

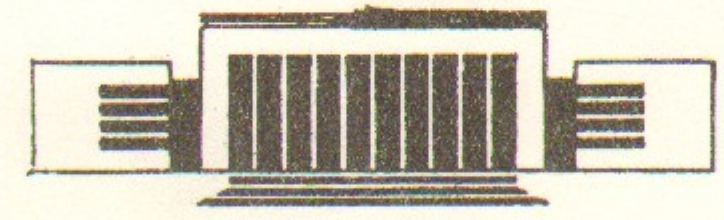


Государственный научный центр
Российской Федерации
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Н. Бочаров, А.М. Кудрявцев, С.Д. Кравченко,
О.К. Мыскин, В.М. Панасюк, П.А. Багрянский,
П.П. Дейчули, А.А. Иванов, А.Н. Карпушов,
В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, Н.В. Ступишин

МИШЕННАЯ ПЛАЗМА
ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ПРОТОТИПА
НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА:
МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
НА УСТАНОВКАХ СТЕНД-МП И ГДЛ

ИЯФ 95-111



НОВОСИБИРСК

Мишенная плазма для Водородного прототипа
нейтронного источника: модельные эксперименты
на установках СТЕНД-МП и ГДЛ

*В.Н. Бочаров, А.М. Кудрявцев, С.Д. Кравченко,
О.К. Мыскин, В.М. Панасюк, П.А. Багрянский,
П.П. Дейчули, А.А. Иванов, А.Н. Карпушов,
В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, Н.В. Ступишин*

ГНЦ "РФ Институт ядерной физики СО РАН"
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

На стендовой установке СТЕНД-МП и исследовательской установке ГДЛ проведены модельные эксперименты по созданию мишенной плазмы для Водородного прототипа.

Источник плазменной струи, аналогичный источникам, разработанным в ИЯФ ранее, создает кольцевой поток, проходящий в ловушку через пробку. Этот поток эффективно заполняет ловушку благодаря радиальной конвекции плазмы в направлении оси системы.

Target plasma for Hydrogen prototype
of Neutron source: modelling experiments
on STAND-MP and GDL devices

*V.N. Bocharov, A.M. Kudryavtsev, S.D. Kravchenko,
O.K. Myskin, V.M. Panasyuk, P.A. Bagryansky,
P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, A.N. Karpushov,
V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, N.V. Stupishin*

The State Research Center of Russian Federation
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

The modelling experiments on target plasma creation for Hydrogen Prototype are being done on test-bed "STAND-MP" and research device GDL.

The plasma source is similar to the gas discharge sources used previously on some other devices. It produces the plasma flow of annular cross-section, which comes through the mirror into the trap. The efficient filling of the mirror traps by a radial inward plasma convection was observed.

© ГНЦ РФ "Институт ядерной физики
им. Г.И.Будкера СО РАН", Россия.

В соответствии со сценарием старта в Нейтронном Источнике и его Водородном Прототипе, перед инжекцией мощных атомарных пучков в область удержания горячей плазмы там должна быть создана мишенная плазма. Основные характеристики этой плазмы должны быть следующими: диаметр порядка 20 см, эффективная толщина порядка 10^{15} см^{-2} , электронная температура не менее 10 эВ; кроме того, должна быть подавлена продольная теплопроводность, должны отсутствовать сильные неустойчивости и время поддержания этой плазмы должно составлять не менее 10 мсек. После анализа различных способов приготовления такой плазмы было принято решение создать для их экспериментальной проверки специализированный стенд, получивший название СТЕНД-МП.

Стенд был создан на материальной базе существовавшей пробочной ловушки со следующими параметрами: поле в пробках до 2.5 Т, пробочное отношение 4, расстояние между пробками 1.7 м, максимально возможный диаметр плазмы в центральной плоскости до 0.5 м.

