

02;04;12

## Комплекс нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М

© В.К. Гусев,<sup>1</sup> А.В. Деч,<sup>1</sup> Л.А. Есипов,<sup>1</sup> В.Б. Минаев,<sup>1</sup> А.Г. Барсуков,<sup>2</sup> Г.Б. Игонькина,<sup>2</sup> В.В. Кузнецов,<sup>2</sup> А.А. Панасенков,<sup>2</sup> М.М. Соколов,<sup>2</sup> Г.Н. Тилинин,<sup>2</sup> А.В. Лупин,<sup>3</sup> В.К. Марков<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Институт ядерного синтеза РНЦ „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,  
142190 Троицк, Московская область, Россия  
e-mail: Vladimir.Minaev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 30 января 2007 г.)

Проанализирована специфика применения метода нейтральной инжекции на небольших токамаках, в том числе на установках с малым аспектным отношением. Перечислены прототипы устройств, взятые за основу при создании комплекса нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М. Представлено детальное описание инжектора пучка атомов и систем, обеспечивающих его работу. Описаны способы измерения основных параметров пучка, применяемые на инжекторе токамака Глобус-М. Приведены характеристики атомных пучков, полученных с использованием источников ионов ИПМ-2 и ИПМ-1 во время стендовых испытаний и при работе в составе комплекса. Представлены данные о диапазоне рабочих параметров комплекса нейтральной инжекции и планах по его расширению.

PACS: 52.50.Gj, 52.59.Bi, 29.27.Ac

### Введение

Сферический токамак Глобус-М [1] был построен в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и введен в эксплуатацию в 1999 г. В установке в омическом режиме может генерироваться плазменный разряд со следующими основными параметрами: большой радиус  $R = 0.36$  м, малый радиус  $a = 0.24$  м, аспектное отношение  $R/a = 1.5$ , вертикальная вытянутость  $\kappa < 2.0$ , треугольность  $\delta < 0.45$ , тороидальное поле  $B_t < 0.5$  Т, ток по плазме  $I_p < 0.35$  МА, средняя плотность электронов  $n_e < 7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Для дополнительного нагрева плазмы в настоящее время используются два метода. Первый основан на поглощении ВЧ-волн на основной гармонике циклотронной частоты ионов водорода, присутствующих как добавка к дейтериевой плазме [1]. В качестве второго выбран метод инжекции пучков высокоэнергетичных атомов изотопов водорода. Применение метода нейтральной инжекции на малых токамаках сопряжено с трудностями согласования параметров плазмы-мишени и нейтрального пучка в условиях малых размеров мишени.

В сферических токамаках трудности возрастают из-за большой радиальной протяженности орбит быстрых частиц в низком магнитном поле. Так, в токамаке Глобус-М радиальная протяженность орбиты протона с энергией 30 кеВ на наружном обводе установки сравнима с малым радиусом токамака. Все это ужесточает требования к качеству фокусировки пучка и выбору параметров инжекции. Необходимо согласовать пара-

метры инжекции и плазмы-мишени таким образом, чтобы минимизировать потери от пролета пучка насквозь и от захвата частиц на „неудерживаемые“ орбиты и обеспечить удовлетворительное поглощение пучка для передачи энергии и импульса компонентам плазмы. Для выбора параметров инжекции и плазменного шнура были проведены предварительные численные расчеты по 1.5-мерному транспортному коду ASTRA [2].

За основу комплекса инжекционного нагрева токамака Глобус-М был взят инжектор установки Т-11, который работал в ИЯС РНЦ „Курчатовский институт“ с 1975 по 1983 гг. [3,4]. После перевода Т-11 в ТРИНИТИ его инжектор много лет не использовался в экспериментах. Для восстановления работоспособности инжектора потребовались существенная модернизация основного ионного источника ИПМ-1 [5] и замена его изоляторного узла. Для получения возможности изменять в экспериментах мощность вводимого пучка (при той же энергии частиц) было предложено использовать источник ИПМ-2, сохранившийся от инжекторов установки ОГРА-4 ИЯС, с вдвое меньшим током пучка. Применение этого источника потребовало ввода дополнительных сменных узлов в тракт транспортировки пучка инжектора. Наряду с работой по подготовке ионных источников потребовалось провести модернизацию системы электропитания инжектора и разработать новую автоматизированную систему управления и сбора данных. В конце 2002 г. были проведены первые эксперименты по инжекционному нагреву плазмы на сферическом токамаке Глобус-М [6].

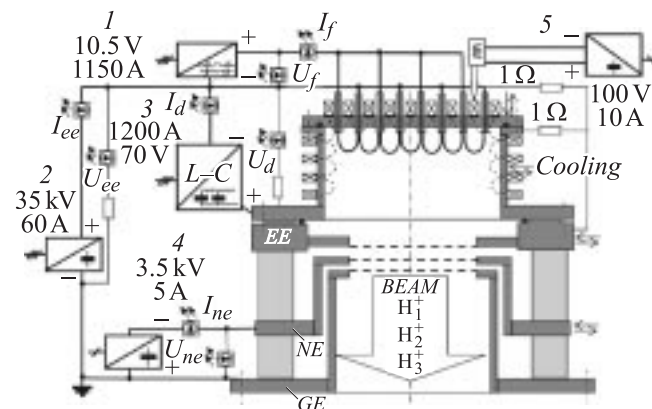
## 1. Комплекс нейтральной инжекции установки Глобус-М

Комплекс инжекции установки Глобус-М содержит инжектор быстрых атомов и обеспечивающие его работу системы: вакуумной откачки, электропитания, напуска рабочего газа, водяного охлаждения, управления и сбора данных. Инжектор является основным устройством для генерации и ввода в токамак мощного пучка атомов высокой энергии. Принцип получения пучка быстрых атомов основан на электростатическом ускорении и фокусировке пучка положительных ионов в ионном источнике и последующей перезарядке этого пучка на газовой мишени в пучок атомов. Комплекс нейтральной инжекции представляет собой автономную установку и позволяет независимо от токамака производить подготовку к работе, вывод на рабочий режим и измерения параметров атомного пучка.

Общий вид инжектора представлен на рис. 1. Основными узлами инжектора являются его корпус со встроенным криосорбционным насосом и ионный источник.

### 1.1. Ионный источник

В инжекторе установки Глобус-М применяются сильноточные ионные источники с периферийным магнитным полем ИПМ-1 или ИПМ-2 (рис. 2), разработанные

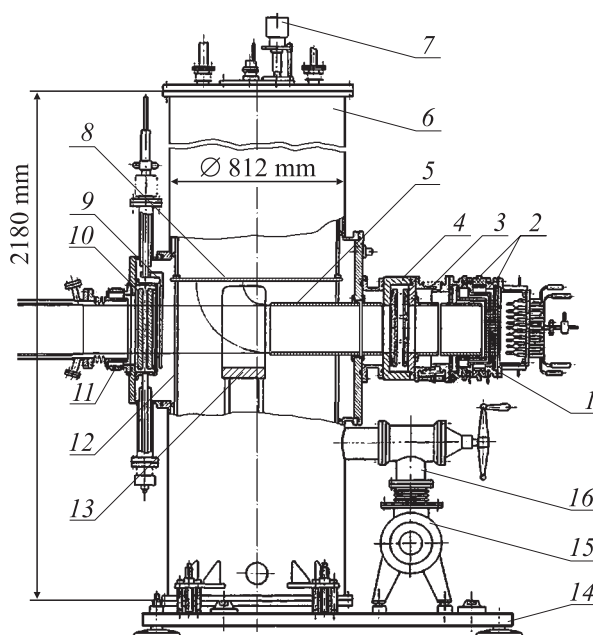


**Рис. 2.** Источник с периферийным магнитным полем. Источники питания: 1 — накал, 2 — эмиссионного электрода, 3 — разряда, 4 — отрицательного электрода, 5 — клапана напуска газа. EE — эмиссионный электрод, NE — отрицательный электрод, GE — земляной электрод.

в ИЯС в середине 1970-х гг. Положительные ионы вытягиваются и ускоряются сильным электрическим полем с поверхности газоразрядного плазменного эмиттера и формируют сфокусированный высокоэнергичный ионный пучок. Основными узлами ионного источника являются газоразрядная камера (ГРК); высоковольтный изоляторный узел (ВИУ) и ионно-оптическая система (ИОС). Характеристики источников представлены в табл. 1.

ГРК выполнена из нержавеющей стали (служит анодом дугового разряда), внутри нее установлены изолированные катодные „шпильки“. Камера ИПМ-1 имеет прямоугольное сечение с внутренним размером  $20 \times 33 \text{ см}^2$  (для ИПМ-2 —  $20 \times 28$ ) и глубину 13 см. Снаружи на боковых стенках и заднем торце камеры расположены ряды Ва–Fe постоянных магнитов, размещенных с шагом 26 мм (для ИПМ-2 шаг 32 мм) с чередующимися полюсами, направленными к стенке камеры. Система магнитов создает периферийное магнитное поле с линейными „каспами“ (так называемая магнитная стенка), напряженность которого вблизи внутренней поверхности ГРК составляет около 0.9 kGs напротив полюсов и 0.45 — между полюсами. Поле быстро спадает в глубь камеры и на расстоянии 4 см от стенки составляет менее 15 Gs. Периферийное магнитное поле экранирует камеру (анод) от газоразрядной плазмы, тем самым обеспечивая увеличение времени удержания электронов и ионов в разряде и повышает энергетическую эффективность разряда (по вытягиваемому ионному току) до 0.6–0.75 A/kW.

Несамостоятельный дуговой разряд в ГРК источника ИПМ-1 поддерживается эмиссией электронов с 18 (14 для ИПМ-2) катодных „шпилек“, изготовленных из вольфрамовой проволоки марки ВА диаметром 1 мм. Катоды расположены на задней торцевой крышке ГРК в два ряда и соединены параллельно снаружи камеры. Полная поверхность эмиссии составляет  $45 \text{ см}^2$  (38 для



**Рис. 1.** Инжектор установки Глобус-М: 1 — ионный источник; 2 — магнитные экраны; 3 — юстировочное устройство; 4 — шибер ионного источника; 5 — перезарядная труба; 6 — корпус инжектора; 7 — дуговой титановый испаритель; 8 — приемник ионов; 9 — приемник атомов; 10 — шибер инжектора; 11 — стыковочный узел; 12 — встроенный криосорбционный насос (азотит); 13 — отклоняющий электромагнит; 14 — откатная опорная плита; 15 — турбомолекулярный насос; 16 — вакуумный затвор.

