

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

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

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПЛАЗМЫ
КОНЕЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГДЛ
С ПОМОЩЬЮ ОСЕВОЙ ПОДАЧИ ГАЗА

ИЯФ 2000-31

Новосибирск

2000

Эксперименты по изучению плазмы конечного давления в ГДЛ с помощью осевой подачи газа

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

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

Аннотация

В экспериментах на установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) с применением осевой инжекции газообразного водорода была получена плазма с энергосодержанием ~900 Дж и электронной температурой на оси 80-90 эВ, радиус плазмы составлял ~4 см. Давление плазмы составляло до 25% от давления удерживающего магнитного поля. Получены первые результаты в экспериментах по изучению МГД-устойчивости плотной мишенной плазмы при стабилизации каспом и роли радиального электрического поля плазмы в этой проблеме.

Study of High beta Plasma in Gas Dynamic Trap Experiments and Investigation of the Plasma MHD Stability.

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

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

In the recent experiments on the Gas Dynamic Trap (GDT) of on axis gas plasma fuelling the energy content of plasma was measured to be ~900 J, electron temperature on the axis was 80-90 eV and the plasma radius was 4.5 cm. The method is proven to be reliable under conditions of increased neutral beam power and duration, which is planned to be realized in the near future. The first results in the experimental campaign devoted to the plasma MHD stability study were gained and the directions of next experimental efforts were appointed.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера

1. Введение

Важной задачей для проекта генератора нейтронов на основе ГДЛ [1,2] является создание популяции быстрых («плещущихся») ионов значительной плотности. На установке ГДЛ популяция быстрых ионов образуется в результате захвата шести атомарных пучков с энергиями 12-15 кэВ и общим током $\cong 150$ экв. ампер, инжектированных под углом 45° в мишенную плазму. Длина свободного пробега захваченного иона относительно рассеяния в конус потерь много больше расстояния между пробками (7 м), так что они удерживаются в ловушке вследствие сохранения адиабатического инварианта. Столкновительная мишенная плазма удерживается в газодинамическом режиме [1]. Устойчивость системы относительно крупномасштабных мод желобковых МГД-колебаний в первых экспериментах на ГДЛ обеспечивалась потоками плазмы, истекающих через пробки в области расширителей с благоприятной кривизной силовых линий магнитного поля. В последующих сериях экспериментов для этого использовался антипробкотрон (касп), позволяющий добиться более устойчивого удержания и получить лучшие параметры плазмы.

В ходе экспериментов на установке ГДЛ в 1997-1999 гг. был развит и успешно применялся метод поддержания баланса частиц мишенной плазмы периферийной инжекцией газообразного водорода [5]. Этот метод доказал свою работоспособность в режимах с высоким β и позволил получить параметры плазмы на уровне рекордных показателей для режимов с использованием только источника плазмы [4]. Помимо этого, метод позволил обойти ряд трудностей, имевших место в «пушечных» режимах, а именно: потери энергии из плазмы по каналу продольной теплопроводности, возникающие вследствие проникновения потока плотной и холодной плазмы из пушки в области с малой степенью расширения; значительный вклад в МГД-устойчивость, вызванный тем же эффектом, что существенно затрудняет исследование условий и границы стабилизации каспом. Однако