На первом этапе проверялась возможность создания плазмы с помощью мощного высокочастотного разряда на электронной циклотронной частоте (т.н. ЭЦР-разряд) непосредственно в области удержания. Однако при мощности в разряде до 50 кВт достигнутая плотность плазмы не превышала 10^{13} см^{-3} , что обеспечивало эффективную толщину не более $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Поэтому для дальнейших исследований был выбран способ, основанный на использовании кольцевого газоразрядного источника плазмы, подобного разработанному в ИЯФ ранее [1].

Эксперименты с кольцевым источником плазмы

Общая схема установки "СТЕНД-МП" и размещение диагностик показаны на рис.1.

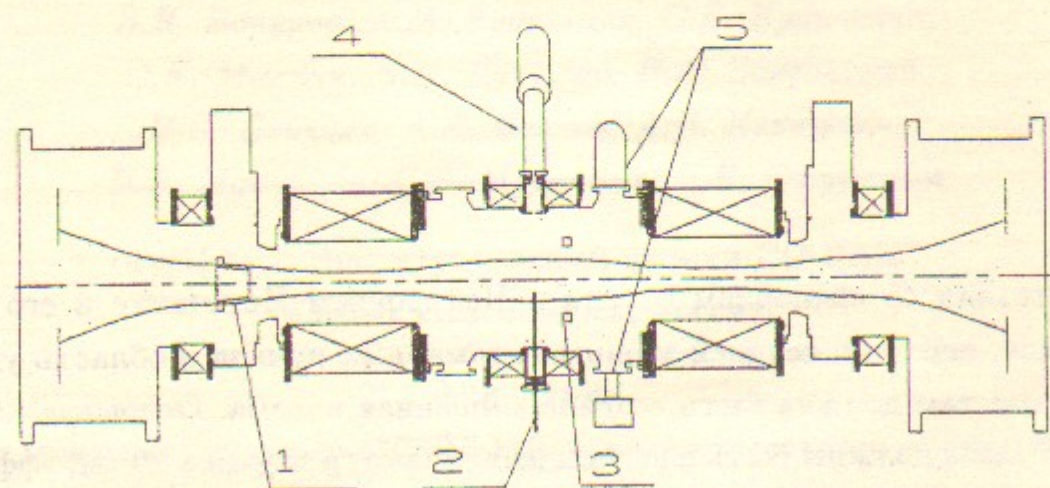


Рис. 1. Схема установки "СТЕНД-МП"

1 - источник плазмы, 2 - тройной зонд, 3 - диамагнитная петля, 4 - 60 кэВ He источник, 5 - 3 кэВ H источник и анализатор по энергиям

Схема источника показана на Рис.2. Газоразрядный канал источника (см. рисунок) образован двумя соосными конусами, образующие которых параллельны силовым линиям магнитного поля установки. Внутренний конус, являющийся катодом, скомбинирован из молибденового кольца-вставки (поз.1) и основной части, изготавливаемой из нержавеющей стали (поз.2); внешний конус состоит из группы деталей: массивного молибденового анода со сменной вставкой (поз.3),

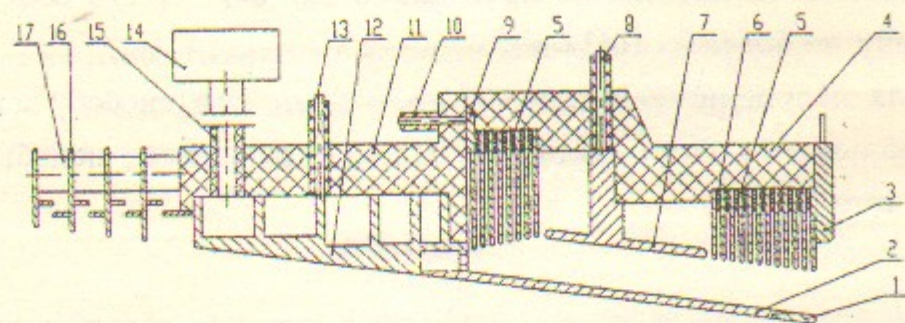


Рис. 2. Кольцевой источник плазмы.