Таблица 1. Проектные характеристики ионных источников

| Параметр  | Модель источника               |          |
|---|--------------------------------|----------|
|   | ИПМ-1                          | ИПМ-2    |
| Максимальная мощность пучка ионов, MW   | — водород                      | 1.0      |
|   | — дейтерий                     | 0.7      |
| Расход рабочего газа, $\text{m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{s}$   | 1.3                            | 0.7      |
| Максимальное ускоряющее напряжение, kV  | 30                             |          |
| Максимальное напряжение отрицательного электрода, kV  | 3.5                            | 3.0      |
| Максимальный ток ионного пучка на водороде, A   | 60                             | 35       |
| Максимальный ток ионного пучка на дейтерии, A   | 35                             | 25       |
| Газовая эффективность, %  | До 50                          |          |
| Размер газоразрядной камеры, $\text{cm}^3$  | 20×33×13                       | 20×28×13 |
| Размер эмиссионной поверхности, $\text{cm}^2$   | 12×25                          | 8×17.5   |
| Количество решеток в электродах   | 5                              | 3        |
| Прозрачность щелевой оптики, %  | 48                             |          |
| Фокусное расстояние, m  | — в горизонтальной плоскости   | 2.5      |
|   | — в вертикальной плоскости     | 2.5      |
| Угол расхождения пучка, degree  | — горизонтальный (вдоль щелей) | ±0.6     |
|   | — вертикальный (поперек щелей) | ±1.5     |
| Максимальная длительность импульса пучка, ms  | 50                             |          |
| Пауза между импульсами, s   | Не менее 60                    |          |
| Ток накала катодов, A   | 1200                           | 950      |
| Напряжение накала катодов, V  | 10.5                           |          |
| Ток разряда, A  | До 1300                        |          |
| Напряжение разряда, V   | До 70                          |          |
| Ток нагрузки отрицательного электрода, A  | До 5                           |          |
| Содержание компонентов $\text{H}_1^+ / \text{H}_2^+ / \text{H}_3^+$<br>(при плотности тока $0.4 \text{ A} / \text{cm}^2$ ), % | 75/18/7                        |          |

ИПМ-2). Подвод тока к катодам осуществляется через проходные керамические изоляторы. Нагрев одной „шпильки“ постоянным током около 65 A обеспечивает температуру катода до 3000 K. Суммарный ток канала достигает 1.2 kA (0.95 для ИПМ-2) при напряжении на вводах около 10.5 V. Система электропитания медленно устанавливает необходимый ток накала за счет плавного увеличения напряжения в течение 4–6 s. Ресурс работы катодных „шпилек“ составляет примерно 4000 импульсов. В качестве рабочего газа в ионном источнике используется водород или дейтерий. Максимальный ток разряда составляет 1.3 kA при напряжении 55–70 V. При этом на выходном торце ГРК источника ИПМ-1 на площади  $12 \times 25 \text{ cm}^2$  ( $10 \times 20$  для ИПМ-2) создается однородная (неоднородность менее 10%) плазма, обеспечивающая плотность эмиссионного тока положительных ионов до  $0.5 \text{ A} / \text{cm}^2$ . При такой плотности эмиссионного тока содержание компонента  $\text{H}_1^+$  в ионном пучке достигает 80%. Часть ионного тока составляют молекулярные ионы  $\text{H}_2^+$  и  $\text{H}_3^+$ , которые после перезарядки и диссоциации на газовой мишени превращаются в атомы с энергией 1/2 и 1/3 от энергии основного атомного пучка.

В рабочем режиме ионного источника все элементы ГРК находятся под высоким потенциалом. Между элементами разрядной камеры и фланцем эмиссионного

электрода ИОС (см. ниже) установлены низкоомные резисторы ( $\sim 1 \Omega$ ) для выравнивания потенциалов в момент возникновения высоковольтного пробоя в ИОС. Эмиссионный электрод (ЭЭ) находится под плавающим потенциалом относительно катода и анода ГРК с целью повышения однородности разряда. Во время разряда его потенциал относительно катода близок к 1/2 потенциала анода.

ВИУ предназначен для крепления электродов ИОС. Три металлических фланца ВИУ и два прямоугольных керамических изолятора склеены между собой с помощью эпоксидного компаунда, образуя единый вакуумно-плотный блок. Решетки ЭЭ установлены непосредственно на эмиссионном фланце ВИУ. Решетки двух других электродов установлены внутри ВИУ с помощью металлических подставок, закрепленных на соответствующих фланцах. Электроды охлаждаются за счет отвода тепла от охлаждаемых водой фланцев.

Извлечение и формирование пучка ионов обеспечивается многощелевой ионно-оптической системой. ИОС состоит из трех электродов — эмиссионного, отрицательного (ОЭ) и заземленного (ЗЭ). Первый (плазменный, эмиссионный) электрод закрывает торец ГРК и отделен от нее изоляторной рамкой-проставкой. Электрически ЭЭ соединен с ГРК указанными выше низкоомными резисторами. На щелях этого электрода электроды

трическое поле, созданное в зазоре между первой парой электродов, формирует плазменный эмиттер и извлекает поток ионов. Второй (промежуточный, фокусирующий) электрод, находящийся под отрицательным потенциалом, позволяет обеспечить оптимальную фокусировку отдельных ионных пучков, выходящих из щелей ЭЭ, а также служит для запыриания обратного потока электронов из вторичной плазмы, создаваемой в нейтрализаторе выходящим ионным пучком. Третий электрод коротко заземлен на корпус инжектора и обеспечивает „нулевой потенциал“ выходящего ионного пучка.

На каждом электроде ИПМ-1 имеется по пять 12-щелевых (по три 14-щелевых для ИПМ-2) профилированных решеток толщиной 1 мм из молибденового сплава. Ширина каждой щели в ЭЭ составляет 2, в ОЭ — 2.5 и в ЗЭ — 3 мм при длине 120 мм (80 для ИПМ-2). Полная эмиссионная поверхность (площадь щелей) составляет 144 см<sup>2</sup> (67 для ИПМ-2). Эмиссионный электрод в ИПМ-1 имеет размеры 12 × 25 см<sup>2</sup>, в ИПМ-2 — 8 × 18 см<sup>2</sup>. Прозрачность ИОС в обоих источниках равна 48%. Величина ускоряющего промежутка между решетками ЭЭ и ОЭ составляет 4 (ИПМ-1) и 3.5 мм (ИПМ-2). Зазор между ОЭ и ЗЭ равен 2.5 мм.

ИОС также обеспечивает общую фокусировку пучка в двух направлениях. Решетки эмиссионного и отрицательного электродов ИПМ-1 изогнуты вдоль щелей с радиусом кривизны около 3 м (в ИПМ-2 — 2.5). Этим обеспечивается фокусировка пучка в горизонтальной плоскости. В источнике ИПМ-1 решетки ОЭ сдвинуты по отношению к соответствующим решеткам ЭЭ в вертикальном направлении относительно средней плоскости (соответственно вверх и вниз на 0.13 мм — для 2-й, 4-й решеток и на 0.26 мм — для 1-й, 5-й решеток относительно центральной 3-й решетки). Это создает небольшой проворот осей пучков отдельных решеток в направлении поперек щелей к оси ионного источника, что обеспечивает фокусное расстояние около 3.5 м в вертикальной плоскости. Аналогичным образом в источнике ИПМ-2 крайние решетки смещены на ±0.2 мм по отношению к центральной и задают фокусное расстояние 2.5 м в вертикальной плоскости.

## 1.2. Корпус инжектора и тракт пучка

Корпус является основным конструктивным элементом инжектора, в котором расположены устройства для преобразования ионного пучка, создаваемого в источнике, в атомный и его последующей транспортировки к входному патрубку токамака. В корпусе также расположен ряд вспомогательных устройств для формирования и измерения параметров пучка. Для предотвращения выброса газа в камеру токамака во время импульса инжектора в его корпусе смонтирован мощный криосорбционный вакуумный насос. Корпус инжектора представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 0.8 и высотой 2.2 м. Большой буферный объем вакуумной камеры позволяет поддерживать давление в

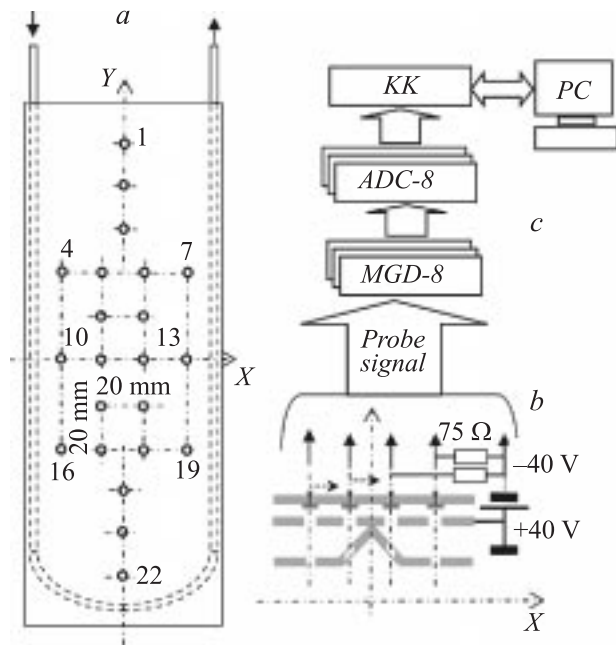
течение импульса инжекции на уровне не более 10<sup>-2</sup> Па даже приотсутствии высокопроизводительной откачки. Корпус установлен на откатной плите на регулируемых опорах для юстировки инжектора.

Нейтрализатор (камера перезарядки) состоит из перезарядной трубы и магнитных экранов, расположенных внутри ионного источника и внутри шибера (общая длина 80 см). Перезарядная труба и магнитные экраны представляют собой единую конструкцию в виде коробки прямоугольного сечения из магнитомягкого железа (13 × 28 см<sup>2</sup> для ИПМ-1), покрытого изнутри тонким листом из нержавеющей стали. При использовании ИПМ-2 внутри перезарядной трубы устанавливается уменьшающий проходное сечение медный вкладыш сечением 10 × 22 см<sup>2</sup>, а магнитный экран внутри ионного источника имеет сечение 9 × 22 см<sup>2</sup>. Стальные стенки нейтрализатора служат магнитным экраном от воздействия рассеянных полей токамака на ионы пучка. В нейтрализаторе происходит преобразование пучка быстрых ионов в пучок атомов на избыточном газе, вытекающем из ионного источника. Это преобразование является результатом установления динамического равновесия между процессом перезарядки ионов в атомы на газовой мишени и обратным процессом обдирки образующихся при нейтрализации быстрых атомов. Давление рабочего газа в нейтрализаторе и его длина рассчитаны на равновесный выход нейтрального компонента пучка. Толщина газовой мишени составляет примерно 5 · 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>.

Отклоняющий электромагнит выводит непerezарядившиеся ионы из направляемого в токамак пучка быстрых атомов, отклоняя их на угол около 90°. Электромагнит помещен в откачиваемый вакуумный кожух из нержавеющей стали и установлен на юстировочном столе. Зазор между полюсами магнита 10.5 см, а между стенками кожуха — 8.5 см. Величина поля электромагнита выбирается на уровне 900–1500 Гс в зависимости от рода газа и энергии частиц.

