

УДК 533.9

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АМБИПОЛЯРНОМУ УДЕРЖАНИЮ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ГДЛ

*А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.С. Донин, К.В. Зайцев, М.С. Коржавина, А.А. Лизунов, А.Н. Ложкина,
В.В. Максимов, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина, А.Л. Соломахин*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В физике открытых ловушек одной из ключевых проблем является проблема продольного удержания плазмы. В разные годы было предложено несколько эффективных способов ограничения продольных потоков частиц и энергии из пробкотронов: амбиполярные ячейки, гофрированные ловушки и др. В предлагаемой статье описываются результаты экспериментов по созданию эффективных амбиполярных барьеров для подавления продольных потерь из установки Газодинамическая ловушка (ГДЛ). Основной целью выполнения данной работы было экспериментальное исследование влияния амбиполярных электрических полей, создаваемых в двух дополнительных концевых пробкотронах («амбиполярных пробках») популяцией горячих анизотропных ионов, на продольное удержание плазмы в газодинамической ловушке. Эти исследования продемонстрировали улучшение продольного удержания плазмы в ГДЛ при использовании двух амбиполярных барьеров, в результате чего параметр $n\tau$ в приосевой области был увеличен более чем в 6 раз.

Ключевые слова: плазма, открытые магнитные ловушки, амбиполяльное удержание.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AMBIPOLAR PLASMA CONFINEMENT AT GDT DEVICE

*A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.S. Donin, K.V. Zaytsev, M.S. Korzhavina, A.A. Lizunov, A.N. Lozhkina,
V.V. Maksimov, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin*

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

The key problem of the mirror traps is the longitudinal plasma confinement. Over the years, several ways how to suppress the longitudinal flow of particles and energy from the mirror cell were suggested: ambipolar plugs, multi-mirror traps, etc. This paper presents the results of plasma experiment with two ambipolar end-plugs at GDT device in the Budker Institute, Novosibirsk. The main objective of the presented research was influence of electric potential created in end-plugs by neutral beam injection on axial plasma confinement at GDT. The experiment demonstrated effective suppression of longitudinal losses and improvement of plasma confinement $n\tau$ up to 6 times.

Key words: plasma, open magnetic traps, ambipolar plugs.

ВВЕДЕНИЕ

В физике открытых ловушек одной из ключевых проблем является проблема продольного удержания плазмы. В 1975 г. в Институте ядерной физики СО АН СССР (в настоящее время Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, ИЯФ СО РАН) Г.И. Димовым было предложено удерживать плазму от ухода через торцы электрическими амбиполярными барьерами, которые можно создавать в двойных пробках на концах длинной соленоидальной ловушки [1]. Позднее были проведены расчёты амбиполярной ловушки с двойными пробками и показана возможность достижения в D—T-реакторе коэффициента усиления мощности $Q \gg 1$ [2]. В Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (LLNL, США) в 1976 г. амбиполярную ловушку независимо предложили Т.К. Фаулер и Б.Г. Логан [3]. Они назвали её тандемной (tandem mirror). В 1978 г. там была запущена тандемная ловушка ТМХ [4]. На этой установке в 1979 г. прямыми измерениями было продемонстрировано многократное уменьшение продольных потерь ионов из соленоида с помощью концевых пробкотронов. Стоит отметить, что данные результаты были получены на ТМХ при инжекции в концевые пробкотроны атомарных пучков суммарной мощностью около 7 МВт.

С 2005 г. на установке ГДЛ в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) успешно проводились эксперименты с концевым компактным пробкотроном [5], который рассматривается как перспективная амбиполярная ячейка для подавления продольных потерь. В экспериментах, проведённых авторами на установке ГДЛ в 2008—2009 гг. [6], когда использовалась одна амбиполярная ячейка, установленная с одной стороны установки ГДЛ, удалось подавить продольный поток плазмы из центральной части ловушки примерно

в 5 раз. Такое значительное подавление при относительно низком потенциальном барьере (в экспериментах с одним концевым пробкотроном на установке ГДЛ высота амбиполярного барьера была порядка температуры тёплой мишенной плазмы) вызвало интерес. С целью интерпретации полученных результатов данный режим истечения подробно изучен теоретически в работе [7]. Согласно выводам этой работы, наблюдаемое значительное подавление продольных потерь может объясняться отличием режима истечения от газодинамического (в газодинамическом пределе $L \gg \lambda$, режим истечения в описываемых экспериментах на ГДЛ соответствует $L \sim \lambda$). Был исследован переходный режим между кинетическим и газодинамическим удержанием в пробочной ловушке с учётом влияния самосогласованного амбиполярного потенциала плазмы. В работе [7] показано, что в переходном режиме существует возможность существенного подавления потерь даже при небольшой высоте амбиполярного потенциала.