двух групп тонких молибденовых колец (поз.5), изолированных друг от друга керамическими кольцами (поз.6), и конического электрода (поз.7) из нержавеющей стали. Кольца (5) и электрод (7) находятся при "плавающем" потенциале и, во-первых, прикрывают от разряда керамический корпус (поз.4), а, во-вторых, создают в длинном разрядном канале требуемое распределение потенциала. Прилегающий к

катоду кольцевой электрод (поз.9) имеет отдельный токоввод (поз.10) и используется для поджига разряда. Газовая коробка состоит из шести тороидальных полостей, связанных друг с другом системой отверстий, и формирует азимутально симметричный поток газа в разрядную камеру. Конструктивно коробка состоит из детали (поз.12), примыкающей к катодному конусу, изготовленной из нержавеющей стали, и керамического корпуса (поз.11). Коробка заполняется газом от клапана (поз.14) через канал (поз.15). Система колец (поз.16), закрепленная на изоляторах (поз.17), препятствует возникновению внешнего разряда между катодным узлом источника и стенками вакуумной камеры. Источник помещен за пробкой в области с локальным пробочным отношением 1.3.

Набор диагностик

Набор диагностик состоит из поясов Роговского для измерений катодного и анодного токов, диамагнитной петли, подвижного тройного зонда, системы лазерного рассеяния, 3 кэВ водородного источника и соответствующего анализатора быстрых атомов по энергиям для измерения эффективной толщины плазмы методом ослабления зондирующего пучка, 60 кэВ гелиевого источника и шести кремниевых детекторов для измерений локальных значений плотности плазмы, оптического спектрометра и некоторых других систем. Почти все диагностики расположены в центральной плоскости ловушки.

Экспериментальные результаты

Эксперимент показал, что время нарастания тока в разрядной ячейке до максимальной величины составляет 0.5 мсек; примерно с таким же временем нарастает плотность плазмы в центральной плоскости как на радиусе 7 см (до $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$), так и на радиусе 2 см (до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, см. Рис.3).

Зависимость локальной плотности плазмы от времени $n(t)$, показанная на Рис. (3 d), измерена с использованием пучка 60 кэВ гелиевых атомов [2]. Узкий пучок и система коллиматоров обеспечивают сбор образовавшихся при перезарядке в плазме ионов He^+ из малых областей вблизи выбранных точек наблюдения ($r = 2.5, 7, 9.5 \text{ см}$). Прошедшие коллиматоры ионы He^+ регистрируются кремниевыми детекторами. Ток детектора пропорционален плотности плазмы: $I = k \times n$, где k определяется путем калибровки на газе известной плотности с известным значением сечения обдирки. Поскольку пучок является импульсным с длительностью 1 мсек, кривые $n(t)$ были получены по нескольким выстрелам. Временное разрешение такого способа не позволило заметить задержку по времени в нарастании плотности плазмы в области радиуса 2 см относительно области инъекции плазменного потока ($r \approx 7.5 \text{ см}$); верхний предел такой задержки может быть оценен как 50 микросекунд и скорость радиальной конвекции, соответственно, как $\approx 10^5 \text{ см/сек}$ или больше.

Также по нескольким выстрелам методом ослабления пучка измерялась эффективная толщина плазмы $\int n(r)dr$ (Рис.3.с). Максимальная величина ослабления соответствует $\int n(r)dr \approx 7 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Давление плазмы nT , рассчитанное по осциллограммам диамагнитного сигнала (Рис.3 а), составляет $5 \times 10^{14} \text{ эВ/см}^3$.