Приемник атомов (подвижный) предназначен для контроля параметров пучка, созданного инжектором. Во время измерений он перекрывает тракт пучка на расстоянии 1.5 м от ионного источника. Конструкция приемника показана на рис. 3. Приемник состоит из трех расположенных друг за другом изолированных металлических пластин. Первые две медные пластины имеют соосные отверстия  $\varnothing$  3 мм. Молибденовые вторично-эмиссионные зонды (22 штуки) установлены напротив отверстий на третьей пластине через изоляторы. Первая пластина приемника имеет V-образную форму для снижения тепловой нагрузки и охлаждается водой, что позволяет проводить калориметрические измерения энергии, выделяемой пучком в пластине за импульс. Перед приемником пучка расположена ограничительная диафрагма с овальным отверстием 8 × 24 см, отсекающая периферийную часть атомного пучка, которая не может пройти в патрубок токамака.

Приемник ионов (неподвижный) — медная пластина, расположенная над отклоняющим электромагнитом (крепится к азотиту и охлаждается вместе с



**Рис. 3.** Схема измерений профиля атомного (ионного) пучка: *a* — размещение зондов на приемнике атомов, *b* — схема измерений зондовых сигналов, *c* — структура измерительного канала. *PC* — компьютер, *KK* — контролер крейта, *ADC* — АЦП, *MGD* — модуль гальванических развязок.

ним), — предназначен для поглощения неперезарядившихся ионов, выведенных электромагнитом из пучка.

Прходной шибер ионного источника ( $13 \times 28 \text{ cm}^2$ ) отсекает ионный источник от вакуумной камеры инжектора. Имеет электрический привод с пневматическим механизмом уплотнения.

Юстировочное устройство ионного источника — два фланца, связанные между собой сильфоном большого диаметра и четырьмя регулировочными шпильками, — позволяет корректировать направление оси инжекции в пределах  $\pm 3^\circ$  в вертикальном и горизонтальном направлениях, компенсируя неточности сборки ионного источника, в особенности его ИОС. Устройство установлено между ионным источником и его шибером.

Прходной шибер инжектора ( $9 \times 26 \text{ cm}$ ) обеспечивает разделение вакуумных объемов инжектора и камеры токамака и позволяет проводить режим автономной наладки и тренировки инжектора. Имеет механический привод с пневматическим механизмом уплотнения. Его проходное сечение меньше, чем у шибера ионного источника, поскольку атомный пучок уже частично сфокусирован к моменту прохождения через шибер инжектора.

Стыковочный узел предназначен для гальванической и механической развязки инжектора и токамака. Он состоит из проходного керамического изолятора из оксида алюминия диаметром 30 см и сильфонного компенсатора. Узел присоединен к инжектору и входному патрубку токамака (имеет овальную форму и размеры  $8.5 \times 24.5 \text{ cm}$ ) с помощью фланцевых соединений.

Дуговой испаритель титана предназначен для напыления титановой пленки на поверхности криосорбционного насоса. Титан расплывается с помощью вакуумной дуги, горящей в парах материала катода (титановый диск). Полученная таким образом титановая пленка является мощным геттером. Коэффициент прилипания водорода около 10%. Анодом вакуумной дуги служит азотит и корпус инжектора.

Встроенный криосорбционный насос (азотит) представляет собой герметичную полую цилиндрическую емкость с выводами в атмосферу для заливки и испарения жидкого азота, размещенную внутри корпуса инжектора. Скорость азотитной откачки определяется состоянием напыленной на его поверхность титановой пленки. Сразу после напыления азотит способен откачивать водород со скоростью до  $10^5 \text{ l/s}$ . Емкость покрытия такова, что при реальных нагрузках работающего инжектора —  $0.6\text{--}1.3 \text{ cm}^3$  газа за импульс — необходимо обновлять напыление титана после каждого импульса. Жидкий азот заливается по мере испарения (два-три раза в сутки). Для обезгаживания азотита после пребывания в атмосфере на его внешней поверхности смонтирован нагреватель, обеспечивающий прогрев стенок до  $150^\circ\text{C}$ .

При работе ионного источника давление в объеме инжектора повышается за счет импульсного впрыска рабочего газа в источник и достигает на входе в камеру перезарядки  $2 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$ . Пучок, состоящий из быстрых атомов и ионов, после выхода из камеры перезарядки продолжает взаимодействовать с вытекающим из нее рабочим газом. Чтобы минимизировать потери при транспортировке пучка в камеру токамака, необходимо обеспечивать как можно более низкое давление газа на его пути. Этой цели как раз и служат большой буферный объем камеры инжектора и азотитная откачка. Быстрое расширение вытекающего из нейтрализатора рабочего газа позволяет снизить давление до уровня  $10^{-2} \text{ Pa}$  в течение импульса инжекции. Применение азотитной откачки обеспечивает еще более низкий уровень давления во время импульса — не хуже  $10^{-3} \text{ Pa}$ .

### 1.3. Система напуска рабочего газа

Газонапускная система предназначена для дозированной подачи газа в ГРК ионного источника. Она включает импульсный электромагнитный клапан, совмещенный с игольчатым натекателем, два буферных объема (по 5 л каждый) с рабочими газами (водород и дейтерий), оборудованных манометрами и соответственно два баллона с запасом рабочих газов, оборудованных редукторами. Имеется система вентиля для оперативной замены рабочего газа и прокачки газовых магистралей. Во время работы инжектора импульсный клапан находится под высоким потенциалом. Газ поступает к клапану через фторопластовый шланг, чем обеспечивается высоковольтная развязка между клапаном и буферным объемом. Держатель электромагнита клапана и его подвижный шток выполнены из органического стекла для обеспечения высоковольтной изоляции электромагнита от рабочей

части клапана. Схема питания электромагнита находится под низким потенциалом.

Давление рабочего газа в буферном объеме во время работы поддерживается на уровне примерно 0.2 МПа. Расход газа регулируется натекателем в диапазоне до  $2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ . Рабочий газ должен иметь максимально возможную степень очистки, так как это непосредственно влияет на чистоту инжектируемого в токамак пучка. С этой целью трубки и буферные объемы ГНС предварительно откачиваются и прогреваются.

#### 1.4. Базовая система вакуумной откачки

Система вакуумной откачки предназначена для создания и поддержания базового уровня давления (до  $10^{-4} \text{ Па}$ ) в камере инжектора. Высоковакуумная откачка инжектора осуществляется турбомолекулярным насосом ТМН-1000 с двухступенчатым форвакуумным насосом АВР-50 на выхлопе. На входе форнасоса установлена охлаждаемая жидким азотом ловушка паров масла. Скорость высоковакуумной откачки в зоне откачного патрубка корпуса инжектора (с учетом параметров откачного тракта) составляет около 100 л/с. Объем ионного источника отделен от основного вакуумного инжектора шибером и оборудован независимым трактом высоковакуумной откачки. Это позволяет производить обслуживание или замену источника при сохранении высокого вакуума в корпусе инжектора. Для контроля вакуумных условий в камере инжектора и на форвакуумной линии установлены монотрические преобразователи. Напомним, что в рабочем режиме инжектора основная откачка потока газа из ионного источника обеспечивается азотитом.

#### 1.5. Система водяного охлаждения

Система охлаждения предназначена для отвода тепла от теплонапряженных узлов и устройств инжектора, а также блоков электропитания. Она построена по двухконтурной схеме с замкнутым первичным контуром с дистиллированной водой. К инжектору вода подается специальным насосом из теплообменника объемом около  $0.2 \text{ м}^3$  под давлением до 6 атм. В подающие водяные магистрали вмонтированы водяные реле, блокирующие работу ионного источника и дугового испарителя в случае отсутствия воды. Охлаждение вторичной обмотки накального трансформатора, выпрямителя накала и ЭЭ ионного источника, а также ОЭ ионного источника осуществляется через водяные дроссели, выполненные из изолирующего материала для исключения возможности высоковольтного (ВВ) пробоя по охлаждающей воде. Во вторичном контуре используется техническая вода из городской системы водоснабжения.

#### 1.6. Система электропитания

Система электропитания инжектора установки Глобус-М (рис. 4) является модифицированным вариантом

системы электропитания инжектора установки Т-11. При модернизации были учтены требования по автоматизации сбора информации и частично по автоматизации управления инжектором. Система электропитания инжектора содержит следующие устройства и блоки: устройство питания накала катодов, формирующую линию питания разряда, устройство питания эмиссионного электрода ионного источника, устройство питания отрицательного электрода ионного источника, блок питания газового клапана, блок питания дугового испарителя, выпрямитель питания отклоняющего электромагнита, блок питания нагревателя азотита.

Главной особенностью системы электропитания инжектора является то, что устройство питания накала катодов и формирующая линия питания разряда во время работы инжектора находятся под высоким потенциалом (до 30 кВ), подаваемым от устройства питания эмиссионного электрода на „общую точку“ системы питания ГРК, где „минус“ накала катодов соединен с „минусом“ питания разряда. Изоляция этих устройств от „земли“ должна быть не менее, чем на 40 кВ. В свою очередь, „минус“ питания эмиссионного электрода и „плюс“ питания отрицательного электрода подключены в одной точке к корпусу инжектора, а сам корпус заземлен. „Минус“ от устройства питания отрицательного электрода подается непосредственно на ввод ОЭ.

Работа устройств электропитания, накала и разряда ионного источника, а также газового клапана осуществляется в импульсном режиме: длительность импульса разряда составляет 30, клапана 40–60 мс. Накал включается за 6–9 с до начала разряда и отключается вместе с ним. Пауза между импульсами инжектора составляет 2–6 мин.

Электропитание накала катодов обеспечивает импульсный нагрев катодов мощностью до 12 кВт. Схема собрана на основе разделительного понижающего трансформатора Т13 (25 В, 1500 А) с двумя вторичными обмотками — звезда и треугольник, — нагруженного на выпрямитель UZ13. Вторичные обмотки трансформатора и диоды выпрямителя охлаждаются водой. Сетевое питание (380 В) подается на трансформатор через магнитный усилитель МУ1. Усилитель за счет обмоток подмагничивания позволяет в течение импульса плавно наращивать напряжение, подаваемое на катоды ионного источника. Выпрямитель UZ13 состоит из двух диодных выпрямителей, собранных по схеме Ларионова и включенных параллельно. На выходе выпрямителя установлена индуктивность (около  $50 \mu\text{H}$ ) для сглаживания пульсаций и конденсатор для защиты диодов при высоковольтных пробоях в ионном источнике. Каждая из первичных и вторичных обмоток накального трансформатора Т13 защищена RC-цепочками.

Устройство питания накала включено постоянно. В паузе между импульсами поддерживается дежурный уровень накала: ток 100 А при напряжении около 0.5 В. Во время импульса ток накала достигает 1200 А (960 для ИПМ-2) при напряжении до 11 В.