Логичным продолжением исследования по амбиполярному удержанию плазмы в установке ГДЛ является цикл экспериментов с двумя амбиполярными ячейками, расположенными на двух концах установки ГДЛ, представленный в данной статье. Основной целью проведения этих работ было экспериментальное исследование влияния амбиполярных электрических полей, создаваемых в дополнительных концевых пробкотронах, на продольное удержание и параметры плазмы в газодинамической ловушке.

УСТАНОВКА ГДЛ С ДВУМЯ АМБИПОЛЯРНЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

Газодинамическая ловушка [8] представляет собой длинный аксиально-симметричный пробкотрон длиной $L = 7$ м с большим ($R \sim 35$) пробочным отношением. Магнитное поле в центре ловушки может достигать значений 0,3 Тл и до 10 Тл в пробках. Плазма, удерживаемая в ГДЛ, включает два компонента ионов с сильно различающимися характерными энергиями. Один компонент — тёплая «мишенная» плазма с температурой $T_i \sim T_e \sim 100$ эВ (индексы i и e относятся к ионному и электронному компонентам соответственно) и плотностью $n \sim 10^{14}$ см⁻³ является столкновительным и удерживается в газодинамическом режиме (отсюда и название установки). Второй компонент — быстрые ионы с энергией 10—20 кэВ и анизотропной в пространстве скоростей функцией распределения создаётся в результате наклонной инъекции мощных атомарных пучков водорода или дейтерия и удерживается в адиабатическом режиме. Подробное описание установки ГДЛ можно найти, например, в работе [9].

Для проведения описываемых экспериментов к каждой стороне установки ГДЛ была присоединена дополнительная ячейка — компактный пробкотрон (КП) — с независимыми источниками питания магнитных катушек. Общая схема установки с расположением основных узлов и диагностик для проведения эксперимента представлена на рис. 1. Для создания каждого компактного пробкотрона произведено изменение конструкции соответствующего пробочного узла установки ГДЛ: дополнительная вакуумная камера и магнитная катушка установлены вблизи имеющегося пробочного узла. Образовавшийся дополнительный пробкотрон с расстоянием между центрами катушек $L_{\text{КП}} = 43$ см имеет поле в центральном сечении $B_0 = 2,5$ Тл и пробочное отношение $R_{\text{КП}} \sim 2$. Профиль магнитного поля вдоль оси установки ГДЛ с двумя КП представлен на рис. 2 в масштабе схемы установки (см. рис. 1).

Вакуумная камера компактного пробкотрона выполнена из нержавеющей стали. Специальные рёбра жёсткости позволяют эксплуатировать её в условиях сильных импульсных магнитных полей. Для улучшения условий работы первой стенки непосредственно перед началом эксперимента предусмотрено напыление на специально подготовленную шероховатую внутреннюю поверхность камеры нескольких монослоёв титана. Это делается с помощью дугового титанового испарителя кольцевой формы, находящегося непосредственно внутри камеры.

Конструкция обоих КП (восточного КП-В и западного КП-З) позволяет инжектировать перпендикулярно оси системы два сфокусированных пучка атомарного водорода или дейтерия высокой мощности. В результате инъекции в концевых компактных пробкотронах создаётся плотный сгусток плещущихся ионов и, как следствие, пик амбиполярного потенциала.

В описываемых экспериментах с двумя концевыми пробкотронами в каждую амбиполярную ячейку было установлено по одному инжектору атомов дейтерия (7 и 8 на рис. 1), чего было достаточно для создания необходимого амбиполярного барьера.