Электронная температура T_e и плотность измерялись на радиусах 7 см и 2.5 см с помощью системы многопроходного Томсоновского рассеяния [3]. Эта система была настроена на 8 проходов лазерного пучка через плазму, что позволило получить пятикратный выигрыш в интенсивности рассеянного света. Измеренные величины T_e составили 7 – 9 эВ на радиусе 7 см и 4 – 6 эВ на радиусе 2.5 см. Значения плотности плазмы, рассчитанные из этих измерений, оказались в хорошем согласии с приведенными на Рис.3.

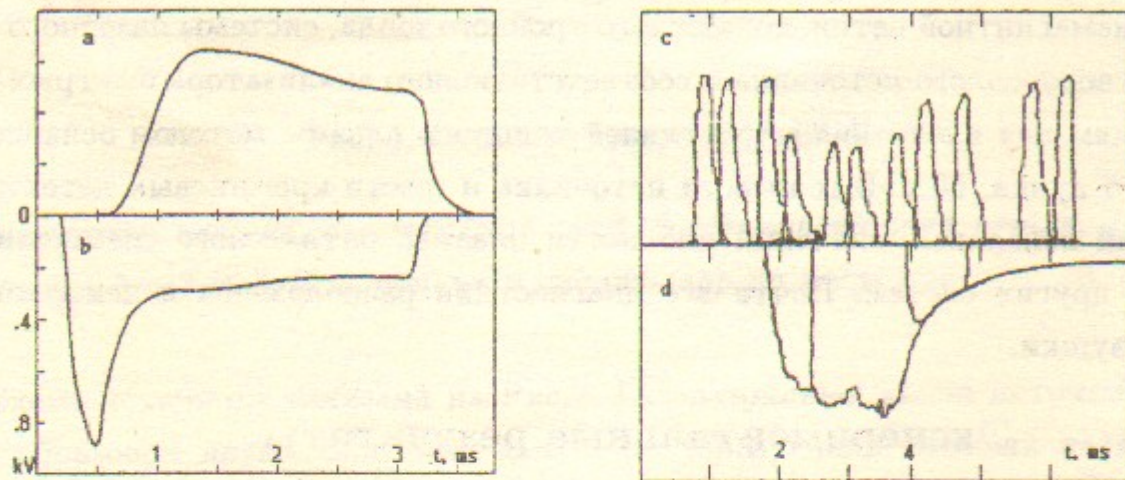


Рис. 3.

- a – диамагнитный сигнал, $\langle n \times T_e \rangle \approx 5 \times 10^{14} \text{ эВ/см}^3$
- b – напряжение на разряде
- c – ослабление 3 кэВ H-пучка, $\int n(r)dr \approx 7 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$
- d – перезарядный ионный ток 60 кэВ He-пучка, $n(r = 7 \text{ см}) \approx 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Радиальный профиль плотности плазмы измерялся более подробно с помощью тройного зонда (Рис.4, два квадратика соответствуют, практически, совпадающим результатам, полученным методом лазерного рассеяния и методом гелиевого пучка). Хорошее согласие зондовых измерений с лазерными обнаружено и при определении электронной температуры T_e , правда, только в области радиуса 7 см. В области меньших радиусов значения температуры, измеренные с помощью зонда, оказываются систематически (в 1.5 раза) меньше, чем по лазерному рассеянию.

Анализ оптических спектров излучения плазмы в видимом диапазоне показал отсутствие каких-либо линий примесей за исключением линии иона углерода C^{++} с интенсивностью в двадцать раз меньшей, чем соседняя с ней линия атома водорода H_β . Спектральные профили линии H_β для двух стадий существования плазмы

показаны на Рис.5. Из него видно, что спектральная ширина линии в стадии горения разряда (кружки) существенно больше, чем в стадии свободного распада плазмы (квадратики).