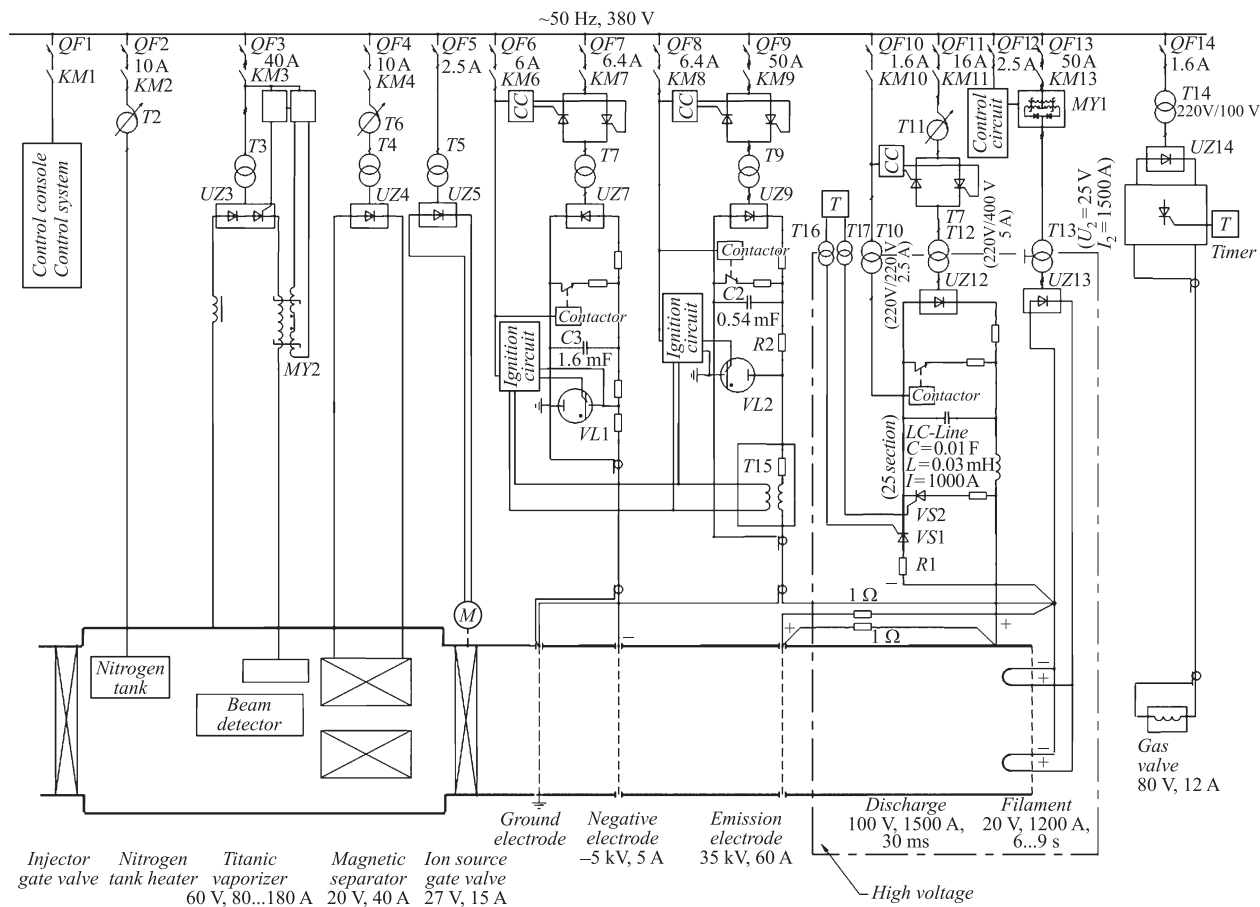


Рис. 4. Система электропитания инжектора установки Глобус-М.

Устройство электропитания разряда выполнено в виде изолированной от „земли“ на 40 kV формирующей LC-линии (25 ячеек по  $L = 30 \mu\text{H}$  и  $C = 0.01 \text{ F}$ ) с тиристорной коммутацией. Ток разряда задается в пределах 300–1500 A за счет уровня зарядного напряжения линии. Зарядка линии осуществляется от сети 220 V в паузе между импульсами через разделительный трансформатор T12 выпрямителем UZ12 до заданного уровня (не более 300 V). Уровень напряжения на LC-линии задается и поддерживается схемой автоматического управления зарядкой (АУЗ). Текущее значение напряжения формирующей линии передается по оптоволоконному каналу. Задающим устройством АУЗ является контактный стрелочный прибор, установленный на пульте управления. Исполнительным органом АУЗ служит тиристорный ключ, установленный в цепи трансформатора T12. Скорость зарядки может регулироваться с помощью автотрансформатора. Напряжение зарядки линии параллельно контролируется стрелочным прибором, находящимся под высоким потенциалом.

Начало и конец разряда задаются таймером, который через разделительные трансформаторы подает импульсы для запуска тиристоров VS1, VS2, находящихся под высоким потенциалом. Балластное сопротивление на

выходе LC-линии корректирует форму импульса и повышает стабильность тока разряда в ионном источнике.

Электропитание эмиссионного электрода обеспечивает подачу ускоряющего напряжения до 30 kV на ионный источник. Основным элементом является конденсаторный накопитель емкостью 540  $\mu\text{F}$ . Зарядка накопителя осуществляется в паузе между импульсами от сети 380 V через силовой масляный высоковольтный трансформатор T9 и выпрямитель UZ9. Уровень напряжения зарядки накопителя устанавливается с пульта управления и автоматически поддерживается схемой АУЗ, аналогичной схеме разряда. Накопитель изолирован от конструкций и подключен к „земле“ инжектора в одной точке по изолированной оплетке ВВ кабеля, питающего эмиссионный электрод. В зависимости от тока нагрузки за время рабочего импульса накопитель разряжается на 1–2 kV.

Для защиты ИОС от высоковольтных пробоев, происходящих между ее электродами, в схеме питания ЭЭ установлен вакуумный разрядник РВУ-47, который запускается сигналом с воздушного трансформатора в цепи ЭЭ. Сигнал вторичной обмотки воздушного трансформатора (уровень 1–2 kV в момент пробоя) поступает на схему поджига разрядника, после чего происходит

разрядка емкостного накопителя в обход ионного источника. В цепи разрядника установлено нагрузочное сопротивление  $1.5 \Omega$ , рассчитанное на полное энерговыделение накопителя.

При проведении высоковольтной тренировки ионного источника вместо основного накопителя применяется „тренировочная“ емкость  $3 \mu\text{F}$ . Запас энергии в ней мал, и потому безопасен для ИОС ионного источника при возникновении ВВ пробоя. Более того, эта энергия способствует очистке электродов ИОС.

Для подачи высокого отрицательного потенциала величиной до  $5 \text{ kV}$  на отрицательный электрод используется емкостной накопитель  $1600 \mu\text{F}$ . Зарядка накопителя от сети  $220 \text{ V}$  осуществляется через трансформатор Т7 и выпрямитель UZ7. Схема автоматического управления зарядом накопителя, схема поджига вакуумного разрядника (РВУ-40, срабатывающего при пробоях в ионном источнике), а также схемы измерения тока и напряжения ОЭ выполнены аналогично соответствующим схемам питания эмиссионного электрода. Отрицательное напряжение на ОЭ составляет по величине приблизительно 10% от напряжения на ЭЭ. За время рабочего импульса инжекции накопитель разряжается на  $0.1\text{--}0.3 \text{ kV}$ .

Для оперативного снятия напряжения с LC-линии разряда и емкостных накопителей ЭЭ и ОЭ соответствующие цепи оснащены управляемыми дистанционно электромагнитными короткозамыкателями.

Для электропитания импульсного электромагнитного газового клапана ионного источника служит устройство, состоящее из емкостного накопителя и тиристорного ключа двойного действия. На обмотку электромагнита клапана подается импульс тока  $12 \text{ A}$ ,  $80 \text{ V}$ . Время открытия и закрытия клапана составляет около  $15 \text{ ms}$ .

Электропитание дугового испарителя осуществляется от трехфазной сети  $380/220 \text{ V}$ . На дуговой испаритель подается постоянный стабилизированный ток, регулируемый в пределах  $80\text{--}180 \text{ A}$ . Напряжение поджига дуги — не менее  $60 \text{ V}$ , напряжение горения дуги —  $20\text{--}25 \text{ V}$ . Силовая схема питания испарителя состоит из трехфазного магнитного усилителя МУ2, трансформатора и выпрямителя UZ3, собранного по схеме Ларионова. На выходе выпрямителя стоит сглаживающий конденсатор и защитный дроссель, обеспечивающий стабильное горение дуги. Метод поджига дуги требует, чтобы в начальный момент весь ток выпрямителя протекал через поджигающий электрод, в этот период напряжение нагрузки близко к нулю. В момент поджига на дросселе появляется высокое напряжение, позволяющее перехватить дугу на корпус азотита.

Электропитание отклоняющего электромагнита осуществляется с помощью однофазного регулятора напряжения Т6, понижающего трансформатора Т4 и выпрямителя UZ4. Необходимые значения тока ( $30\text{--}60 \text{ A}$ ) электромагнита выставляются перед началом работы.

Для прогрева азотита используется однофазный регулятор напряжения Т2. Рабочее напряжение около  $100 \text{ V}$ . Прогрев ведется в течение нескольких часов с контролем вакуумных условий.

## 1.7. Система управления и сбора данных

Для инжектора Глобус-М была разработана новая система управления и сбора данных. Она позволяет дистанционно (из пультовой) управлять технологическими процессами подготовки и работы инжектора и осуществляет автоматизированный сбор информации о работе его систем. Она включает в себя подсистемы релейного управления, ввода уставок, сбора аналоговой информации, таймирования, визуального контроля параметров.

Релейное управление (выдача релейных команд и сбор релейных сигналов) осуществляется с пульта инжектора с помощью блока управления. Этот блок выполнен в стандарте КАМАК на основе реле, содержит кнопки и информационные светодиоды. Он позволяет дистанционно управлять электротехническими коммутационными устройствами и контролировать состояние оборудования, описанного выше. С его помощью можно непосредственно управлять инжектором в ручном режиме. Для работы в автоматизированном режиме этот блок оборудован внешними разъемами сопряжения с программно управляемыми модулями. В этом случае команды управления подаются на блок с компьютера, а на компьютер поступает информация о состоянии инжектора.

Нормальная работа инжектора требует обеспечения дистанционного управления зарядкой накопительных устройств: формирующей линии разряда, емкостных накопителей эмиссионного и отрицательных электродов. Кроме того, необходимо заранее установить требуемый уровень напряжения накала катодов в импульсе.

Ввод и контроль уставок (необходимых уровней) напряжений зарядки емкостных накопителей осуществляется с пульта управления вручную при помощи электроизмерительных контактных приборов. Такой прибор позволяет измерять и регулировать величину выставляемого напряжения. В состав прибора входит контактное устройство, которое непосредственно управляет зарядкой соответствующего емкостного накопителя. Уставки токов управления магнитным усилителем для питания накала катодов вводятся вручную с указанного выше блока управления.

Подсистема таймирования обеспечивает включение и отключение импульсных систем питания ионного источника согласно заданной временной диаграмме (рис. 5). Временное согласование импульсов накала, газового клапана и разряда существенно влияет на параметры газового разряда. Таймер выполнен в виде платы для шины PCI и установлен в компьютере. Он позволяет программно вводить необходимые временные задержки и вырабатывать соответствующие синхроимпульсы, в том числе для запуска подсистемы сбора данных. Таймер обеспечивает как автономную работу инжектора, так и совместную работу с токамаком. Сигналы уровня TTL из компьютера преобразуются усилителями-формирователями в положительные импульсы фиксированной длительности  $20 \mu\text{s}$  и уровня  $10 \text{ V}$  (на нагрузке  $50 \Omega$ ).



