

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ МОДЕЛИ ПЛАЗМЕННОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА ИНЖЕКТОРА ИТЭР

В. А. Беляев, М. М. Дубровин, В. А. Жильцов, В. Ф. Зубарев, П. М. Косарев,  
В. М. Кулыгин, А. А. Сковорода, А. В. Спицын, А. А. Терентьев, С. В. Янченков.  
*РНИЦ «Курчатовский институт» ИЯС, Россия, 123182, Москва*

## 1. Введение

Для нейтрализации пучков отрицательных ионов дейтерия в инжекторе реактора ИТЭР был разработан концептуальный проект плазменного нейтрализатора (ПН-ИТЭР) на основе трехмерной мультипольной магнитной ловушки, в которой плазма создается ЭЦР микроволновым разрядом. [1–5].

Установка ПН-3 сооружена для проверки основных физических принципов, положенных в основу концептуального проекта плазменного нейтрализатора мощных пучков отрицательных ионов водорода, а также для создания физической базы данных, необходимой при создании ПН-ИТЭР [4]. Основной задачей является поиск оптимальных плазменных режимов, обеспечивающих максимальную линейную плотность, минимальные энергетические затраты на поддержание плазмы, высокую степень ионизации.

Технические характеристики и измеренные параметры плазмы в ПН-3 приведены в таблице. Режим работы: магнитной системы – стационарный, СВЧ генераторов – импульсно периодический (длительность импульсов 0.5 с, период повторения 5 с). Отметим, что объем плазмы и толщина мишени (произведение плотности плазмы на ее длину) составляют одну десятую от необходимых для ПН-ИТЭР.

Таблица 1

Внутренние размеры магнитной системы: длина/диаметр	2.2 м/0.6 м
Количество магнитных щелей	15
Объем плазмы, м <sup>3</sup>	0.5
Максимальное магнитное поле в щелях, Тл	0.5
Частота СВЧ генераторов, ГГц	7
Мощность одного генератора, кВт	50
Число генераторов	2
Толщина плазменной мишени	$2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$
Температура электронов	5-20 эВ
Температура ионов	5 эВ
Плотность плазмы	$10^{18} \text{ м}^{-3}$
Средняя степень ионизации	0.4
Удельная мощность создания плазмы, МВт/м <sup>3</sup>	0.1
Рабочие газы	Ar, H <sub>2</sub>
Давление газа вне плазмы при разряде, Па	$10^{-2}$

## 2. Эксперимент на ПН-3

Магнитная конфигурация образуется парами круглых катушек, расположенных на цилиндрической поверхности (боковая магнитная система) и двумя парами круглых и вытянутых катушек, расположенных на каждой из двух торцевых плоскостях (торцевая магнитная система). Токи в каждой паре направлены в одну сторону, а в соседних парах в разные стороны. Схема расположения катушек магнитной системы, силовые линии и линии равного модуля магнитного поля показана на рис. 1.

