

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

П.А.Багрянский, А.А.Лизунов, В.В.Максимов

ПОДДЕРЖАНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА
В МИШЕННОЙ ПЛАЗМЕ ГДЛ
МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИИ ХОЛОДНОГО ГАЗА

ИЯФ 99-8

Новосибирск

1999

**Поддержание материального баланса
в мишенной плазме ГДЛ
методом инъекции холодного газа**

П.А.Багрянский, А.А.Лизунов, В.В.Максимов

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

На установке «Газодинамическая ловушка» реализован и исследован метод поддержания материального баланса плазмы в эксперименте инъекцией холодного газа. Были получены высокие параметры плазмы и проведено изучение существующих каналов потерь энергии. Показано, что профили плотности и температуры плазмы имеют максимум на оси. В результате проведенных экспериментов продемонстрировано, что данный метод может являться эффективной альтернативой источнику плазмы в перспективе наращивания мощности и длительности атомарной инъекции и достижения более высоких параметров плазмы.

Cold-gas plasma fueling in the GDT experiment

P.A.Bagryansky, A.A.Lizunov, V.V.Maximov

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia, Email: lizunov@inp.nsk.su

Abstract

The cold-gas plasma fueling method was applied in GDT experiments to maintain plasma density during the neutral beam injection pulse. High plasma parameters were achieved and an analysis of the existing energy loss channels was conducted. It was shown that the method presents a robust approach to plasma fueling in next experiments in the Gas Dynamic Trap with more powerful NB injection.

1. Введение

Экспериментальная программа на установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) [1] сфокусирована на исследовании различных аспектов физики удержания двухкомпонентной плазмы, интересных с точки зрения проекта источника нейтронов с энергиями 14 МэВ на базе ГДЛ [2].

Плазма в ГДЛ состоит из двух компонент: фоновой или «мишенной» плазмы с температурой в несколько электронвольт и плотностью $\sim 5 \cdot 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, которая удерживается в газодинамическом режиме [3], и популяции быстрых ионов с энергиями 10-15 кэВ, образующейся при инжекции в плазму пучков атомарного водорода. Быстрые ионы имеют длину рассеяния на угол порядка единицы, много большую, чем расстояние между магнитными пробками, и удерживаются адиабатически [4]. Параметры мишенной плазмы, как в экспериментах на ГДЛ, так и в проекте нейтронного источника, должны находиться в определенном диапазоне, чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточный захват инжектированных атомарных пучков, с другой, не вызывать слишком интенсивного рассеяния образовавшихся быстрых ионов. Поскольку длительность импульса инжекции на ГДЛ составляет 1.2 мс, а полное время жизни вещества в этих условиях ~ 600 мкс, для поддержания стационарных условий взаимодействия пучков с плазмой необходимо тем или иным способом поддерживать материальный баланс плазмы.

Традиционным для экспериментов на ГДЛ является сценарий, где создание начальной «мишенной» плазмы и поддержание баланса вещества при инжекции осуществляется источником плазмы, расположенным в одном из расширителей, а МГД-устойчивость плазмы обеспечивается антипробкотроном (каспом). Однако, многолетний опыт эксплуатации источника плазмы выявил некоторые существенные недостатки его использования в таком качестве. Из них следует выделить:

1. Значительная электрическая мощность (2-5 МВт), потребляемая источником плазмы. Это делает проблематичным его применение в установках типа нейтронного источника и его водородного прототипа [5], рассчитанных на стационарный и квазистационарный режимы работы.
2. Ухудшение вакуумных условий в расширителе, где расположен источник плазмы за счет отражения от пробки значительной доли инжектируемого плазменного потока.
3. Дополнительные потери энергии из плазмы через пробку на работающий источник плазмы. Последний эффект обусловлен обменом электронами между плазмой в центральной ячейке ГДЛ и плотной и отно-

сительно холодной плазмой из источника, проникающей достаточно глубоко в пробочную область.