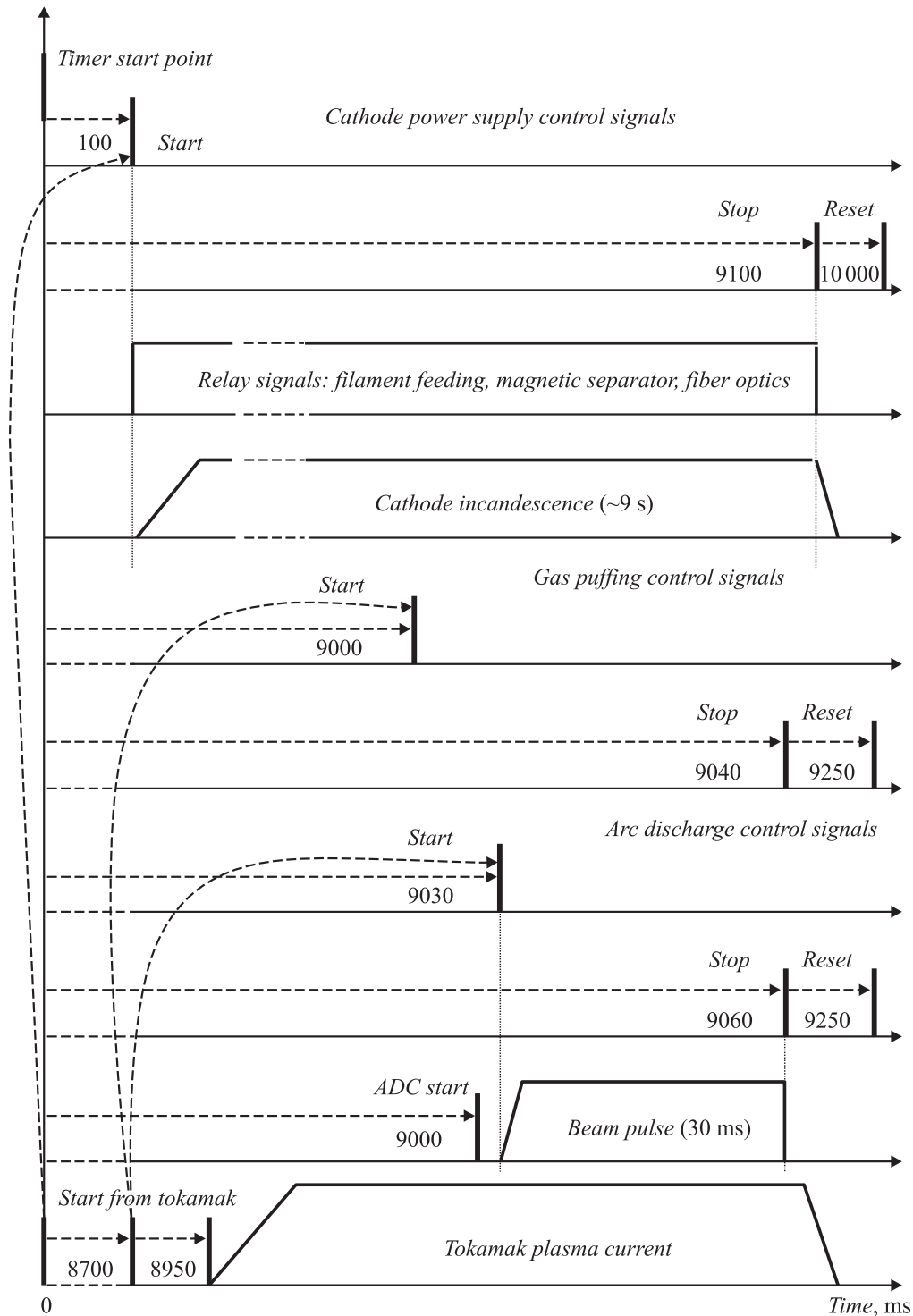


Рис. 5. Временная диаграмма работы инжектора.

Подсистема автоматизированного сбора аналоговой информации позволяет контролировать, обрабатывать и архивировать данные о работе основных систем инжектора, включая зондовые измерения параметров выходного пучка. Она состоит из набора датчиков измеряемых сигналов, комплекта волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), крейтов КАМАК, оборудован-

ных крейт-контроллерами (КК), модулями гальванической развязки (МГР-8), модулями аналого-цифровых преобразователей (АЦП), а также двух компьютеров (РС), связанных между собой через локальную сеть.

Комплект ВОЛС состоит из двух четырехканальных приемников в стандарте КАМАК, пластиковых волоконных кабелей и восьми передатчиков с аккумуляторным

Таблица 2. Быстрые аналоговые сигналы

| №    | Наименование сигнала | Диапазон измерений | Потенциал точки измерения | Датчик сигнала      |
|------|----------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|
| 1    | Ток разряда          | 0–1500 А           | Высокий*                  | Шунт                |
| 2    | Напряжение разряда   | 0–100 V            | То же                     | Делитель напряжения |
| 3    | Напряжение на ЭЭ     | 0–40 kV            | "                         | То же               |
| 4    | Ток ЭЭ               | 0–70 А             | "                         | Шунт                |
| 5    | Напряжение на ОЭ     | 0–5 kV             | Общая точка инжектора     | Делитель напряжения |
| 6    | Ток ОЭ               | 0–5 А              | То же                     | Шунт                |
| 7    | Напряжение накала    | 0–25 V             | Высокий*                  | Делитель напряжения |
| 8    | Ток накала           | 0–1200 А           | То же                     | Шунт                |
| 9–30 | Ток с зонда          | 0–30 mA            | < 100 V                   | Шунт 75 Ω           |

\* Точка измерений находится под потенциалом эмиссионного электрода.

Таблица 3. Медленные аналоговые сигналы

| №   | Наименование сигнала                         | Диапазон измерений     | Потенциал точки измерения | Датчик сигнала            |
|-----|--|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1   | Давление в инжекторе                         | $10^{-8} - 10^{-2}$ Pa | Общая точка инжектора     | Определяется вакуумметром |
| 2   | Давление в источнике                         | $10^{-6} - 10^{-2}$ Pa | То же                     | То же                     |
| 3   | Напряжение накала                            | 0–25 V                 | Высокий*                  | Делитель напряжения       |
| 4   | Ток накала                                   | 0–1200 А               | То же                     | Шунт                      |
| 5–7 | Ток подмагничивания МУ                       | До 1 А                 | Общая точка инжектора     | Обмотка управления МУ     |
| 8   | Напряжение на LC-линии                       | 0–400 V                | Высокий*                  | Делитель напряжения       |
| 9   | Напряжение на батарее ЭЭ                     | 0–40 kV                | Общая точка инжектора     | То же                     |
| 10  | Напряжение на батарее ОЭ                     | 0–5 kV                 | То же                     | "                         |
| 11  | Напряжение питания электромагнита сепаратора | 0–20 V                 | "                         | "                         |
| 12  | Ток дуги азотита                             | 0–200 А                | "                         | Шунт                      |
| 13  | Напряжение дуги азотита                      | 0–100 V                | "                         | Делитель напряжения       |

\* Точка измерений находится под потенциалом эмиссионного электрода.

питанием. Питание передатчиков включается только на время измерений по дополнительным волоконным кабелям. Уровень входных сигналов  $\pm 100$  mV или  $\pm 1$  V. На входе каждого передатчика установлен согласующий делитель напряжения. Волоконные кабели обеспечивают высоковольтную развязку измеряемых сигналов. Схема подключения ВОЛС для измерений параметров устройств электропитания накала катодов, разряда, эмиссионного электрода и отрицательного электрода ионного источника показана на рис. 2.

Модули МГР-8 выполнены в стандарте КАМАК. Каждый модуль имеет восемь каналов передачи сигналов с частотной полосой 30 kHz. Развязка каждого канала между входом и выходом составляет 1.0 kV. Между собой входные и выходные сигналы соответственно не развязаны и имеют общие точки по питанию. Уровень входных сигналов  $\pm 5$  V (выходной шум  $\pm 5$  mV/500 kHz,  $R_{out}$  не менее 1 kΩ,  $R_{in} = 200$  kΩ). МГР-8 имеет разъем для подачи напряжения смещения 40 V и встроенные нагрузочные сопротивления 75 Ω, подключаемые соответствующими переключателями при проведении зондовых измерений.

Измеряемые аналоговые сигналы в зависимости от необходимой частоты их опроса разделяются на два типа: быстрые (частота опроса 10 kHz, табл. 2) и мед-

ленные (частота опроса 100 Hz, табл. 3). Измерения быстрых сигналов производятся средствами автоматизации (датчик–ВОЛС или МГР–АЦП–КК–РС) в течение рабочего импульса, после чего сигналы выводятся на мониторы компьютеров. Все измеряемые сигналы гальванически развязаны от „земли“ инжектора. Измерения с потенциала „земли“ осуществляются через МГР, с высокого потенциала — через ВОЛС. Медленные сигналы в настоящее время измеряются стрелочными приборами, устройства для автоматизации разрабатываются. Информация с находящихся под высоким потенциалом стрелочных приборов (пп. 3, 4, 8, 9 в табл. 3) выводится на монитор пульта управления через видеокамеру. Приборы, измеряющие сигналы с потенциала „земли“, дублируются на пульте управления. Термобатарей для калориметрических измерений энерговыделения на приемнике атомов на настоящий момент отсутствуют.

## 2. Технологическая подготовка инжектора

Технологическая подготовка инжектора к плазменным экспериментам является необходимым этапом работы по подготовке инжектора после проведения профилактического обслуживания или ремонта отдельных узлов,

связанных с развакуумированием инжектора. Чаще всего такая необходимость возникает после замены катодных „шпилек“ в ионном источнике или смены источника целиком.

## 2.1. Вакуумная подготовка инжектора

После герметизации вскрывавшийся объем (ионный источник или корпус инжектора) откачивается до давления не хуже  $10^{-2}$  Па. После этого производится выравнивание давления в объемах и открывается шибер ионного источника. Необходимым условием работы ионного источника является обеспечение в нем фонового давления  $10^{-3}$  Па и давления в остальном объеме инжектора порядка  $10^{-4}$  Па. Эти уровни давления обеспечиваются базовой системой высоковакуумной откачки.

При попадании „атмосферы“ в корпус инжектора, а также если обнаружено снижение эффективности работы криосорбционной откачки, производится прогрев азотита в течение нескольких десятков часов до  $150^{\circ}\text{C}$  для его дегазации.

Для обеспечения чистоты подаваемого в ионный источник рабочего газа (после вскрытия или длительной остановки) производится прокачка подводящих трубок системы газонапуска до давления  $10^{-1}$  Па.