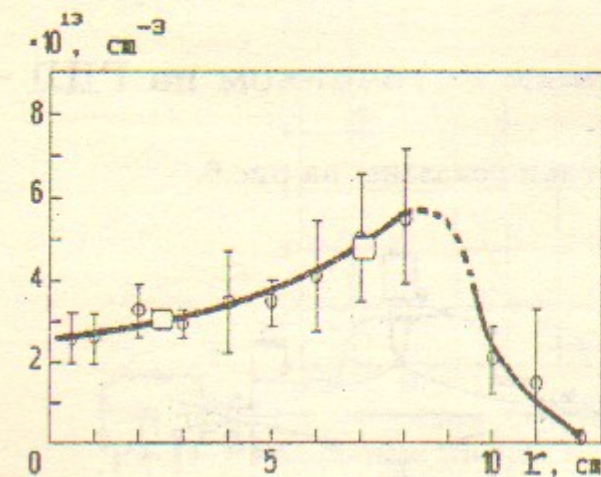


Рис. 4. Радиальный профиль плотности $n(r)$.

Очевидно, что это Допплеровское уширение обусловлено группой быстрых атомов, образовавшихся в плазме из-за перезарядки, и свидетельствует об ускорении части ионов плазмы электрическим полем.

Измеренное время распада плазмы составляет обычно 300 – 400 микросекунд. Сравнительно большое значение этой величины, повидимому, связано с быстрым остыванием плазмы после выключения разрядного напряжения (см. Рис.3).

Необходимая величина газового потока I_g оценивалась по измерениям полного количества инжектируемого водорода и осциллограммам плотности газа внутри разрядного канала $n_g(t)$. Чтобы измерить зависимость $n_g(t)$ три электрода источника соединялись согласно схеме обычного магнито-разрядного манометра (катод и анод находятся при отрицательном потенциале ≈ 2 кВ, промежуточный конус заземляется через резистор, ограничивающий разрядный ток, который при такой схеме пропорционален n_g). Измеренная таким способом длительность газового импульса оказалась равной 5 мс, а величина I_g – около 1.5 кА (эквив).

Оценка времени удержания частиц в ловушке на стадии стационарного разряда τ_c может быть сделана так:

$\tau_c \sim (n \times V)/I \approx 10^{-4} \text{ с}$, где $V = 20 \times 10^3 \text{ см}^3$ – объем плазмы, $I = 1.5 \text{ кА}$ – поток плазмы из источника, в предположении, что он равен газовому потоку I_g .

С другой стороны, оценка, проведенная в предположении газо-динамического режима продольных потерь, дает для τ_c такую же величину: $\tau_c = K \times L/(2v_s) \approx 10^{-4} \text{ с}$, где $K=4$ – пробочное отношение, $L=1.7 \text{ м}$ – расстояние между пробками, $v_s \approx 4.5 \times 10^6 \text{ см/с}$ – ионно-звуковая скорость.

Следовательно, аномально больших потерь плазмы поперек магнитного поля в нашем случае нет.

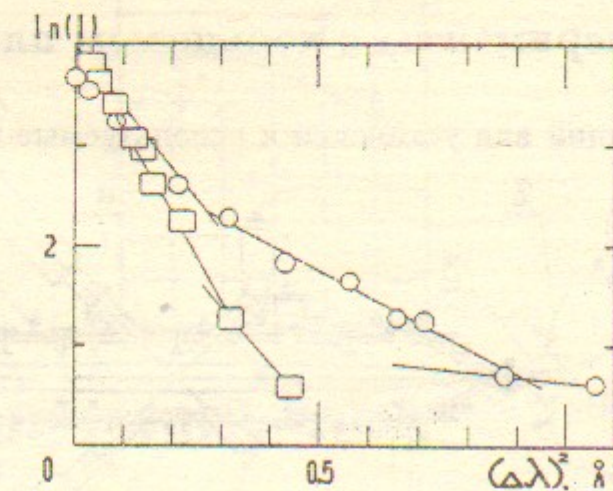


Рис. 5. Спектр линии H_β .

На основании проведенных исследований был разработан и изготовлен источник мишенной плазмы для установки ГДЛ. Первые эксперименты по инъекции в эту установку показали, что заполнение области удержания с объемом около 500 литров происходит успешно, и создаваемая плазма обладает необходимыми параметрами.