Помимо этого поток плазмы из источника вносит «побочный» положительный вклад в запас устойчивости системы относительно МГД-колебаний. Поэтому представляет отдельный интерес изучить стабилизирующие свойства каспа как МГД-якоря и оценить его потенциальные возможности, имея в виду дальнейший прогресс в параметрах плазмы. Указанные замечания стимулируют поиск альтернативного метода поддержания материального баланса плазмы в эксперименте, свободного от недостатков источника плазмы.

Таким методом может быть инжекция в плазму холодного газа (молекулярного водорода). Подобные эксперименты проводились в свое время на установке 2ХИВ [6], на ряде других установок [7] и дали определенные результаты. С использованием инжекции холодного газа для поддержания материального баланса плазмы сценарий эксперимента на установке ГДЛ модифицируется следующим образом. На первом этапе при помощи источника плазмы создается начальная «мишенная» плазма, на которой захватывается достаточная мощность атомарной инжекции и формируется популяция быстрых ионов. В дальнейшем поступление вещества в плазму происходит за счет ионизации холодного газа, подача которого начинается в заданный момент в течение инжекции. Поток газа должен компенсировать потери вещества через пробки, ~ 1 экв. кА в условиях эксперимента. Простые оценки показывают, что для ионизации поступающего газа требуется мощность ~ 50 кВт, что составляет порядка 5% от мощности атомарной инжекции, захватываемой в плазму (2 МВт). Оценки для глубины проникновения нейтрального газа в плазму с учетом процессов диссоциации, диссоциативной рекомбинации, ионизации электронным ударом и перезарядки дают величину ~ 5 см (для параметров «мишенной» плазмы, характерных для ГДЛ). Формирующийся в этих условиях профиль плотности плазмы должен иметь максимум на периферии, где сосредоточены источники вещества. Однако, такой вид распределения не является устойчивым, и следует ожидать заполнения приосевой области за счет процессов турбулентного поперечного переноса.

2. Экспериментальная установка и сценарий эксперимента

Схема установки Газодинамическая ловушка приведена на рис.1.

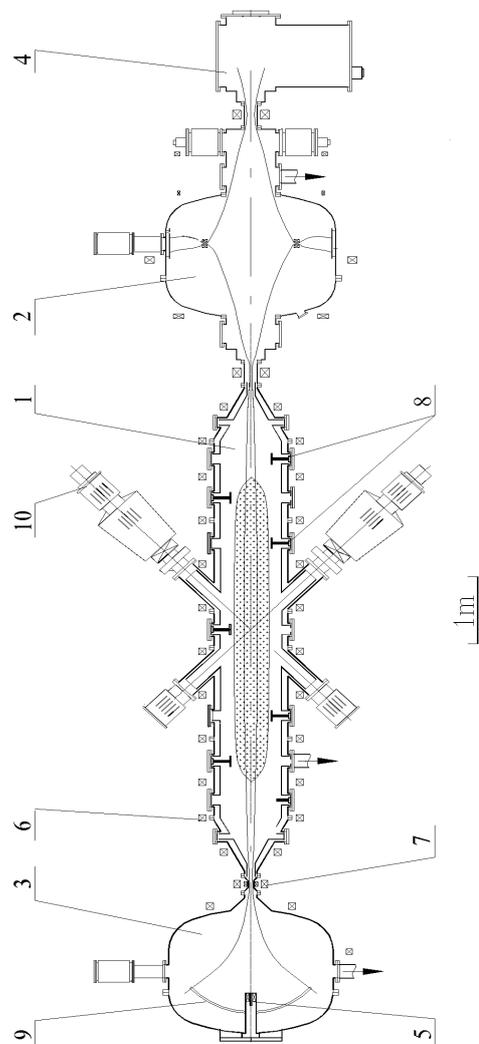


Рис. 1. Схема установки ГДЛ.

1 - вакуумная камера центральной части, 2 - вакуумная камера каспа, 3 - вакуумная камера расширителя, 4 - торцевой бак, 5 - источник плазмы, 6 - катушки основной магнитной системы, 7 - пробочные магнитные катушки, 8 - электродуговой испаритель титана, 9 - приемник плазмы, 10 - атомарный инжектор СТАРТ-3.