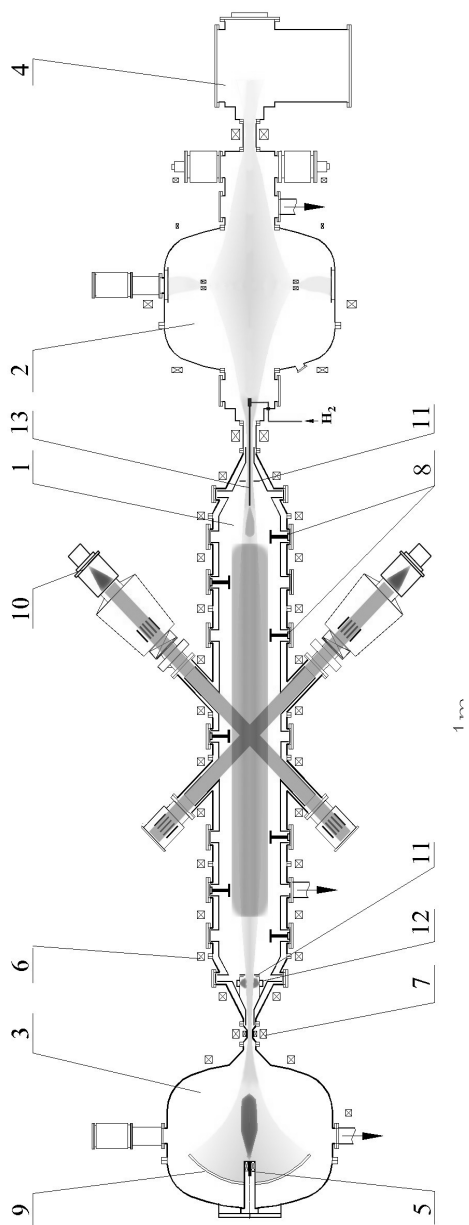


Рис.1. Установка ГДЛ. 1 - вакуумная камера центральной части, 2 - вакуумная камера катодов, 3 - вакуумная камера расширителя, 4 - торцевая камера, 5 - плазменная пушка, 6 - катушка основной магнитной системы, 7 - пробочная магнитная катушка, 8 - электродуговой испаритель титана, 9 - приемник плазмы, 10 - атомарный инжектор СТАРТ-3, 11 - лимитер, 12 - устройство для периферийной инжекции газа (газ-бокс), 13 - устройство для осевой инжекции газа.

специфика периферийной инжекции газа приводит к интенсивному взаимодействию образующейся плазмы с лимитерами и потерям энергии, что было экспериментально установлено. От этого недостатка был бы избавлен метод инжекции газа на ось ловушки со стороны одной из пробок. Для его реализации была необходимым образом изменена конструкция системы напуска молекулярного водорода в установку и проведен ряд экспериментов.

2. Установка ГДЛ и сценарий эксперимента

Схема экспериментальной установки газодинамическая ловушка приведена на рис.1.

Система напуска газа включала кварцевую трубку, введенную в центральную ячейку ГДЛ по оси через пробку со стороны вакуумной камеры кэспа (см. рис.1), подводящую трубку и импульсный газовый клапан. Задавая давление газа в клапане, а также изменяя длительность его работы, в эксперименте можно было добиваться значений потока в пределах $100 \cdot 3 \cdot 10^3$ экв. ампер, что перекрывает характерный диапазон значений потерь частиц из мишенной плазмы за счет продольного истечения. Временная



Рис.2. Сценарий эксперимента с осевой инжекцией молекулярного водорода.

последовательность включения источника плазмы, напуска газа и атомарной инжекции изображен на рис.2. Стартовая мишенная плазма, необходимая для захвата атомарных пучков и ионизации поступающего холодного газа, генерировалась при помощи источника плазмы, работавшего в течение 2.8 мс. Поддержание баланса частиц мишенной плазмы в течение импульса атомарной инжекции осуществлялось потоком молекулярного водорода. Кэсп, использовавшийся в качестве МГД-якоря в эксперименте, обеспечивал достаточный запас устойчивости. Измерение параметров плазмы и атомарной инжекции осуществлялось набором диагностик,

описанных в [6]. Для измерения радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы применялась система томсоновского рассеяния. Потери энергии на лимитеры измерялись при помощи термопар, расположенных на их поверхности.

3. Результаты экспериментов с осевой инъекцией нейтрального газа

В экспериментах с осевой инъекцией молекулярного водорода была создана плазма с плотностью $\sim 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и электронной температурой на оси 80-90 эВ. Измеренные профили электронной температуры на оси и плотности плазмы приведены на рис.3 и рис.4.

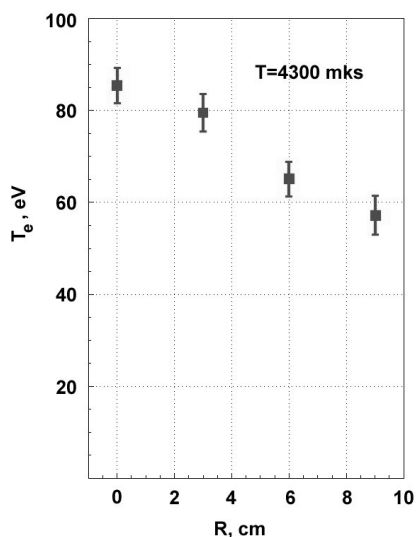


Рис.3. Электронная температура плазмы (томсоновское рассеяние).