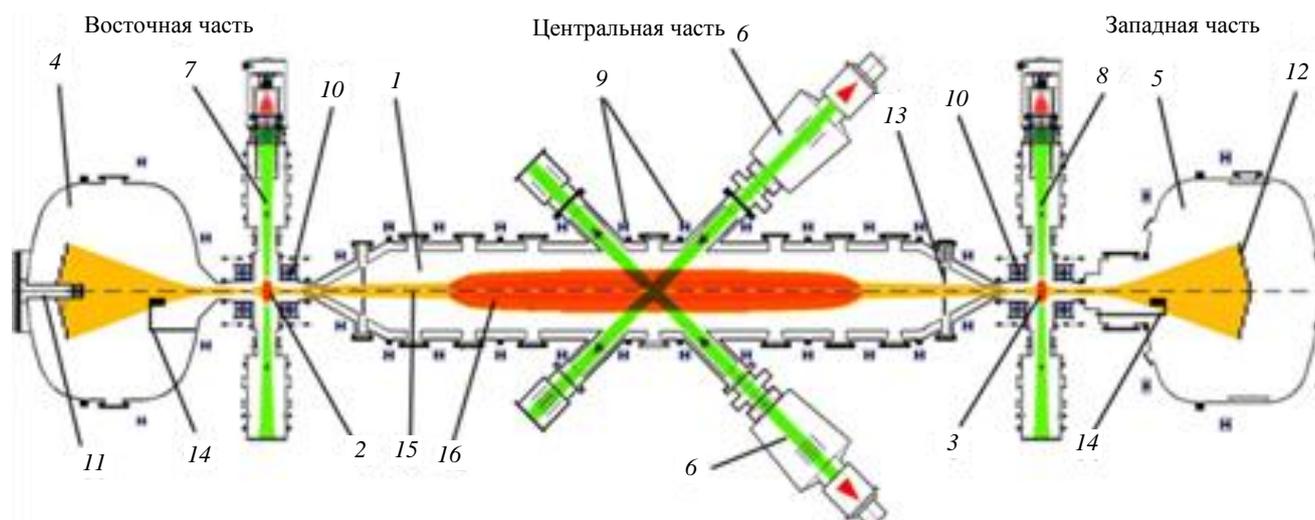


Рис. 1. Схема эксперимента с двумя компактными пробкотронами на установке ГДЛ: 1 — центральный пробкотрон; 2 — восточный компактный пробкотрон (КП-В); 3 — западный компактный пробкотрон (КП-З); 4 — восточный расширитель; 5 — западный расширитель; 6 — инжекторы нагретых атомарных пучков; 7 — атомарный инжектор в КП-В; 8 — атомарный инжектор в КП-З; 9 — катушки магнитной системы; 10 — пробочные узлы; 11 — дуговой источник плазмы; 12 — торцевой плазмодриемник; 13 — лимитер; 14 — измеритель продольных потерь; 15 — теплая «мишенная» плазма; 16 — область движения быстрых ионов

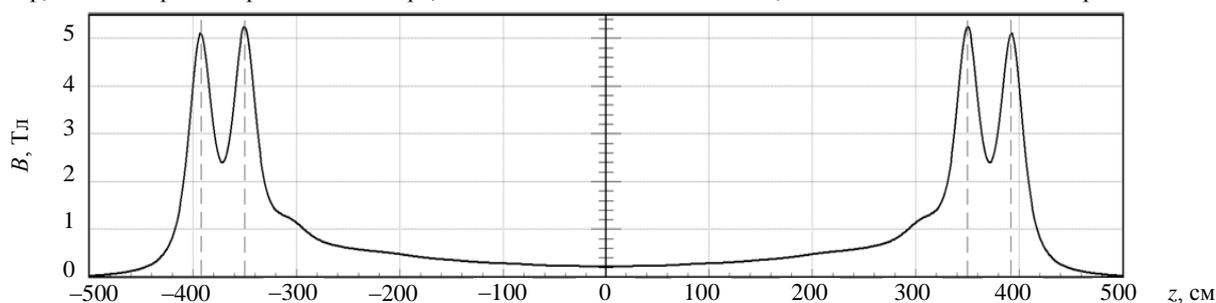


Рис. 2. Профиль магнитного поля вдоль оси установки ГДЛ с двумя КП

Для подавления поперечных потерь, связанных с развитием неустойчивых МГД-мод, в описываемых экспериментах с амбиполярными пробками был применён метод вихревого удержания, который хорошо зарекомендовал себя на установке ГДЛ [14]. Этот метод заключается в создании зоны дифференциального вращения вблизи радиальной границы плазменного столба путём формирования специального радиального профиля электрического потенциала плазмы в виде «ступеньки» со скачком потенциала в периферийной области плазменного столба. Радиальное электрическое поле определяет радиальный профиль скорости азимутального дрейфа плазмы, что может существенно повлиять на МГД-устойчивость системы.

