

## Первые результаты работы времяпролетного отражательного масс-спектрометра на токамаке Глобус-М

*Н.Н. Аруев, В.К. Гусев, А.Н. Новохацкий, Г.Л. Саксаганский\*,*

*Р.В. Тюкальцев, И.Л. Федичкин*

*Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,*

*ул. Политехническая, д. 26,*

*E-mail: post@mail.ioffe.ru*

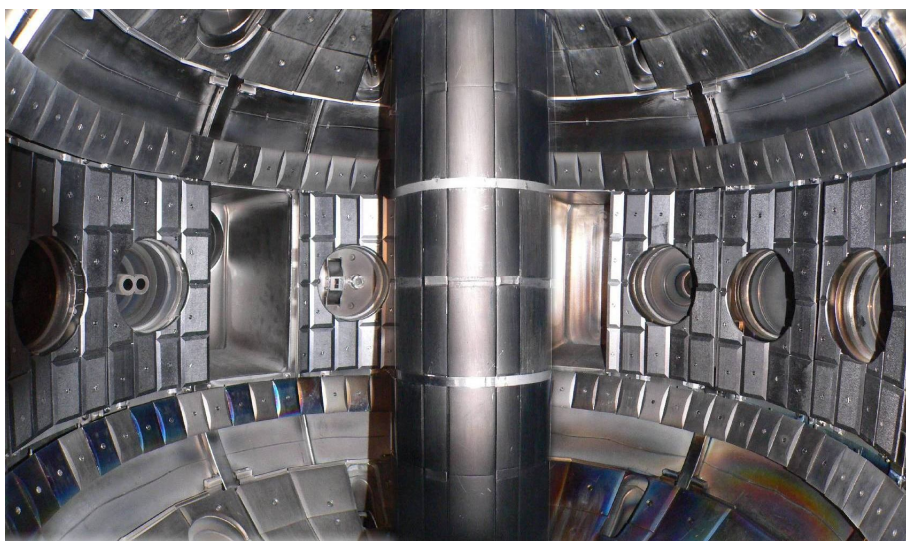
*\*Санкт-Петербург, НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,*

*п. Металлострой, дорога на Металлострой, д3,*

*E-mail: gruss@niiefa.spb.su*

Представлены результаты начального этапа экспериментов по идентификации компонент дейтериевой плазмы токамака Глобус-М в режиме реального времени с помощью времяпролетного отражательного масс-спектрометра отечественной разработки MS-FT. Ранее возможность такого анализа была обоснована авторами в работах [1, 2].

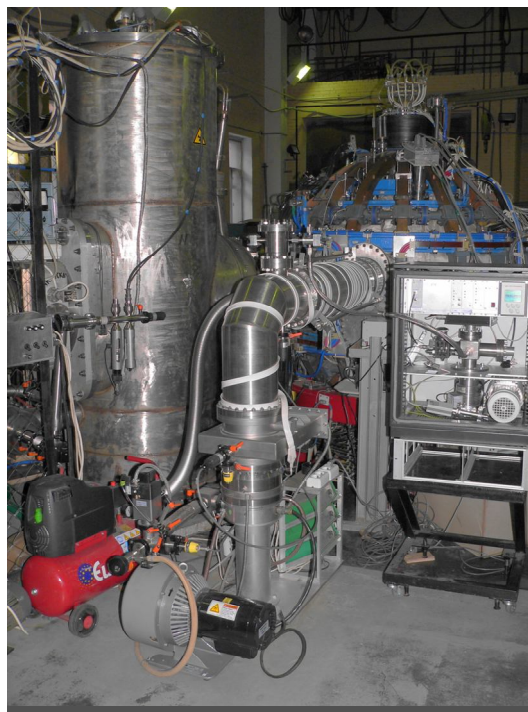
Сферический токамак Глобус-М [3], сооруженный в физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе, представляет собой токамак нового поколения с малым аспектным отношением (большой радиус плазмы 0,36 м, малый – 0,24 м, тороидальное магнитное поле 0,4 Тл), предназначенный для исследования физических процессов в плазме сферической конфигурации и отработки инженерных рекомендаций для сферических токамаков мегаамперного диапазона. Эксперименты проводятся в широком диапазоне параметров омической дейтериевой плазмы (ток плазмы 100-250 кА, электронная концентрация  $(0,1-1,0) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ), в том числе с достижением рекордными значений тороидального бета 17%, а также в режиме улучшенного удержания плазмы с дополнительным нагревом при помощи пучка нейтральных атомов мощностью до 1 МВт. В настоящее время защита первой стенки достигла около 90% всей внутренней поверхности вакуумной камеры, обращенной к плазме (Рис.1).