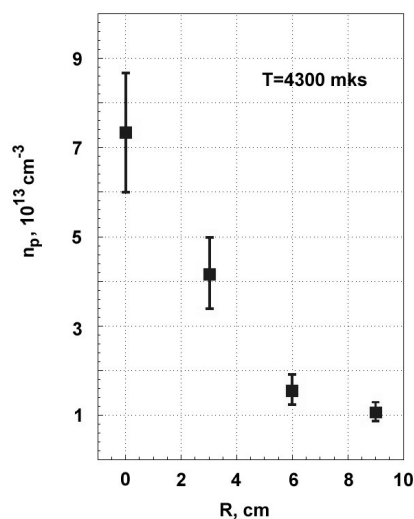


Рис.4. Плотность плазмы (томсоновское рассеяние).

Профили были измерены при помощи томсоновского рассеяния в момент времени 4.3 мс, соответствующий максимальным значениям энергосодержания в плазме. Можно заметить, что отсутствует сколько-нибудь заметный провал в профиле T_e , происхождение которого можно было

бы связать с охлаждением приосевых областей плазменного шнура за счет теплопроводности на трубку для подачи газа, расположенную в районе пробки. Это имеет место благодаря тому, что трубка проецируется вдоль силовых линий магнитного поля на небольшую площадь в центральную плоскость ловушки. Согласно приведенным экспериментальным распределениям, в данном режиме плазменный шнур имеет относительно малый радиальный размер, $\cong 4$ см, что свидетельствует в пользу отсутствия МГД-неустойчивостей.

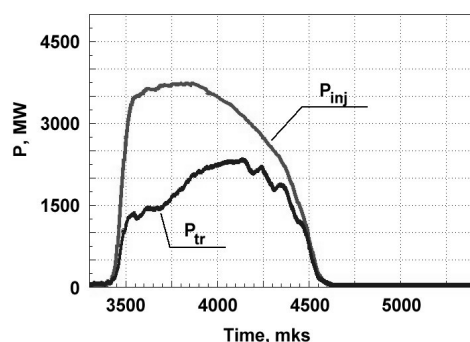


Рис.5. Инжектированная и захваченная в плазму мощность атомарных пучков.

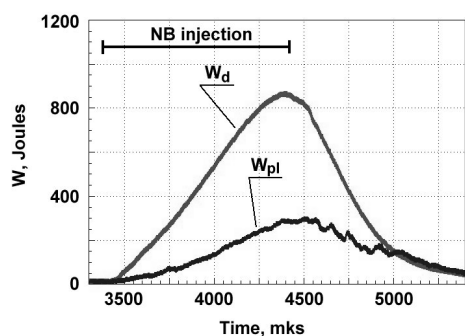


Рис.6. Диамагнетизм двухкомпонентной плазмы (W_d) и мишенной плазмы (W_{pl}).

На рис.5 и рис.6 показаны осциллограммы инжектированной и захваченной в плазму мощности атомарных пучков, а также диамагнетизм двухкомпонентной плазмы. Для анализа энергетического баланса плазмы использовались экспериментальные результаты и данные, полученные при помощи численного кода FPM. Основные параметры энергетического баланса плазмы приведены в таблице 1.

Характерный временной масштаб изменения энергосодержания в популяции быстрых ионов и мишенной плазме составляет ~ 1 мс. Поэтому при анализе «глобальных» показателей энергетического баланса плазмы имеет смысл приводить мощности потерь, усредненные по этому интервалу времени (см. табл.1) в конце импульса атомарной инжекции, когда диамагнетизм плазмы достигает максимума.

Инжектированная мощность	3.2 ± 0.1 МВт
Захватенная мощность	2.0 ± 0.1 МВт
Мощность торможения на электронах	750 ± 50 кВт
Продольные потери	410 ± 40 кВт
Потери на лимитеры	240 ± 30 кВт
Затраты на ионизацию газа	~ 100 кВт

Таблица 1. Энергетический баланс плазмы в экспериментах с осевой инжекцией молекулярного водорода.