Профиль потенциала такого вида внутри плазмы создавался путём задания потенциала на специальных электродах (см. рис. 1): на наружные кольца секционированных поглотителей плазмы (12) и радиальные лимитеры (13) подавался потенциал амплитудой +100—300 В относительно вакуумной камеры установки; внутренние кольца поглотителей плазмы обычно заземлялись. При этом время удержания частиц мишенной плазмы соответствовало характерному времени её продольного удержания (с учётом амбиполярных барьеров при инжекции в КП), время жизни быстрых частиц соответствовало оценке времени их торможения за счёт кулоновских столкновений с электронами мишенной плазмы.

СОЗДАНИЕ АМБИПОЛЯРНЫХ БАРЬЕРОВ В КОНЦЕВЫХ ПРОБКЕТРОНАХ ГДЛ

Первым шагом в экспериментах по исследованию удержания плазмы с помощью амбиполярных барьеров было получение устойчивого накопления быстрых ионов в двух компактных пробкотронах, которые должны выполнять функции амбиполярных ячеек.

Оба компактных пробкотрона на начальном этапе эксперимента заполнялись тёплой проточной «мишенной» плазмой из центральной ячейки ГДЛ. В типичных условиях экспериментов плотность протекающей плазмы составляла $n_0 \leq 10^{13} \text{ см}^{-3}$, её электронная температура была сравнима с температурой в

центральной части ГДЛ и составляла около 100 эВ. Затем с задержкой на 200 мкс от начала атомарной инжекции в центральной части ГДЛ в каждый из КП перпендикулярно оси установки инжектировалось по одному фокусированному пучку атомов дейтерия с энергией $E = 20\text{--}25$ кэВ, длительностью 4 мс и мощностью около 0,5 МВт. В результате ионизации атомов в КП формировались компактные плазмоиды, состоящие из быстрых ионов дейтерия с сильно анизотропной по углам функцией распределения и плотностью, в несколько раз превышающей плотность фоновой изотропной плазмы.

Накопление быстрых ионов в КП можно было наблюдать по росту электронной плотности. На рис. 3 приведена линейная плотность электронов в режимах с инжекцией и без инжекции в КП ГДЛ фокусированных атомарных пучков. Данные измерения проводились в западном КП (КП-3) с помощью дисперсионного интерферометра [10], работающего в составе диагностического комплекса ГДЛ. В первом приближении линейной плотности электронов соответствует линейная плотность горячих ионов, поскольку в области плазмоида количество теплой мишенной плазмы мало. Аналогичным образом происходило накопление быстрых ионов и во втором КП-В, что контролировалось ослаблением атомарного пучка и диамагнитным зондом.

Для восстановления абсолютной плотности быстрых ионов из линейной плотности требуется определить характерный размер области, занимаемой быстрыми ионами. Условие квазинейтральности плазмы позволяет утверждать, что пространственные распределения плотности электронов и быстрых ионов близки по значению в области, где плотность быстрых ионов велика. Тогда характерные диаметры профилей

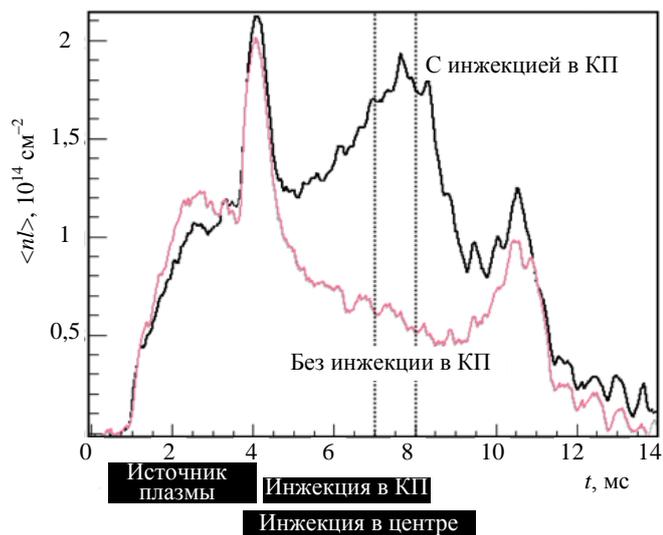


Рис. 3. Линейная плотность электронов в западном КП. Временная диаграмма работы установки ГДЛ в рабочем импульсе обозначена чёрными рамками