Для проведения экспериментов с инжекцией холодного газа было изготовлено специальное устройство, позволяющее осуществлять регулируемый напуск газа (молекулярного водорода) в вакуумную камеру. Это устройство, т.н. газ-бокс (gas-box в англоязычной литературе), представляло собой кольцеобразный резервуар с набором радиально расположенных отверстий для выпуска газа на внутренней стороне (см. рис.2). Газ из баллона подавался в резервуар при срабатывании импульсного клапана, время включения которого задавалось от компьютера через общую систему управления [8], действующую на установке ГДЛ. Количество инжектированного газа могло регулироваться в широких пределах путем задания нужного давления в баллоне. Поскольку напуск газа осуществлялся через буферный объем внутри кольцеобразного резервуара, обеспечивалась равномерная по радиусу и стационарная на время существования плазмы инжекция. Устройство размещалось в центральной ячейке ГДЛ со стороны источника плазмы в пробочном отношении $R \sim 4.2$.

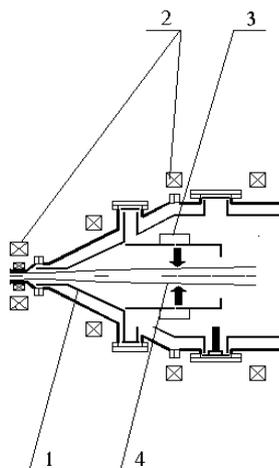


Рис. 2. Схематичное изображение устройства для напуска газа.

1 - стенка вакуумной камеры центральной части ГДЛ, 2 - катушки основной магнитной системы, 3 - газ-бокс (стрелками показано направление инжекции газа), 4 - плазма.



Рис. 3. Временной сценарий эксперимента.

Временной сценарий эксперимента проиллюстрирован рис.3. Начальная плазма в эксперименте создавалась при помощи источника (поз. 9 на рис.1), работавшего в течении 2.8 мс. Поддержание материального баланса плазмы при инжекции атомарных пучков осуществлялось напуском газа, который начинался в момент 2.5 мс.

Измерение параметров плазмы в экспериментах осуществлялось при помощи набора диагностик, описанных в [9]. Измерение профилей плотности и температуры плазмы проводилось системой томсоновского рассеяния и тройными ленгмюровскими зондами. Для измерения потерь энергии и частиц через пробки использовались пироэлектрический болометр и измеритель потока ионов, расположенные в расширителе. Поперечные потери энергии измерялись при помощи лимитеров-калориметров, расположенных в околопробочных областях и в экваториальной плоскости.

3. Результаты экспериментов

В экспериментах с инжекцией холодного газа была создана плазма с характерной плотностью $\sim 1.5 \div 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температурой электронов $\sim 60 \text{ эВ}$. Профили плотности и температуры плазмы показаны на рис.4 и рис.5. Их вид свидетельствует о существовании эффективного механизма «перемешивания» плазмы при начальном профиле плотности, имеющем максимум на периферии, в области расположения источников вещества. Причиной быстрого заполнения приосевой области может служить неустой-

чивость, например, температурно-дрейфовая, развивающаяся в плазме с противоположными направлениями градиентов плотности и температуры.

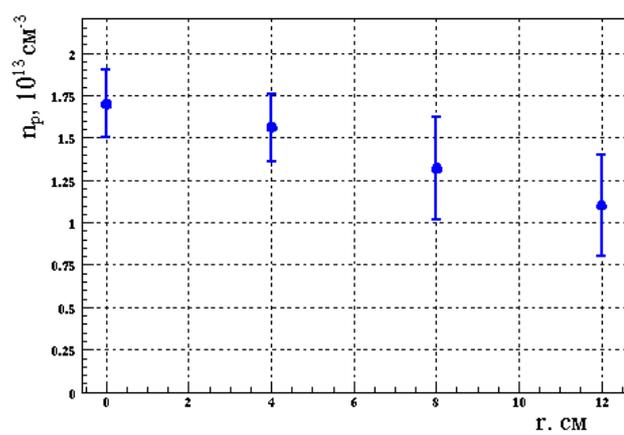


Рис. 4. Профиль плотности плазмы.