Эксперименты с кольцевым плазменным источником на ГДЛ

Общий вид установки и используемые диагностики показаны на рис.6.

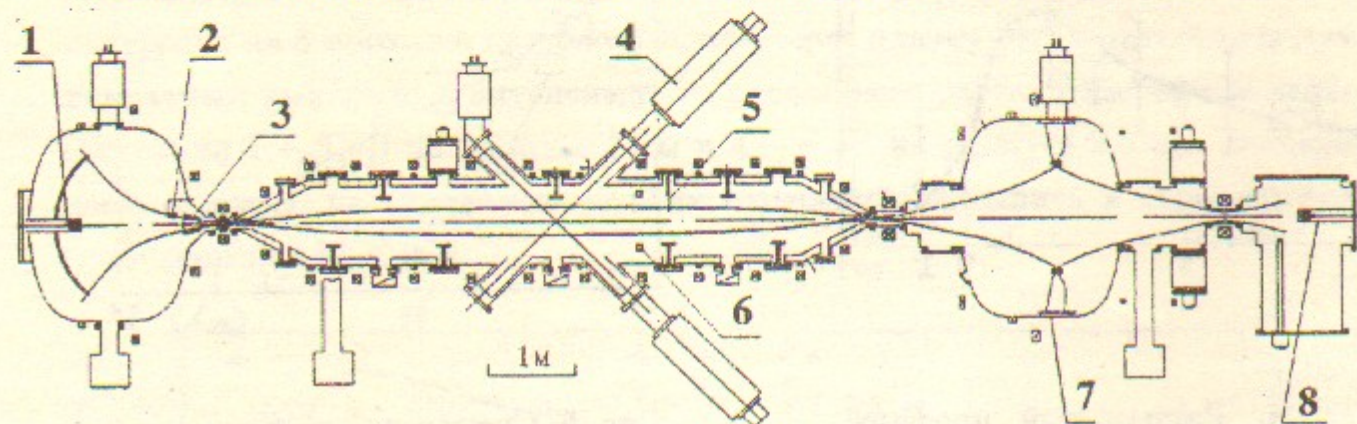


Рис.6. Установка ГДЛ

1 - осевая плазменная пушка, 2 - сеточный зонд, 3 - кольцевая плазменная пушка, 4 - атомарные инжекторы, 5 - тройной зонд, 6 - диамагнитная петля, 7 - стабилизатор КАСП, 8 - плазменная пушка КАСПа.

Положение плазменной пушки в ГДЛ соответствует локальному пробочному отношению ≈ 4 (примерно 15 см от пробки).

Магнитное поле в центральной части во всех экспериментах составляло 2.2 кГс, пробочное отношение равнялось, как правило, 12. Во время работы пушки плазма заполняет внутреннюю по отношению к струе (под струей понимается поток плазмы из разрядной щели, истекающий по силовым линиям магнитного поля) область с характерным временем около 1 мс, что соответствует коэффициенту поперечной диффузии порядка $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$. Эта величина превышает боровский коэффициент диффузии примерно в 10 раз, что свидетельствует о конвективной природе поперечного переноса.

Длительность работы пушки 4 мсек. К концу этого времени электронная плотность в центральной части достигала $3 - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а электронная температура - 2-3 эВ. В струе плотность выше в 1.5 раза. Средний радиус струи в центральной части ловушки 13 см, но менее плотная плазма существует вплоть до радиуса, соответствующего лимитеру. Линейная плотность плазмы, измеренная по ослаблению водородных пучков, составила величину $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Профили электронной температуры и плотности в центральной части установки в конце работы пушки, измеренные тройным зондом [4], изображены на рис.7 а и б.