Мощность потерь энергии из популяции быстрых ионов на перезарядку, измеренная при помощи набора пирозлектрических болометров, не превышала 150 кВт, что несущественно на фоне захватываемой мощности, ~ 2 МВт. Доминирующим каналом потерь энергии из фоновой плазмы является газодинамическое истечение через пробки; мощность потерь на лимитеры уменьшилась более чем в 2 раза по сравнению с режимом периферийной инжекции газа [5]. Мощность, затрачиваемая на ионизацию газа, оценивалась исходя из величины потерь частиц через пробки и энергетической стоимости образования пары протон-электрон.

С целью проверки эффективности пучкового нагрева плазмы, создаваемой в эксперименте с осевым потоком газа, в перспективе увеличения мощности и длительности импульса атомарной инжекции, была произведена специальная серия «выстрелов» с последовательно включающимися парами инжекторов, так что общее время их работы составляло 3 мс. Полученные результаты позволяют утверждать работоспособность метода и возможность осуществления стационарных режимов работы. Учитывая малое потребление электроэнергии данной системой, метод осевой инжекции газа может быть предложен в качестве одного из вариантов поддержания баланса частиц мишенной плазмы в проектируемых установках, рассчитанных именно на стационарный и квазистационарный режимы работы. Помимо этого, он позволяет смоделировать эффекты при пеллет-инжекции, что также имеет большое значение для проекта многоцелевого источника термоядерных нейтронов на базе газодинамической ловушки.

4. МГД-устойчивость плазмы с высоким β в ГДЛ (первые результаты)

Одним из достоинств описанного экспериментального режима является отсутствие влияния плазменной пушки на МГД-устойчивость системы в течение импульса атомарной инжекции. В исследованном ранее режиме без использования инжекции холодного газа это влияние заключалось в значительном стабилизирующем (и трудно оцениваемом) вкладе в устойчивость плазменного столба за счет вмороженности силовых линий магнитного поля в плотную плазму, проникавшую из пушки в околопробочную область. Это существенно затрудняло исследование МГД-устойчивости плазмы в ГДЛ в режиме с высокими параметрами.

В качестве начальной стадии программы по изучению МГД-устойчивости плазмы в серии экспериментов вместо магнитной геометрии каспа была создана геометрия расширителя. Резкое снижение диамагнетизма плазмы (~500 Дж) и электронной температуры (не более 50 эВ), а также характерные колебания на осциллограммах с зонда и датчиков прошедших пучков нагревных инжекторов свидетельствуют о развитии крупномасштабной МГД-неустойчивости в этом режиме. Эти результаты подтверждают, что минимально необходимый запас устойчивости системы для достигнутых на сегодня параметрах может быть обеспечен только с применением каспа в качестве МГД-якоря.

Имеющееся в плазме радиальное электрическое поле, порядка T_e/e , и как следствие, вращение плазмы, также может приводить к развитию неустойчивостей [1]. Для оценки этого эффекта и частичной его компенсации в условиях экспериментов на установке ГДЛ были проведены специальные эксперименты с подачей на лимитеры (поз.11 на рис.1) положительного потенциала. Результаты этих экспериментов суммированы на рис.7.

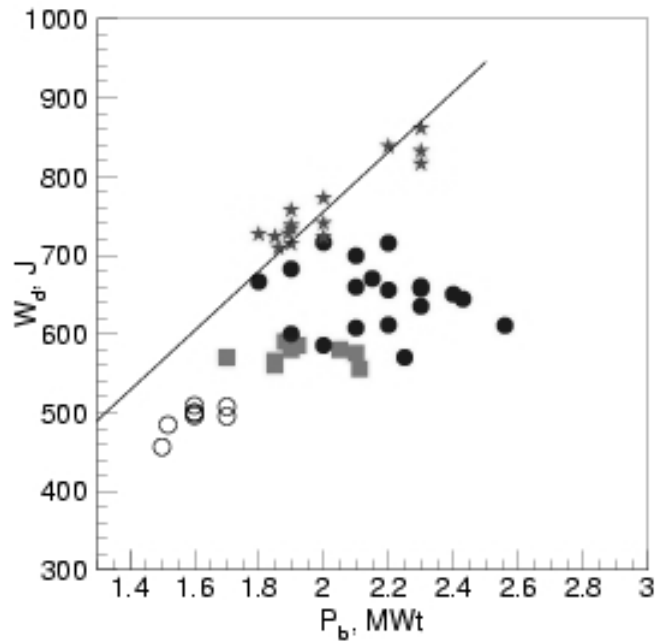


Рис.7. Параметры плазмы в ГДЛ в различных режимах с инжекцией нейтрального газа.