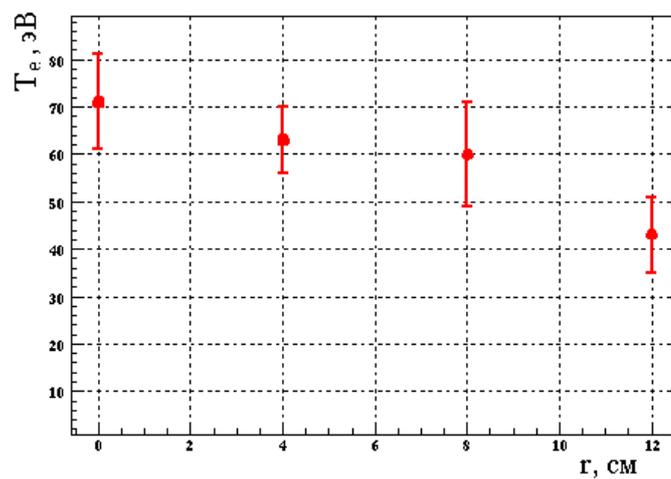


Рис. 5. Профиль электронной температуры плазмы.

Для построения замкнутой картины энергетического баланса плазмы использовалась численная модель [10], позволявшая рассчитывать макроскопические параметры плазмы: энергосодержание в «мишенной» плазме и быстрых ионах, мощность атомарной инжекции, захватываемую в плазме, мощность нагрева электронов «мишенной» плазмы быстрыми ионами, а также мощности продольных потерь энергии и потерь на перезарядку. Входными данными являлись измеренные в эксперименте распределения плотности и температуры плазмы и характеристики атомарной инжекции. Сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными позволило извлечь максимум сведений о характерных масштабах существующих каналов потерь энергии из плазмы.

Сводка энергетического баланса плазмы для режима с инжекцией холодного газа представлена в Таблице 1. Там же для сравнения приведены соответствующие величины, характерные для режимов с использованием одного источника плазмы [11].

Таблица 1

Параметр	Инжекция газа	Пл. Пушка
Энергия в быстрых ионах	300 Дж	500 Дж
Энергия в «мишенной» плазме	100 Дж	150 Дж
Захватенная мощность	2 МВт	2.2 МВт
Торможение б. ионов на электронах	0.9 МВт	1.5 МВт
Потери на ионизацию	40 кВт	—
Продольные потери *	210 кВт	600 кВт
Поперечные потери	500 кВт	200 кВт
Потери на излучение	190 кВт	200 кВт
Аномальные потери	—	500 кВт

* Имеются в виду газодинамические потери через пробки (см. [3])

В потери энергии на излучение включены также и перезарядные потери. Приведенные здесь параметры представляют собой величины, усредненные по характерному времени их изменения, равному ~1 мс. При достаточно близких значениях мощности нагрева «мишенной» плазмы (0.9 МВт и 1.5 МВт) роль тех или иных каналов потерь в энергетическом балансе различна для разных режимов. Вместе с тем, суммарная мощность потерь энергии по всем наблюдаемым каналам в экспериментах с инжекцией газа хорошо согласуется с величиной мощности нагрева плазмы, в то время как для режима с источником существенным является дополнительный канал, связанный с

электронной теплопроводностью на поток плазмы из газоразрядной ячейки пушки.

С целью изучения возможностей метода инъекции холодного газа для поддержания квазистационарного состояния плазмы была проведена серия экспериментов с «распределенной» атомарной инъекцией. В этих экспериментах последовательно включались пары противоположно расположенных инжекторов с задержкой 1 мс, так что полная длительность инъекции составляла ≈ 3 мс.