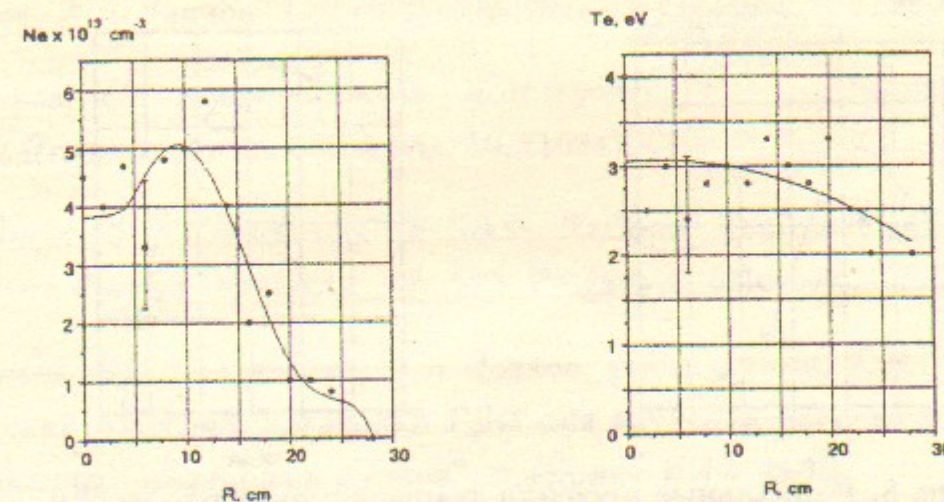


Рис.7. Радиальные профили температуры и плотности в установке "ГДЛ"

Двухсеточным зондом, установленным в расширителе на расстоянии 70 см от пробки, был измерен суммарный поток плазмы из пробки на различных радиусах и при различных пробочных отношениях. При пробочном отношении 12 профиль потока соответствовал профилям плотности и температуры в центральной плоскости установки вплоть до силовых линий, проецирующихся на внутренний (катодный) конус пушки. На больших радиусах поток плазмы зарегистрирован не был. Величина потока определялась газодинамическим истечением из ловушки и с точностью до ошибки измерения (50%) равнялась величине, оцениваемой в соответствии с формулой (18) работы [5] ($q \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}/\text{с}$ на оси установки). С увеличением пробочного отношения приосевой поток из ловушки падает, но на радиусах, соответствующих катоду, появляется заметная область отраженного от пробки потока плазмы, инжектируемого из пушки. Толщина отраженного слоя определена в 1.5 - 2 см. При достаточно больших пробочных отношениях (30 - 50) отраженный поток становится много больше выходящего из пробки и при $R=40$ составляет 10-20% от полного потока из пушки.

Первые эксперименты по захвату мощных атомарных пучков

Измерения профилей плотности и температуры проводились также со включенной инъекцией мощных атомарных пучков. Энергия инъекции для каждого из шести инжекторов равнялась 15 кэВ, полная инжектируемая мощность - 2.5 МВт, мощность, захваченная плазмой, достигала 1.4 МВт.

На рис. 8 а и б показаны профили плотности и электронной температуры в момент, соответствующий максимальному току инъекции (пробочное отношение 12).

Как видно из рисунка, температура характеризуется практически однородным радиальным профилем вплоть до радиуса лимитеров, а относительная малость ее величины ($T_e \sim 15 \text{ эВ}$) свидетельствует о более интенсивных потерях энергии, чем ожидалось в рамках существующей для ГДЛ модели энергетического баланса [6].