На рис.7 P_b и W_d – соответственно мощность атомарной инжекции, захваченная в плазму, и энергосодержание в двухкомпонентной плазме. Экспериментальные данные, изображенные заштрихованными квадратами, получены в режиме без подачи потенциала на лимитеры; точки, изображенные заштрихованными кружками, получены при потенциале лимитеров $U_{lim}=80$ 150 В; точки, изображенные звездами, получены при потенциале лимитеров $U_{lim}=190$ В. На рис.7 также отложены экспериментальные точки, соответствующие параметрам плазмы при отключенном каспе (пустые кружки).

Как видно, прирост в энергосодержании плазмы при потенциале лимитеров 190 В по сравнению с экспериментами при нулевом потенциале, составляет порядка 30%. Область параметров, соответствующая $U_{lim}=190$ В,

хорошо описывается линейной зависимостью (см. рис.7), что согласуется с представлениями теории для МГД-устойчивого режима удержания. В экспериментах же с $U_{lim}=0$ 150 В наблюдались признаки развития неустойчивостей, как и в экспериментах с выключенным каспом. Можно поэтому сделать предварительный вывод, что перераспределение амбиполярного потенциала в плазме ГДЛ, возникающее при подаче положительного потенциала на лимитеры, производит стабилизирующий эффект, увеличивая порог развития центробежной неустойчивости вращающегося плазменного шнура.

В настоящее время на установке ГДЛ ведется более детальное исследование МГД-устойчивости многокомпонентной плазмы конечного давления; также планируются эксперименты по развернутому изучению влияния радиального распределения амбиполярного потенциала плазмы на устойчивость.

5. Заключение

В проделанной серии экспериментов с применением осевого напуска холодного газа была получена плазма с электронной температурой ~ 80 эВ и плотностью на оси $\sim 7 \cdot 10^{13}$ см³ и продемонстрирована эффективность метода в перспективе увеличения мощности и длительности импульса атомарной инжекции для нагрева плазмы. Показано, что МГД-устойчивость системы относительно крупномасштабных желобковых мод обеспечивается каспом, заполненным плазмой с достаточной плотностью. Это позволяет исследовать МГД-устойчивость двухкомпонентной плазмы с $\beta=20-30\%$, удерживаемой в аксиально-симметричной открытой магнитной конфигурации, изучить стабилизирующие свойства каспа и его возможности по запасу устойчивости, а также изучить условия перехода через границу устойчивости. Вопросом, представляющим большую важность, также является исследование влияния радиального электрического поля в плазме, вызывающего дифференциальное вращение шнура и являющегося резервуаром свободной энергии для неустойчивостей, на МГД-устойчивость плазмы. Получены первые результаты; в настоящее время на установке ГДЛ ведется экспериментальная программа, охватывающая этот круг физических задач.

Благодарности

Данная работа была выполнена при частичной поддержке Международного Научно – Технического Центра (МНТЦ), 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] Давыденко В.И., Иванов А.А., Козьминых Ю.Л., Коллеров Е.П., Котельников И.А., Мишагин В.В., Подминогин А.А., Рогозин А.И., Роенко В.А., Росляков Г.В., Шрайнер К.К., «Экспериментальная модель газодинамической ловушки.» // Препринт ИЯФ СО АН СССР, N 86-104. Новосибирск, 1986.
- [4] 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.
- [5] P.A.Bagryansky, A.N.Karpushov, A.A.Lizunov, V.V.Maximov, “Cold gas Fueling Experiments in the Gas Dynamic Trap”. 26th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 14 18 June 1999, Maastricht, The Netherlands, Contributions ECA. v.23J, p.1777 1780 (1999)
- [6] 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).