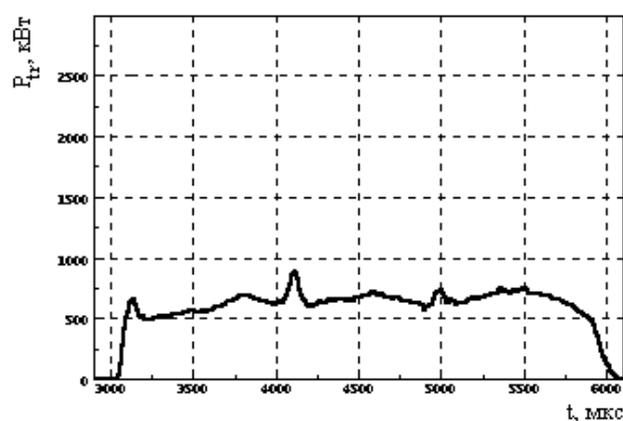


Рис. 6. Оциллограмма мощности, захватываемой в плазму.

На рис.6 представлена временная зависимость мощности атомарной инъекции, захватываемой в плазму. На рис.7 и рис.8 продемонстрированы оциллограммы электронной температуры и плотности плазмы соответственно (приведены данные «выстрела» №131, характерные для описанного режима). Приведенные результаты показывают, что значения плотности и температуры плазмы незначительно меняются в течение импульса атомарной инъекции при постоянной мощности нагрева. Основываясь на этом, можно заключить, что возможность регулировать в широких пределах интенсивность напуска газа позволит в перспективе поддерживать материальный баланс плазмы в эксперименте в условиях увеличенной мощности и длительности атомарной инъекции.

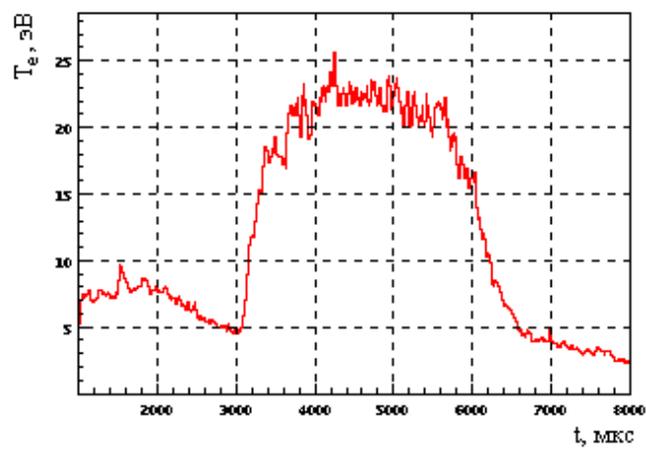


Рис. 7. Осциллограмма электронной температуры плазмы.

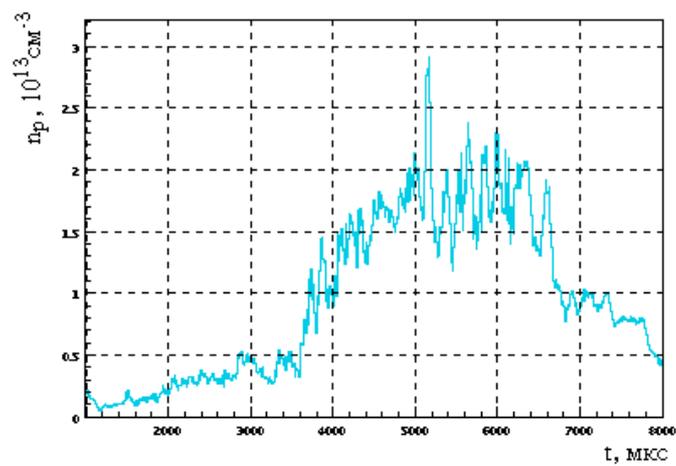


Рис. 8. Осциллограмма плотности плазмы.