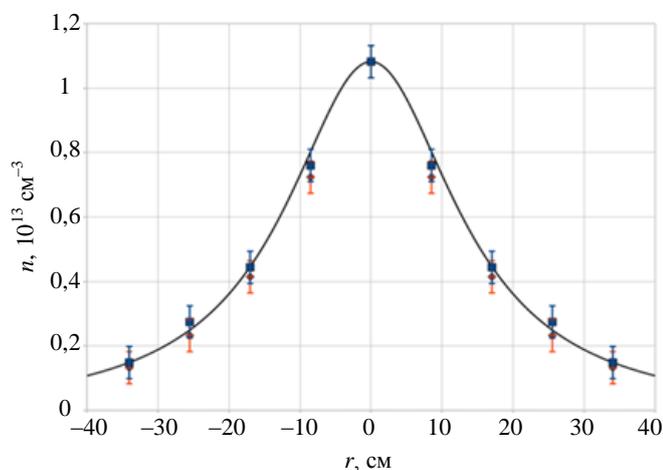


Рис. 4. Профиль плотности горячих ионов в экваториальной плоскости западного КП. Различными маркерами обозначены измерения в разных импульсах

плотности быстрых ионов и электронов совпадут.

Измерение профилей плотности быстрых ионов производилось с помощью анализатора атомов перезарядки на активной мишени, описанного в работе [11]. В экспериментах с компактным пробкотроном в схеме измерения не было специального диагностического пучка быстрых атомов. «Мишень» для перезарядки быстрых ионов состояла из частиц мощного фокусированного пучка, используемого для создания плазмоида быстрых ионов.

На рис. 4 представлен профиль плотности горячих ионов в экваториальной плоскости западного КП, снятый с помощью описанного анализатора атомов перезарядки. На этом и всех последующих рисунках для удобства сравнения результатов радиусы даны в пересчёте по магнитному потоку на центральную плоскость ГДЛ. Для построения профилей был выбран промежуток времени с 2,5 до 3,5 мс после начала инжекции в компактный пробкотрон (момент времени с 7 до 8 мс на рис. 3 выделен пунктирными линиями). Профиль нормирован на линейную плотность быстрых ионов, вычисленную по линейной плотности электронов, полученной из показаний дисперсионного интерферометра (см. рис. 3). Полученное таким образом максимальное значение плотности быстрых ионов в центре КП в описываемых экспериментах составило $1,1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

Рост плотности быстрых анизотропных ионов в концевых КП приводил к образованию в этих ячейках пиков амбиполярного потенциала, которые препятствовали потерям ионов мишенной плазмы из центральной части ГДЛ.

Как уже отмечалось, целью проводимых экспериментов было исследование возможности использования КП в качестве амбиполярных пробок для улучшения продольного удержания. При этом основное внимание уделялось измерениям продольных потерь плазмы через КП, а также величине перепада амбиполярного потенциала в режимах с инъекцией атомарных пучков в концевые компактные пробкотроны и без неё. В результате этих исследований продемонстрирован эффект амбиполярного удержания плазмы в ГДЛ с двумя амбиполярными пробками в режиме умеренных параметров плазмы. Эффект проявлялся в том, что плотность потока теплых ионов, покидающих ловушку ГДЛ через секции КП с восточного и западного конца установки, была существенно меньше для режимов с инъекцией атомарных пучков в КП, чем без неё.

Основная диагностика для определения степени подавления продольных потерь — пирозлектрический болометр и сеточный зонд, расположенные на одной подвижной штанге рядом друг с другом. Они располагались в восточном и западном расширителях за компактными пробкотронами на расстоянии 50 см от выходных пробок КП (14 на рис. 1), там, где отношение текущего магнитного поля к магнитному полю в центральной плоскости ГДЛ было равно 0,7. С их помощью были измерены временные и радиальные зависимости абсолютной плотности тока ионов в расширителе. Стоит отметить, что с восточной стороны была невозможна установка системы болометр—зонд на радиусы вблизи оси системы, так как эта область проецировалась на катод дугового источника предварительной плазмы.