*Рисунок 1. Вид внутренней поверхности камеры, защищенной графитовыми пластинами*

Защитное покрытие состоит из тайлов, изготовленных из рекристаллизованного графита марки РГТ-91. Тайлы (всего более 800 штук) изготовлены из графита RGTi, легированного 2 ат.% Ti и 0.3-0.7 ат.% Si [4].

Безмасляная система откачки токамака Глобус-М состоит из турбомолекулярного насоса производительностью 1000 л/сек и форвакуумного насоса производительностью 650 л/мин производства фирмы Varian (Рис. 2).



*Рис.2 Откачная система токамака Глобус-М и масс-рефлектор MS-FT.*

Вакуумно-технологическая подготовка камеры токамака Глобус-М перед проведением плазменных экспериментов включает в себя прогрев до  $200^{\circ}\text{C}$  в течении 2-х суток и тлеющий разряд в гелии. Для уменьшения потока примесей со стенки поверхность камеры, обращенную к плазме, в том числе и на графитовую облицовку, 7-8 раз в год, наносились В/С:Н пленки [5].

Для анализа парциального состава фонового остаточного газа в разрядной камере, напускаемого рабочего газа (дейтерий) и компонентов плазменного разряда в режиме реального времени использовали времяпролетный отражательный масс-спектрометр (масс-рефлектор) MS-FT. Разрешающая способность масс-спектрометра в области средних масс (20-40 а.е.м.) на полувысоте пиков около 150. Масс-анализатор, снабженный собственным безмасляным высоковакуумным насосом, был смонтирован в непосредственной близости от разрядной камеры и связан с внутрикамерной полостью дозирующим вентилем (Рис. 2).

Рабочее давление в масс-анализаторе при его автономной эксплуатации не превышает  $10^{-7}$  Тор. Прибор способен работать в двух модах: с регистрацией полного спектра, когда фиксируются все ионные пики в диапазоне масс от единицы до сотен а.е.м., и режиме синхронного детектирования, когда детектор «открыт» только для ионов с заданным соотношением заряда и массы. В режиме синхронного детектирования возможен устойчивый количественный анализ тритийсодержащих газовых смесей, что имеет принципиальное значение при создании термоядерных реакторов с дейтериево-тритиевым топливным циклом. Это выгодно отличает масс-рефлектор от статических и динамических масс-спектрометров других типов, чувствительность которых в процессе измерений падает неконтролируемым образом из-за возрастания фонового тока вторичных электронных умножителей либо

микроканальных пластин детекторного устройства в результате  $\beta$ -распада ядер трития внутри анализаторов.

На Рис. 3а приведен спектр напуска дейтерия в рабочую камеру токамака Глобус-М до давления  $3 \cdot 10^{-5}$  торр. Напуск газа осуществляется с помощью пьезоэлектрического клапана. За один импульс в камеру токамака Глобус-М, по нашим расчетам, инжектируется  $D_{\text{инж}} = 3 \cdot 10^{19}$  атомов дейтерия. На Рис. 3б приведен спектр, снятый во время плазменного разряда на токамаке Глобус-М.