## 2.2. Тренировка накалом и разрядом ионного источника

Тренировка накалом и разрядом ионного источника — необходимая начальная технологическая операция при получении пучка. В результате нее происходит прогрев и обезгаживание поверхностей катода и анода, что необходимо для формирования однородного плазменного эмиттера дугового типа в ГРК ионного источника. Тренировка ведется в циклическом режиме. Необходимые временные задержки устанавливаются для соответствующих каналов, как и в рабочем цикле, согласно диаграмме (рис. 5). Расход газа проверяется по приросту давления в камере инжектора при заданной длительности газового импульса и регулируется игольчатым натекателем импульсного клапана.

Тренировка накалом заключается в постепенном, от импульса к импульсу, увеличении мощности накала с контролем тока и напряжения накала и величины газовой выделенности из источника. Тренировка ведется с уровня  $1.0\text{ V}$  до номинального рабочего напряжения  $10.5\text{ V}$  с шагом около  $1\text{ V}$ . Процесс обезгаживания прекращается по достижении прироста давления в инжекторе за импульс накала менее  $10^{-3}$  Па.

Тренировка разрядом производится при номинальном напряжении накала  $10.5\text{ V}$  и включенном напуске газа. Шаг по току разряда составляет примерно  $100\text{ A}$  с уровня  $250\text{ A}$  до номинального. На каждой ступеньке производится 3–5 импульсов (длительность импульса  $30\text{ ms}$ ) для лучшей очистки ГРК. В процессе проведения тренировки строится вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда, являющаяся основным показателем качества

подготовки ГРК, которая зависит от вида и уровня расхода газа, тока накала катодов, а также чистоты поверхностей ГРК.

## 2.3. Высоковольтная тренировка ионного источника

Высоковольтная тренировка направлена на обеспечение электрической прочности зазоров ИОС источника. Она проводится после тренировки разрядом, перед подачей высокого напряжения на электроды ИОС ионного источника для получения пучка. Во время этой процедуры происходит очистка поверхностей электродов ИОС многократными высоковольтными пробоями ограниченной энергии. Энергия ограничена на уровне  $5\text{--}10\text{ J}$  за счет использования „тренировочного“ конденсатора.

При ВВ тренировке эмиссионного электрода „закорачиваются“ между собой катод, анод и эмиссионный электрод ионного источника. Отрицательный электрод заземляется непосредственно на ионном источнике. Схема защиты эмиссионного и отрицательного электродов от высоковольтных пробоев на время тренировки отключается. Тренировка ведется начиная с напряжения  $10\text{ kV}$ . В процессе тренировки контролируется временной ход высокого напряжения. Как правило, при тренировке наблюдаются высоковольтные пробои в ионном источнике в случайные моменты времени. При снижении частоты пробоев ниже одного в минуту высокое напряжение последовательно увеличивается с шагами около  $1\text{ kV}$  до предельного значения ( $35\text{--}40\text{ kV}$ ). Затем процедура повторяется при периодическом (1 раз в 2 минуты) включении напряжения накала катодов начиная с напряжения накала  $5\text{--}7\text{ V}$ . При отсутствии пробоев в ионном источнике от импульса к импульсу повышается напряжение накала до номинального значения. Тренировка завершается при одновременном периодическом включении накала катодов и напуске рабочего газа при предельном напряжении  $35\text{--}40\text{ kV}$  и практическом отсутствии пробоев.

На время тренировки отрицательного электрода „закорачиваются“ между собой катод, анод и эмиссионный электрод на ионном источнике и заземляются. Тренировка проводится с напряжения на отрицательном электроде  $-1\text{ kV}$  шагами по  $0.5\text{ kV}$  до уровня  $-5\text{ kV}$ . Регистрируется временной ход напряжения на отрицательном электроде. Добившись режима без пробоев, повторяет тренировку вместе с импульсным накалом катодов и рабочим газом.

## 2.4. Вывод инжектора на рабочий режим

Завершающей стадией подготовки инжектора является получение пучка с заданным значением энергии частиц и оптимальными (минимальными) геометрическими размерами. Питание инжектора осуществляется по схеме „рабочего режима“ от основных источников питания.

На начальном этапе вводят минимально допустимые для работы источника установки: разряд на уровне 300–400 А, напряжение ЭЭ +15 кВ и напряжение ОЭ –1.5 кВ. Как правило, первые несколько десятков импульсов сопровождаются ВВ пробоями. Постепенно пучок очищает поверхность электродов ИОС, и длительность импульса инжекции (без пробоя) возрастает до полной — 30 ms. Фокусировка пучка контролируется по сигналам вторично-эмиссионных зондов приемника пучка. Регулировкой тока ЭЭ (путем подстройки тока разряда) добиваются оптимальной фокусировки для заданного напряжения ЭЭ. В дальнейшем установки напряжений постепенно увеличивают до достижения заданной энергии частиц пучка. Для дальнейшей совместной работы инжектора с токамаком процедуру вывода на режим (фокусировку) следует проводить при работающей системе криосорбционной откачки, так как скорость откачки влияет на характеристики дугового разряда в ГРК ионного источника.

### 3. Свойства используемых ионных источников

#### 3.1. Характеристики пучка ионного источника

К основным характеристикам ионного пучка заданного сорта изотопа следует отнести энергию частиц, ток (мощность) пучка, профиль плотности потока частиц и геометрические размеры пучка. Для ионных источников типа ИПМ (источник с периферийным магнитным полем) эти характеристики определяются значениями заданных параметров системы электропитания ионного источника и точностью согласования работы этих систем во времени. Кроме того, характеристики ионного пучка зависят от величины расхода рабочего газа. Мониторинг параметров пучка является важным условием проведения и последующего анализа результатов плазменного эксперимента на токамаке.

*Энергия частиц* пучка в случае однозарядных ионов соответствует ускоряющему напряжению, т.е. напряжению между эмиссионным и заземленным электродами, умноженному на единичный заряд,  $E_0 = eU_{ee}$ . В ионном пучке из источника наряду с атомарными ионами  $H_1^+$  ( $D_1^+$ ) присутствуют в некотором количестве молекулярные ионы  $H_2^+$  ( $D_2^+$ ) и  $H_3^+$  ( $D_3^+$ ). Молекулярные ионы, проходя нейтрализатор, превращаются в атомы с энергиями  $E_0/2$  и  $E_0/3$ , поток которых соответственно в 2 и 3 раза превышает ионные потоки, их породившие.

*Полный ток* ионного пучка, выходящего из источника, может быть с высокой точностью оценен как ток нагрузки эмиссионного электрода  $I_{ee}$  за вычетом половины тока нагрузки отрицательного электрода  $I_{ne}$ . Отличие ионного тока от тока нагрузки эмиссионного электрода связано с вторичной эмиссией с поверхности электродов, а также с ионизацией газа ионами пучка в зазорах между электродами ионно-оптической системы. Следовательно, *мощность ионного пучка* можно оценить как:  $P_i = U_{ee} \cdot (I_{ee} - I_{ne}/2)$ .

*Мощность атомного пучка*  $P_{nb}$  на выходе инжектора можно приблизительно рассчитать, зная величину  $P_i$ . При этом необходимо учесть коэффициент преобразования ионного пучка в атомный в нейтрализаторе  $\eta_{i0}$ , а также потери на транспортировку и обрезание части пучка выходной диафрагмой  $\eta_{tr}$ :

$$P_{nb} = \eta_{i0} \cdot \eta_{tr} \cdot P_i.$$

Параметр  $\eta_{i0} = 0.75-0.65$  (при  $U_{ee} = 25-35$  eV) определяется сечениями атомных процессов, происходящих в нейтрализаторе, зависит от энергии ионов и, следовательно, компонентного состава ионного пучка, а также „оптической“ толщины газовой мишени. Параметр  $\eta_{tr} = 0.85-0.95$  зависит от фокусировки и потерь на реионизацию (т.е. от вакуумных условий на пути пучка внутри инжектора).

Независимое от измерений электротехнических параметров определение содержащейся в инжектируемом пучке *энергии*, а с учетом длительности импульса, и среднее значение *мощности* пучка атомов или ионов можно выполнить калориметрическим способом путем измерения энерговыделения пучка на приемнике за импульс. Такие тепловые измерения можно прокалибровать абсолютно. Кроме того, отношение измеренных сигналов с включенным электромагнитом и без него прямо определяет долю атомной составляющей в полной мощности пучка на выходе из инжектора.

*Плотность потока* частиц поперек пучка по горизонтали (направление вдоль щелей ионно-оптической системы) слабо зависит от режима работы ионного источника и имеет распределение, близкое к гауссовому в фокусе. Напротив, по вертикали (направление поперек щелей ионно-оптической системы) распределение плотности потока частиц очень сильно зависит от выбранного режима. Как уже упоминалось, для измерений профиля плотности потока частиц используется система вторично-эмиссионных зондов, установленная на приемнике пучка (рис. 3). Применяемая система зондов позволяет измерять профиль пучка как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях.

Частицы пучка, попадающие на зонд, выбивают электроны вторичной эмиссии. Выбитые вторичные электроны и ионы пучка в сумме определяют ток зонда. Отметим, что атомы пучка, так же как ионы, выбивают вторичные электроны из зондов и создают ток зонда. Для сбора вторичных электронов на зонды подается отрицательный потенциал около –40 В относительно заземленной средней пластины. В цепи каждого зонда имеется нагрузочное сопротивление, сигнал с которого через гальваническую развязку поступает на вход АЦП и передается в память компьютера. Полученные данные позволяют восстановить профиль распределения плотности пучка, определить положение оси пучка на приемнике, *поперечные размеры* пучка и оценить качество фокусировки. Кроме того, можно оценить значение  $\eta_{i0} \times \eta_{tr}$  из соотношения сигналов одинаковых зондов с включенным и выключенным электромагнитом.

Для визуализации и анализа данных зондовых измерений и реконструкции профилей ионных и атомных пучков инжектора был разработан и интегрирован в графическую оболочку DASTools [7] код DAS Function Minimize [8]. Этот код осуществляет многопараметрический поиск подходящего профиля пучка, приближенного к экспериментальному набору данных с системы вторично-эмиссионных зондов, установленных на приемнике пучка. Применительно к задаче математической обработки данных с зондов инжектора в качестве функций приближения рассматриваются функции двумерного гауссова распределения:

$$F_1(x, y, A, \sigma, x_0, y_0) = A \exp\left(\frac{-(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}{2\sigma}\right),$$

$$F_2(x, y, A, \sigma, x_0, y_0) =$$

$$= A \exp\left(\frac{-(x - x_0)^2}{2\sigma_x}\right) \exp\left(\frac{-(y - y_0)^2}{2\sigma_y}\right),$$

$$F_3(x, y, A, \sigma, x_0, y_0) =$$

$$= A \exp\left(\frac{-(x - x_0)^2}{2\sigma_x}\right) \exp\left(\frac{-(y - y_0)^2}{2\sigma_y}\right)$$

$$\times \left(1 + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y} \exp\left(\frac{-(y - y_0)^2}{2\sigma_y}\right)\right).$$

Для анализа зондовых измерений в код передаются значения, полученные с детекторов в выбранный момент времени, координаты зондов, а также тип функции  $F_1$ ,  $F_2$  или  $F_3$  и допустимые границы параметров  $A$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ . По результатам вычислений строятся графики приближенной функции профиля пучка, выводятся полученные значения параметров функции и рассчитанные характеристики пучка (плотность тока, общий ток, мощность и др.).