4. Заключение

Проделанные эксперименты показали возможность использования метода напуска холодного газа для поддержания материального баланса плазмы в условиях атомарной инжекции на установке ГДЛ, и выявили его положительные стороны, по сравнению с использованием источника плазмы, а также некоторые недостатки. Измеренный профиль плотности плазмы, формирующийся при инжекции газа, имеет максимум на оси. Параметры плазмы были достаточно близки к максимальным значениям, достигнутым на сегодняшний день в экспериментах на ГДЛ. Возможность же управлять интенсивностью напуска газа дает возможность работать в широком диапазоне параметров плазмы. Эксперименты с увеличенной длительностью импульса атомарной инжекции продемонстрировали, что используя напуск газа для подпитки плазмы веществом, удастся добиться квазистационарных профилей температуры и плотности при практически постоянной мощности нагрева плазмы. Полученные результаты позволяют предлагать данный метод с возможными усовершенствованиями как альтернативу источнику плазмы в планируемых экспериментах с увеличенной энергетикой атомарной инжекции, рассчитывая на дальнейший прогресс в параметрах плазмы. Вместе с тем, остается некоторая проблема, связанная со значительным уровнем поперечного переноса, вызванным спецификой периферийной инжекции газа в плазму. В этой связи планируется дополнительное исследование и совершенствование метода для уменьшения данного канала потерь энергии.

Благодарности.

Авторы выражают благодарность А.М.Кудрявцеву и А.А.Иванову за полезные замечания в ходе работы, О.К.Мыскину за техническую поддержку, А.Н.Карпушову за помощь в проведении экспериментов и предоставление численных кодов для расчетов параметров плазмы.

Данная работа была выполнена при частичной поддержке Международного Научно - Технического Центра, проект № 492.

Литература

- [1] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. «Газодинамическая ловушка». Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер. Термоядерный синтез, 1980, вып.1(5), с.57.
- [2] Ivanov A.A., Ryutov D.D. «Mirror-based neutron sources for fusion technology studies». Nucl. Science and Engineering, v.106, p.235 (1990).

- [3] Мирнов В.В., Ткаченко О.А. «Распределение электростатического потенциала в газодинамической ловушке». Новосибирск, 1986, (Препринт /Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 86-28).
- [4] Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Bocharov V.N, et al. «Characterization of Sloshing Ions in the GDT Experiment». Proc. of Int. Conf. On Open Plasma Confinement Systems for Fusion, Novosibirsk 1993. Ed. A.A.Kabantsev, "World Scientific", Singapore, 1994, p.311.
- [5] A.I. Gorbovsky, V.V. Mishagin, V.H. Lev, et. al., «Hydrogen prototype of a plasma neutron source». Report Budker INP 95-90, 1995.
- [6] Coensgen F.H., Clauser J.F., Correll D.L. e.a. «2XIB Plasma Confinement Experiments» Proc. of the VI Intern. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion Research. (1976, Berchtesgaden), Vienna: IAEA, 1977, v.3, p.135.
- [7] Summary of TMX-U Results: 1984. Ed. Simonen T.C. Livermore, CA, 1984, (Report/Lawrence Livermore National Laboratory; UCID-20274)
- [8] P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, S. Collatz, et al. «Recent Results of Experiments on the Gas Dynamic Trap» Proc. of the International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, Russia, July 27-31, 1998. Transactions of Fusion Technology (ANS). v.35, № 1T, FUSTE8(1) (1999), p.79-86.
- [9] A.V.Anikeev, P.A. Bagryansky, P.P. Deichuli, et al., «Diagnostics for Measurement of High β Plasma Parameters in the Gas Dynamic Trap», Proc. 1998 Intern. Congress on Plasma Physics combined with the 25th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Prague, Czech Republic, June 29 - July 3 1998, Report P1.057 (1998).
- [10] Карпушов А.Н. Энергетический баланс плазмы в Газодинамической ловушке при инжекции атомарных пучков: Дисс. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1997.
- [11] A.N.Karpushov, A.V.Anikeev, P.A.Bagryansky, et al. «Energy Confinement of the High β Two-Component Plasma in the Gas-Dynamic Trap», Proc. of the International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, Russia, July 27-31, 1998. Transactions of Fusion Technology (ANS). v.35, № 1T, FUSTE8(1) (1999), p.190-195.