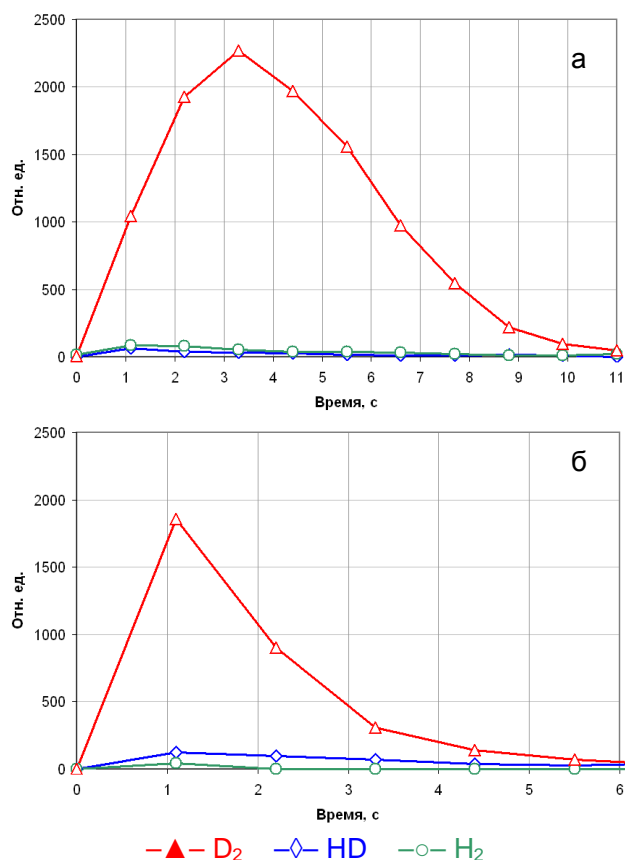


Рис. 3. а) - спектр, снятый при напуске газа в камеру токамака;  
б) – спектр, снятый во время плазменного разряда токамака

Проделанные эксперименты дали следующие важные результаты:

- экспериментально доказана эффективность масс-рефлектрона как средства диагностики плазмы в условиях токамака;
- плазменный разряд и переменные магнитные поля, присущие токамаку, не вносят заметных помех и искажений в работу масс-спектрометра;
- основными компонентами масс-спектра при разряде являются  $(H_2^+ + D^+)$ ,  $HD^+$ ,  $D_2^+$ ,  $O^+$ ,  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $CO^+$ ,  $CO_2^+$ .

На следующем этапе исследований планируется:

- провести калибровку прибора по основным компонентам масс-спектра и оценить «чувствительность» калибровочных коэффициентов к вариации плазмо-физических характеристик;
- сопоставить масс-спектры и параметры плазменного разряда и выявить феноменологию их взаимосвязи;
- оценить запаздывание (временной сдвиг) выходной информации масс-спектрометра относительно реального хода процессов в плазме и

минимизировать этот сдвиг. С этой целью аппаратурными средствами уменьшить продолжительность накопления ионного пучка в масс-анализаторе до  $\sim 0,1$  с.

#### Литература

1. Aruev N.N., Kozlovskii A.V., Fedichkin I.L., Saksaganskiy G.L. Possibility of analyzing deuterium-tritium gas mixture using a time-of-flight mass spectrometer. Письма в ЖТФ, 1997, т. 23, № 20, с. 83
2. Аруев Н.Н., Пилюгин И.И., Козловский А.В. Саксаганский Г.Л. Требования к разрешающей способности и калибровка времяпролетного масс-спектрометра для анализа топливных смесей термоядерного реактора «Атомная энергия», т. 104, вып. 4, апр. 2008, с. 233-237
3. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др., Сферический токамак Глобус-М, ЖТФ т.69, (1999), т.69, N 9, стр. 58-62
4. T.A. Burtseva et al., Carbon Materials, Proceedings of 6th International Workshop, Julich, Germany, 23-24 September, 1993, 49.
5. V.M. Sharapov et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 730.