Эти программные средства позволяют оперативно построить двумерную картину распределения плотности потока частиц пучка на приемнике. При этом вычисляются эффективная *ширина* и *высота* пучка. В принципе, введение в математическую обработку расчетного коэффициента вторичной эмиссии и величины площади зонда позволило бы пересчитать значения зондовых сигналов в абсолютную плотность тока пучка, а затем в плотность мощности ионного (атомного) пучка. Интеграл полученного распределения при этом определил бы полную мощность ионного (атомного) пучка. Однако соответствующие расчеты коэффициента вторичной эмиссии на практике затруднительны, и приходится пользоваться только относительными величинами. При этом расчетный интеграл мощности пучка калибруется по известной из показаний электротехнических измерений общей мощности.

### 3.2. Характеристики источника ИПМ-2

Для получения наибольшего ионного тока для пучка с энергией 30 keV между эмиссионным и отрицательным электродами в ионно-оптической системе источни-

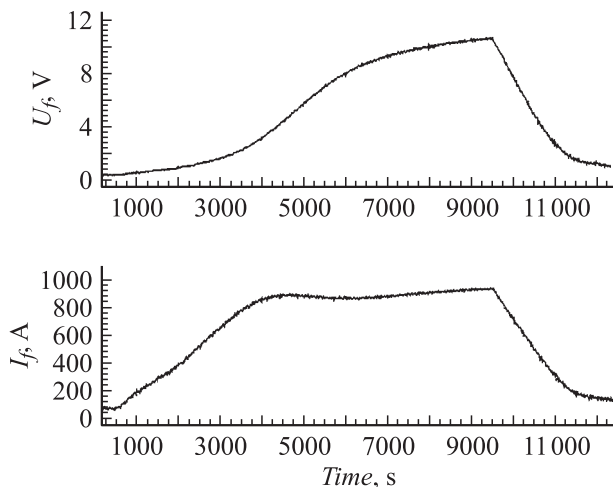


Рис. 6. Форма импульса накала в ионном источнике (начало на 500 ms).

ка ИПМ-2 был установлен зазор 3.5 mm. Измерения проводились в разряде и с водородом, и с дейтерием. Оба рабочих газа имели высокую степень чистоты. Расход газа варьировался в диапазоне 0.6–0.9 m<sup>3</sup>·Pa/s и подбирался исходя из эффективности преобразования ионного пучка в атомный (при испытаниях в составе инжектора).

Длительность импульса накала составляла 9 s. Плавный подъем напряжения накала до 10.5 V и тока до 960 A обеспечивается устройством питания. Осциллограммы напряжения и тока накала приведены на рис. 6. Нарастание тока накала идет с гораздо большей скоростью из-за малого сопротивления непрогретых вольфрамовых катодов. После их интенсивного разогрева ток накала даже несколько спадает, несмотря на дальнейший подъем напряжения накала. Перед самым окончанием импульса накала включается разряд в ГРК (его длительность 30 ms).

Вольт-амперные характеристики разряда в ГРК при фиксированном расходе для обоих типов рабочего газа представлены на рис. 7. Как следует из рисунка,

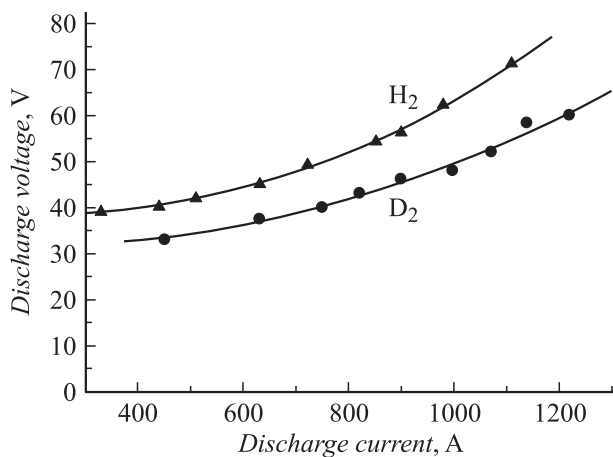


Рис. 7. ВАХ разряда в ИПМ-2 для водорода и дейтерия.

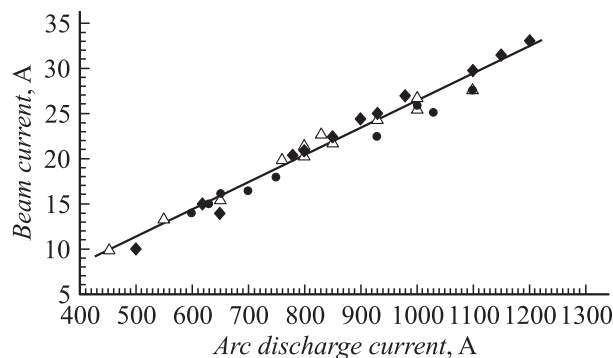


Рис. 8. Эмиссионная способность ИПМ-2 (пучок ионов водорода):  $\blacklozenge$  — 30,  $\triangle$  — 25,  $\bullet$  — 20 kV.

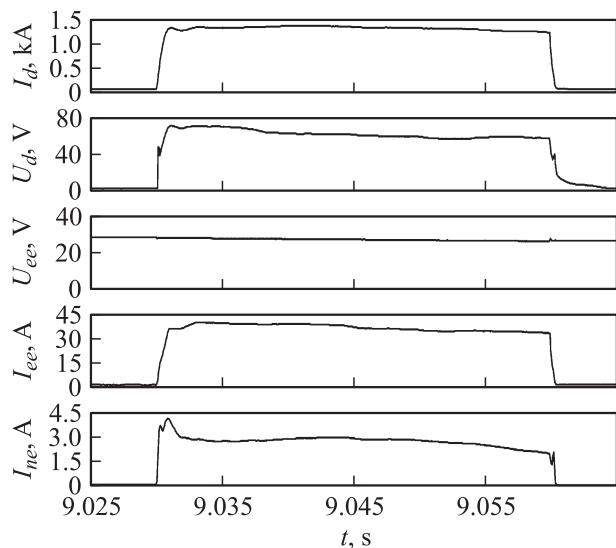


Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений в системе питания во время импульса инжектора с источником ИПМ-2 (для водорода).

напряжение зажигания и горения разряда на водороде заметно выше, чем на дейтерии и может превышать 75 V (при допустимом токе разряда до 1250 A). На рис. 8 показана зависимость эмиссионной способности источника ИПМ-2 от тока разряда. Для ускоряющего напряжения 20–30 kV диапазон оптимальных рабочих токов разряда находится в интервале 800–1250 A.

На рис. 9 представлены осциллограммы основных электротехнических параметров ионного источника ИПМ-2 при предельных значениях мощности инжекции. За время импульса происходит небольшое уменьшение ускоряющего напряжения из-за разрядки питающего емкостного накопителя. Кроме того, газовый разряд в источнике не вполне стационарен — за 30 ms заметно изменяется величина разрядного напряжения несмотря на постоянство тока разряда. И то и другое влияет на вытягиваемый ионный ток и, следовательно, на фокусировку пучка. Тем не менее изменение полной мощности атомного пучка за время импульса не очень велико — менее 20%.

Как следует из измерений, проведенных с помощью вторично-эмиссионных зондов, горизонтальный размер пучка в течение всего импульса остается практически постоянным и не превышает 4 cm (на уровне  $1/e$ ). Вертикальный размер пучка существенно меняется с изменением тока эмиссионного электрода (плотностью вытягиваемого с его поверхности тока). Однако при правильно подобранных параметрах высота пучка не превышает 15 cm в течение всего импульса. Таким образом, практически весь атомный пучок ( $5.5 \times 20$  cm по уровню мощности 0.9), не задевая стенок патрубков, должен попадать в камеру токамака. Плотность мощности

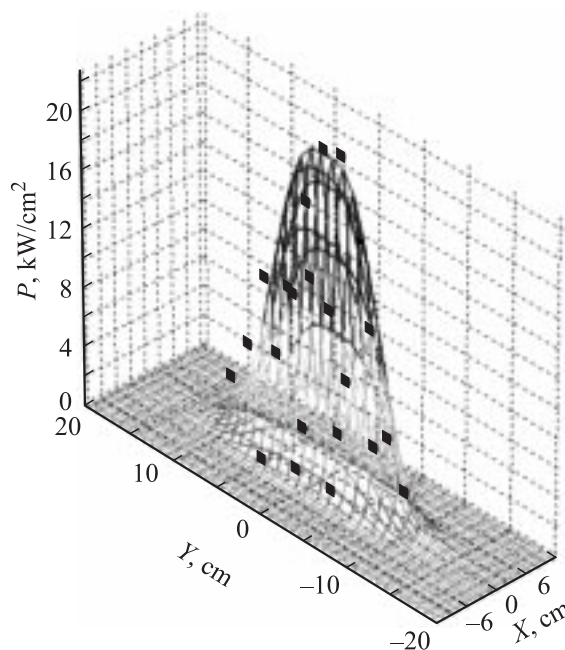


Рис. 10. Профиль плотности мощности пучка атомов водорода (энергия атомов — 29 keV, мощность — 0.7 MW), реконструированный на основе данных зондовых измерений. Точками отображено положение и уровень сигналов с вторично-эмиссионных зондов.

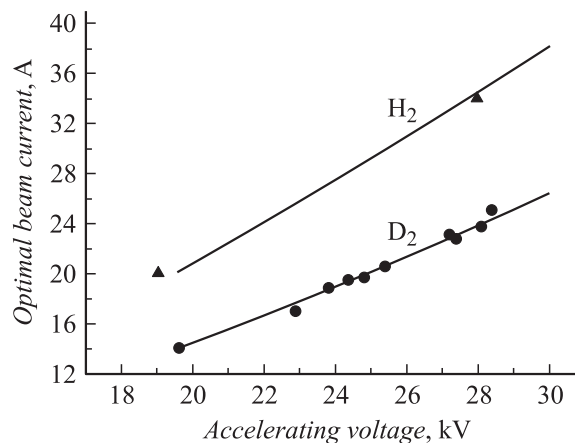


Рис. 11. Значения тока ионного пучка в источнике ИПМ-2 для оптимальных по фокусировке режимов как функция ускоряющего напряжения.

пучка вблизи оси в предельных режимах может превышать  $20 \text{ kW/cm}^2$ . Двумерное графическое представление распределения плотности мощности пучка источника ИПМ-2 в одном из оптимальных режимов представлено на рис. 10.

Сводные характеристики ионного источника ИПМ-2 представлены на рис. 11. Точками отмечены полученные в эксперименте значения, сплошные линии — расчетные кривые для зазора  $3.5 \text{ mm}$  между эмиссионным и отрицательным электродами. Произведение значений параметров по обеим осям фактически есть мощность ионного пучка, извлекаемого из ионного источника. На водороде была получена наибольшая мощность  $0.95$ , на дейтерии —  $0.70 \text{ MW}$ . Согласно имеющимся данным по равновесному выходу атомов, после нейтрализации для ионных пучков с такими параметрами мощность атомных пучков должна составить соответственно  $0.65$  и  $0.50 \text{ MW}$ . Эти значения близки к предельным для ионного источника данной конструкции.