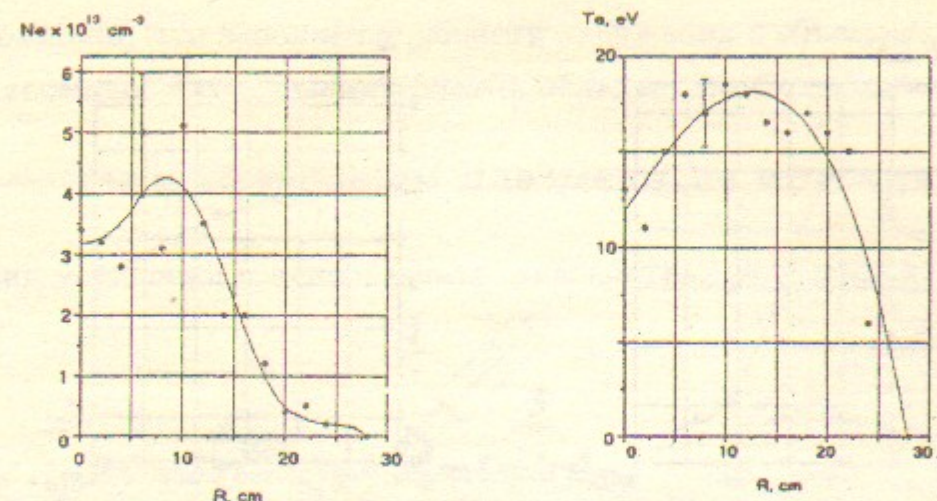


Рис. 8. Радиальные профили температуры и плотности при инъекции атомарных пучков.

Предварительные эксперименты показали, что увеличение запаса устойчивости, увеличение начальной плотности мишенной плазмы и ее температуры не влияют на эти потери.

Возможной причиной повышенных потерь может быть нарушение равновесия в системе во время инъекции, отчего происходит интенсивное перемешивание холодной периферийной и нагреваемой внутренней плазмы. Механизм нарушения равновесия описан в [7] и может быть связан с неоднородностью инъекции атомарных пучков и азимутальной неоднородностью мишенной плазмы.

В дальнейших экспериментах предполагается разобраться именно с этими проблемами.

Заключение

Основные результаты работы таковы:

- Разработанный кольцевой газоразрядный источник создает мишенную плазму с близкими к требуемым величинам значениями плотности, эффективной толщины и электронной температуры в большом объеме, соизмеримом с объемом Водородного прототипа;
- Плазменная струя проходит в ловушку почти без отражения от пробки;
- Несмотря на сильную диффузию плазмы к оси системы, в ней отсутствуют аномально большие потери частиц поперек магнитного поля;
- При нагреве плазмы обнаружился дополнительный канал потерь энергии из плазмы. Возможной причиной является нарушение равновесия вследствие неодинаковой работы атомарных инжекторов и азимутальной неоднородности мишенной плазмы;

Для подавления дополнительного канала потерь необходимо продолжить эксперименты с кольцевой пушкой на ГДЛ.

Работа выполнена при поддержке фонда МНТЦ, грант 050-94.

Список литературы

- [1] Г.И. Димов, А.А. Иванов, Г.В. Росляков. Физика Плазмы, 8, (1982), 970.
- [2] В.Н. Бочаров, С.Г. Константинов, А.М. Кудрявцев, О.К. Мыскин, В.М. Панасюк, Ф.А. Цельник. Физика Плазмы, 10, (1984), 619.
- [3] V.N. Bocharov, S.D. Kravchenko. in Sixth National Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostic, ed. M.I. Pergament (Moscow, TRINITY, 1993).
- [4] А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.А. Иванов, С.В. Кузьмин, Т.В. Саликова. "Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инъекции мощных атомарных пучков", препринт ИЯФ 93-70.
- [5] В.В. Мурнов, Д.Д. Рютов. "Газодинамическая ловушка", препринт ИЯФ 88-70.
- [6] Bagryansky P.A., Bender E.D., Ivanov A.A., Krahl St., Noack K., Karpushov A.N., Murakhtin S.V., Shikhovtsev I.V. Neutral Particle Balance in GDT with Fast Titanium Coating to the First Wall. // In: Abstracts of 1995 IEEE International Conference on Plasma Science. — 1995. — Madison, Wisconsin, USA. — P.200, University of Wisconsin - Madison (1995).
- [7] I.A. Kotelnikov. "Plasma equilibrium at intense injection of neutral beams", preprint Budker INP 95-33.