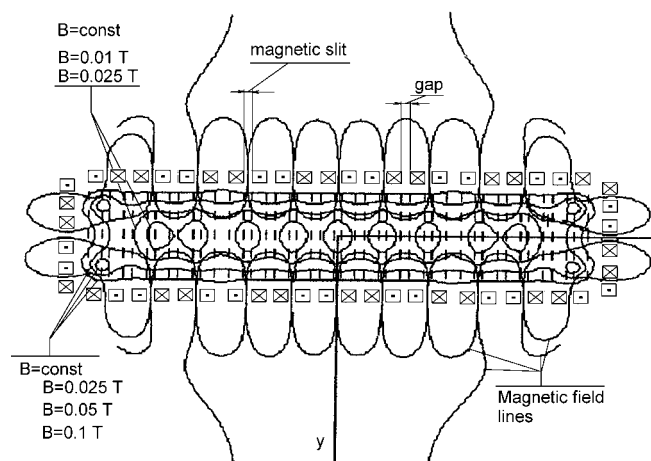


Рис. 1 Магнитная система ПН-3

Магнитное поле мало в центральной области ловушки (на оси имеются нули поля) и максимально вблизи проводников (магнитная стенка). Боковая магнитная система имеет одиннадцать кольцевых магнитных щелей, на каждом торце имеется по одной кольцевой и осевой щели, между катушками в каждой паре имеется зазор, который используется для ввода диагностики или СВЧ мощности. Торцевые зазоры используются для ввода пучков [1, 5]. Катушки магнитной системы находятся в вакуумно-плотных каркасах и расположены внутри по оси вакуумного объема длиной 4 м и диаметром 1.2 м. Внутренние перегородки вдоль торцевых плоскостей магнитной системы делят вакуумную камеру на три изолированных объема, два из которых, в том числе центральный объем, имеют независимые системы откачки. Все торцевые магнитные щели были закрыты газовыми коробками так, что плазменные потоки не выходили в торцевые вакуумные объемы. Центральный объем разделялся магнитной системой на внутренний объем, в котором удерживается основная плазма, и на внешний объем, куда вытекает плазма вдоль магнитных щелей. Поглощение СВЧ мощности происходит в зонах ЭЦР, которые расположены вблизи щелей на периферии плазмы.

### 3. Экспериментальные результаты

Режимы создания плазмы и ее параметры определялись величинами и пространственными распределениями потоков вводимой СВЧ мощности и газа. От этих параметров зависели линейная плотность, удельная мощность на поддержание плазмы, степень ионизации, пространственное распределение выходящих из магнитных щелей потоков и средний заряд плазмы (для аргона).

Величина напряженности магнитного поля в щелях для условий эксперимента изменялась в узком диапазоне, ограниченном сверху предельным током в катушках, а снизу условием ЭЦР для данной частоты СВЧ генераторов. Существенной зависимости параметров плазмы от напряженности магнитного поля в этом диапазоне не обнаружено и, в основном, работа проводилась при фиксированном магнитном поле в боковых щелях 0.36 Т.

Для выяснения влияния рециклинга газа в ловушке были установлены так называемые «газовые коробки», представляющие собой герметичные объемы, в которые попадает плазма, вытекающая в осевые щели и осевые отверстия магнитной системы. Плазма рекомбинирует на стенках коробок и в виде нейтрального газа попадает обратно в плазму. Рабочий газ подавался в одну из центральных щелей и в торцевые газовые коробки с использованием пьезо-клапанов. Зависимость  $n_l$  от вводимой мощности приведена на рис. 2, из которой следует, что линейная плотность ограничена. Из зависимости  $n_l$  от количества напускаемого газа (рис. 3) видно, что существует оптимальное давление при заданной

вводимой мощности, при которой достигается максимальная величина линейной плотности.

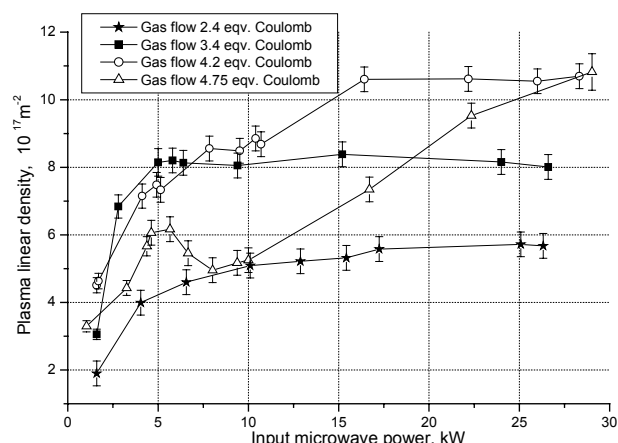


Рис. 2. Зависимость  $n_l$  от вводимой мощности

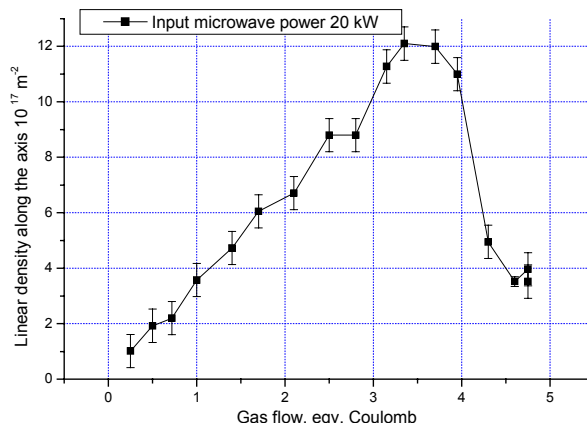


Рис. 3. Зависимость  $n_l$  от давления газа.