### 3.3. Характеристики источника ИПМ-1

В ИОС ИПМ-1 установлен зазор  $4 \text{ mm}$  между эмиссионным и отрицательным электродами, что позволяет работать с ускоряющими напряжениями до  $30 \text{ kV}$ . Расход газа при напуске увеличен по сравнению с ИПМ-2 до  $1.3 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/s}$  из-за большей площади ЭЭ. Рабочее напряжение накала в источнике ИПМ-1 поддерживается на уровне  $10.5 \text{ V}$ , как и в источнике ИПМ-2, так как в обоих источниках применяются одинаковые катодные „шпильки“, включенные параллельно, но в разном количестве. Импульс накала ИПМ-1 имеет вид, подобный импульсу накала ИПМ-2, отличаясь лишь величиной тока — ток накала равен примерно  $1150 \text{ A}$ .

Результаты измерений параметров дейтериевого разряда приведены на рис. 12. Ток разряда величиной  $1250 \text{ A}$  был получен при напряжении разряда  $60 \text{ V}$ .

На рис. 13 представлена зависимость эмиссионной способности источника ИПМ-1 от тока разряда при различных значениях ускоряющего напряжения. Некоторый разброс точек, скорее всего, обусловлен изменением вакуумных условий в источнике (очистка ГРК во время работы) в течение измерений, которые проводились в разные дни. Извлекаемый ток дейтериевых ионов составил  $50 \text{ A}$  при токе разряда  $1200 \text{ A}$  (для напряжения на

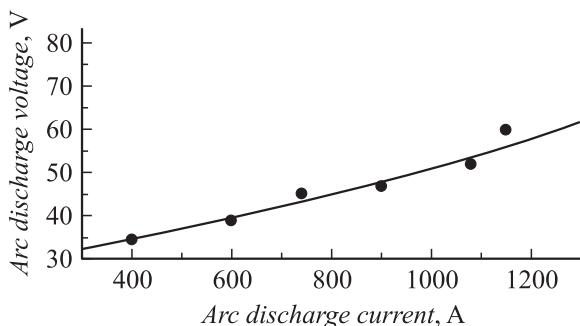


Рис. 12. ВАХ дейтериевого разряда в источнике ИПМ-1.

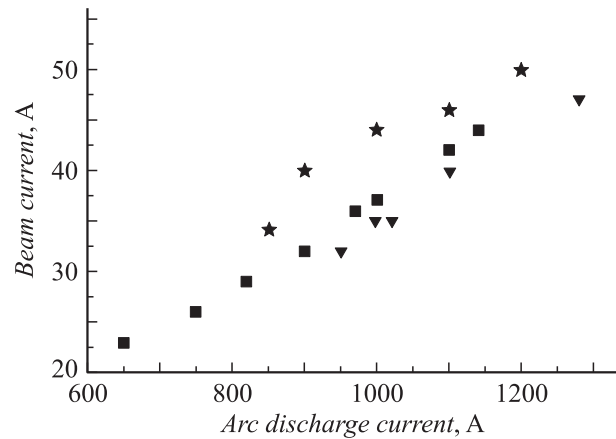


Рис. 13. Эмиссионная способность ИПМ-1 (по дейтерию): ■ — 21, ▼ — 22, ★ — 25 kV.

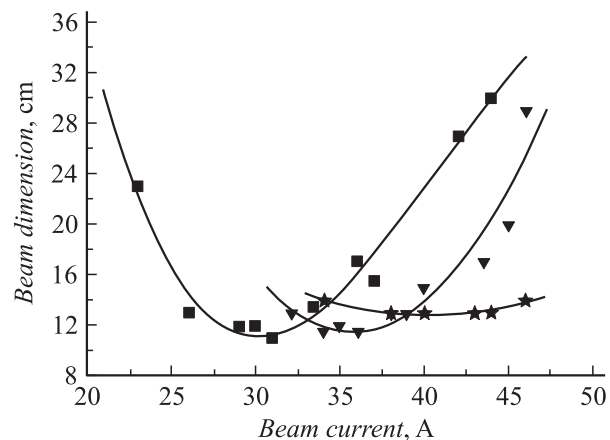


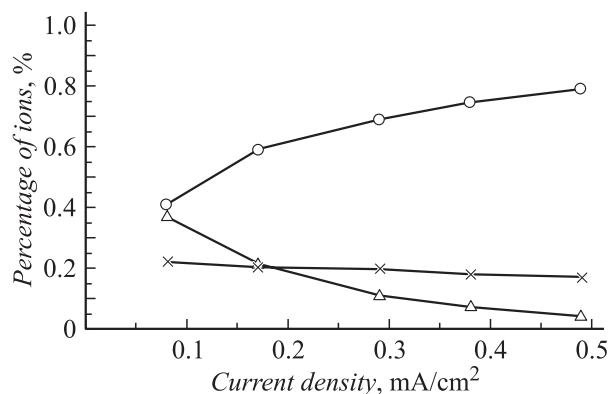
Рис. 14. Зависимость размера дейтериевого атомного пучка поперек щелей ИОС в источнике ИПМ-1 от величины эмиссионного тока для различных значений ускоряющего напряжения на эмиссионном электроде; обозначения те же, что для рис. 13.

эмиссионном электроде  $25 \text{ kV}$ ). В ИПМ-2 при таком же токе разряда эмиссионный ток для дейтерия примерно равнялся  $23\text{--}24 \text{ A}$ . Пересчет полученного в ИПМ-1 для дейтерия ионного тока на случай водородного пучка позволяет рассчитывать на извлечение ионного тока в  $70 \text{ A}$ , что соответствует проектным параметрам этого источника.

Как уже упоминалось ранее, фокусировка пучка поперек щелей ИОС источника зависит от величины ускоряющего напряжения, приложенного к эмиссионному электроду, и извлекаемого из источника ионного тока. На рис. 14 представлена зависимость высоты дейтериевого атомного пучка (на уровне  $1/e$ ) в источнике ИПМ-1 от величины эмиссионного тока для различных значений ускоряющего напряжения. Из рисунка видно, что размер пучка поперек щелей вблизи своего минимума имеет слабую зависимость от эмиссионного тока. При неоптимальных эмиссионных токах пучок сильно расфокусируется. В то же время размер пучка вдоль щелей практически не зависит от тока эмиссии.

**Таблица 4.** Состав водородного пучка при ускоряющем напряжении 30 keV и полном ионном токе 50 А для источника ИПМ-1

| Параметр   | Ионы, выходящие из источника |                             |                             |
|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | H <sub>1</sub> <sup>+</sup>  | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | H <sub>3</sub> <sup>+</sup> |
| Содержание ионов в пучке, %                            | 73                           | 19                          | 8                           |
| Энергия образующихся атомов, keV                       | 30                           | 15                          | 10                          |
| Содержание атомов данной энергии в пучке, %            | 48                           | 31                          | 21                          |
| Доля мощности, приходящейся на атомы данной энергии, % | 68                           | 22                          | 10                          |

**Рис. 15.** Зависимость компонентного состава ионного пучка водорода от плотности тока эмиссионного электрода (источник ИПМ-1): ○ — H<sub>1</sub><sup>+</sup>, × — H<sub>2</sub><sup>+</sup>, △ — H<sub>3</sub><sup>+</sup>.

Поперечный размер оптимизированного пучка не превышает  $7.5 \times 23$  см (по уровню мощности 0.9), что меньше размера входного патрубка токамака  $8.5 \times 24.5$  см, и следовательно, транспортные потери должны быть невелики (менее 10%).

На рис. 15 представлены результаты измерений компонентного состава ионного пучка, полученные для источника ИПМ-1 при работе на водороде. Компонентный состав дейтериевого пучка должен быть таким же, но при плотности тока эмиссии, в 1.4 раза меньшей. Ионному току пучка 50 А в источнике ИПМ-1 соответствует плотность тока эмиссии ионов  $j_{\text{H}}^+ = 0.35$  А/см<sup>2</sup>. В табл. 4 представлены расчетные данные для компонентного состава такого пучка при ускоряющем напряжении 30 keV.

## Заключение

На установке Глобус-М введен в эксплуатацию и выведен на проектные параметры инжектор атомов высокой энергии для экспериментов по дополнительному нагреву плазмы. Инжектор способен генерировать пучок атомов водорода или дейтерия с энергией частиц до 30 keV при длительности импульса 30 ms.

В качестве ионных источников в инжекторе используются источники с периферийным магнитным полем ИПМ-1 или ИПМ-2. В процессе испытаний были исследованы характеристики источников и оптимизированы

режимы их работы. Исследования показали возможность работы инжектора в эксперименте при различных уровнях мощности нейтрального пучка: от 0.2 до 0.7 MW для источника ИПМ-2 и от 0.4 до 1.3 — для ИПМ-1.

В дальнейшем планируется увеличить длительность импульса инжекции до 50 ms и приблизить ее к длительности плато тока в установке Глобус-М. Вторым направлением модернизации комплекса нейтральной инжекции будет переход на автоматизированную систему контроля и управления параметрами пучка, позволяющий существенно облегчить работу оператора и повысить эффективность эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН, Российского агентства по атомной энергии, Министерства по науке и образованию РФ, а также РФФИ (гранты 00-02-16934, 02-02-17693, 05-02-17773, 06-02-16189, 06-02-16709, 06-02-08186).

## Список литературы

- [1] Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 9. С. 58–62.
- [2] Барсуков А.Г., Гусев В.К., Есупов Л.А. и др. Система инжекционного нагрева плазмы сферического токамака Глобус-М. Препринт ИАЭ-6353/7. М., 2005.
- [3] Vlasenkov V.S., Kulygin V.M., Leonov B.M. et al. // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Research. Vienna, 1976. Vol. 1. IAEA-CN-35/A4-3. P. 85–94 (Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Berchtesgaden, 1976).
- [4] Barsukov A.G., Kovrov P.E., Kulygin V.M. et al. // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Research. Vienna, 1982. Vol. 1. IAEA-CN-41/A-6. P. 83–94 (Proc. IX Int. Conf. on Plas. Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. Baltimore, 1982).
- [5] Панасенков А.А., Равичев С.А., Рогов А.В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1984. Т. 15. № 2. С. 56–63.
- [6] Minaev V.B., Barsukov A.G., Chermyshev F.V. et al. // Proc. of 30<sup>th</sup> EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. St. Petersburg, 2003. ECA Vol. 27A. P-2.174.
- [7] Игоныкина Г.Б., Соколов М.М. // Тр. Всерос. науч. конф. „Научный сервис в сети Интернет“. Новороссийск, 18–23 сентября 2006. М.: Изд-во МГУ, 2006. С. 242–244.
- [8] Игоныкина Г.Б., Соколов М.М., Тилинин Г.Н. // Сб. докл. 11-й Всерос. конф. по диагностике плазмы. Троицк, 2005.