986), 249 с.
- [9] А.Г. Барсуков. Автореф. канд. дисс. (РНИЦ „Курчатовский Институт“, М., 2005)
- [10] Я. Браун (ред.). *Физика и технологии источников ионов* (Мир, М., 1998) [I.G. Brown (Ed.) *The Physics and Technology of Ion Source* (Wiley, NY., 1989)]
- [11] Г.И. Федотов, Р.С. Ильин, Л.А. Новицкий, Г.Е. Зубарев, А.С. Гоменюк. *Лабораторные оптические приборы: учебное пособие для приборостроительных и машиностроительных вузов* (Машиностроение, М., 1979), 2 изд.
- [12] Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов, Г.Н. Тилинин. Сб. докл. 11-й Всерос. конф. по диагностике плазмы (Троицк, 2005)
- [13] П.Б. Щёголев, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, **4**, 79 (2012).