С помощью коллекторов были измерены величины ионных потоков в магнитные щели ловушки. На рис. 4 приведено распределение ионных потоков в боковые щели при наличии или отсутствии торцевых газовых коробок. Наблюдается значительная (в два-три раза) неоднородность интенсивности вытекающих в разные магнитные щели плазменных потоков. Без газовых коробок потоки в торцевые щели падают и, как показывают измерения, уменьшается плотность плазмы в торцах. Это можно объяснить локальностью расположения двух СВЧ вводов (только в центральной части магнитной ловушки) и относительно малой «связанностью» отдельных встречных пробок, составляющих ловушку. Применение таких газовых коробок увеличило линейную плотность, сделало разряд более стабильным и воспроизводимым, позволило лучше контролировать газовый режим разряда. В проведенных экспериментах полный поток ионов через все щели, включая торцевые, составил 20-50 А в зависимости от величин напускаемого газового потока и вводимой мощности. Этот поток ионов на порядок превышал потоки газа, связанные с напуском и откачкой. Механизм установления большого рециклинга газа является определяющим для поддержания разряда.

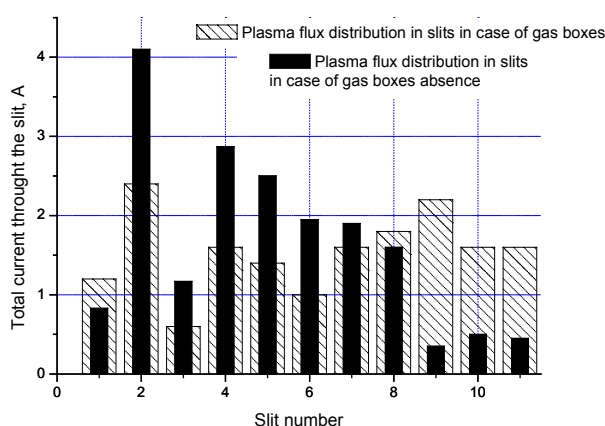


Рис. 4. Распределение потоков плазмы по щелям

Калориметрические и болометрические измерения показывают, что когда плотность плазмы в ПН-3 превышает критическую плотность для используемой частоты СВЧ генераторов, значительная часть вводимой СВЧ мощности выделяется в антенных системах. При давлении газа свыше 0.05 Па разряд загорается непосредственно на вводе в антенную систему.

Измерения вытекающих в щели плазменных потоков показали наличие в плазме многозарядных ионов аргона. На рис. 5 показан спектр заряженных частиц, измеренный с помощью магнитного анализатора. С ростом вводимой мощности увеличивается поток ионов  $Ar^{++}$  в магнитные щели и средний заряд плазмы (рис. 6).

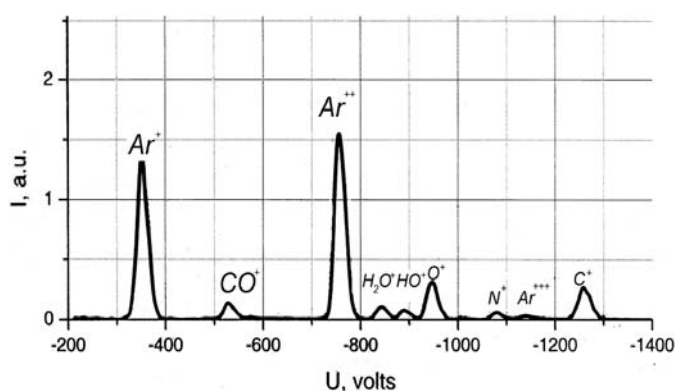


Рис. 5 Спектр вытекающих в щели потоков

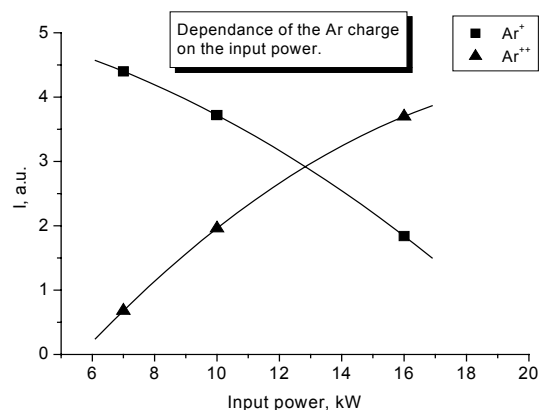


Рис. 6. Зависимость числа  $Z$  от вводимой мощности

В ходе эксперимента обнаружен режим улучшенного потенциального удержания ионов в центральной области разряда. Экспериментальные результаты для аргона достаточно хорошо объясняются моделью с магнитным удержанием горячих электронов ( $\sim 20$  эВ) на периферии плазмы и потенциальным удержанием холодных ионов в центральной области с более низкой из-за радиационного охлаждения электронной температурой ( $\sim 5$  эВ) [5].

#### 4. Заключение

Эксперименты показали правильность основных концепций заложенных в проект плазменного нейтрализатора ИТЭР и, в тоже время, показали существование различных режимов работы установки, существенно влияющих на параметры плазмы и ее энергобаланс.

Наиболее важная для нейтрализатора величина линейной плотности ограничена критической плотностью плазмы для заданной частоты СВЧ мощности. При использовании в качестве рабочего газа аргона удалось превысить критическую плотность в  $\sim 1,5$  раза, для водорода она была близка к критической плотности. Это различие между водородом и аргоном, по-видимому, связано с разной степенью замагниченности ионов плазмы и различием в радиационных потерях.

Для полученных максимальных величин  $nI \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$  удельная СВЧ мощность, необходимая для поддержания разряда, не превысила  $0.1 \text{ М Вт/м}^3$ , что удовлетворяет требованиям на энергетические затраты для ПН-ИТЭР [4].

Минимальная неоднородность и максимальные параметры плазмы получаются в режимах с торцевыми газовыми коробками. Выявлена определяющая роль большого рециклинга газа во всех исследованных режимах работы установки.

Обнаружены режимы с образованием многозарядных ионов, в которых средний заряд плазмы, покидающей ловушку, составляет  $\sim 2$ . Возможность образования многозарядных ионов зависит от вводимой мощности и давления газа. Использование в ПН плазмы с зарядом  $\geq 2$  позволяет уменьшить газовые потоки и толщину мишени, что способствует улучшению характеристик нейтрализатора [1].

Проведенные исследования показали не только сложность происходящих в мультипольной ловушке плазменных процессов, но и реальность удовлетворения требований,

предъявляемых к ПН инжектора ИТЭР [4]. Основными путями достижения этой цели являются:

- увеличение по сравнению с ПН-3 магнитного поля и частоты СВЧ генераторов в  $\sim 3$  раза с целью повышения критической плотности
- пространственное рассредоточение вводимой СВЧ мощности для повышения однородности плазмы и уменьшения нагрузки на один СВЧ ввод
- установка на все щели газовых коробок для «запирания» СВЧ мощности внутри плазменного объема и эффективного поддержания разряда в условиях большого газового рециклинга.

#### **Литература:**

1. Skovoroda A. A. Plasma Neutralizer for ITER Injector. Preprint IAE-5544/6, RRC Kurchatov Inst., Moscow (1992).
2. Kulygin V. M., Skovoroda A. A., Zhil'tsov V. A. // Plasma Devices and Operations, 1998, V. 6. P. 135.
3. Zhil'tsov V. A., Klimenko E. Yu., Kosarev P. M. et al. // Nuclear Fusion. 2000. V. 40. № 3Y. P. 509.
4. Kulygin V. M., Dlougach E. D., Gorbunov E. P. et al. // Nuclear Fusion. 2001. V. 41. № 4. P. 355.
5. Skovoroda A. A., Zhil'tsov V. A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 929.