На рис. 5 представлены радиальные профили тока ионов в западном расширителе в режимах с инъекцией атомарных пучков в оба КП (▲) и без неё (◆). Для построения профилей был также выбран промежуток времени с 7 до 8 мс по шкале рис. 3. Как видно из сравнения двух профилей, поток ионов через КП-3 при создании в нём амбиполярного барьера ослаблялся вблизи оси более чем в 2 раза.

На рис. 6 представлены аналогичные профили для восточного расширителя. Как видно из сравнения данных с и без инъекции в КП-В, наличие популяции быстрых ионов в восточном КП и, следовательно, скачка амбиполярного потенциала слабо влияло на показания датчика потока ионов в восточном расширителе. Возможно, это объясняется не отсутствием эффекта уменьшения потерь, а ошибкой в показании прибора, вызванной сильной перезарядкой ионов из-за плохих вакуумных условий в восточном расширителе из-за расположения в нём дугового источника плазмы.

С помощью анализа спектра продольных энергий ионов, покидающих ловушку через амбиполярную ячейку — КП, также возможно измерить максимальное значение амбиполярного потенциала на данной силовой линии. Естественным образом эта величина соответствует минимальной энергии ионов, т.е. «сдвигу» функции распределения относительно начала координат. Измерение спектра продольных энергий (или продольного компонента функции распределения по скоростям) ионов плазмы, покидающих ловушку через пробку, проводилось с помощью сеточного анализатора, расположенного в области расширителя за западным КП ГДЛ. Определение энергетического спектра ионов в анализаторе производится сканированием запирающего (положительного) потенциала. На рис. 7 показаны радиальные профили

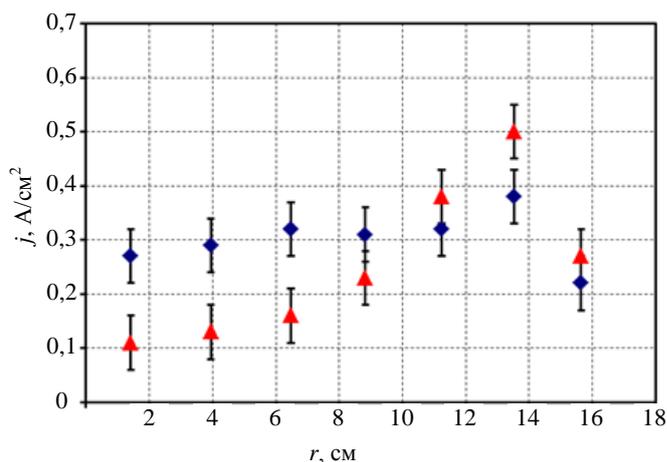


Рис. 5. Радиальные профили плотности потока ионов, снятые с помощью сеточного зонда в расширителе вблизи западного плазмодиёмника: ◆ — без инъекции в КП; ▲ — с инъекцией в КП

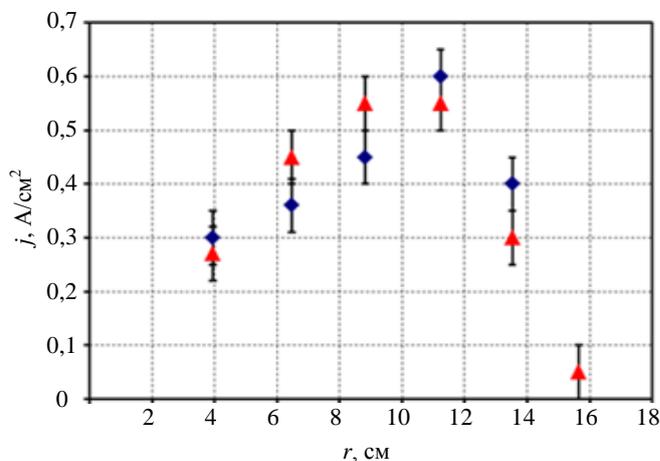


Рис. 6. Радиальные профили плотности потока ионов, снятые с помощью сеточного зонда в расширителе вблизи восточного плазмодиёмника: ◆ — без инъекции в КП; ▲ — с инъекцией в КП

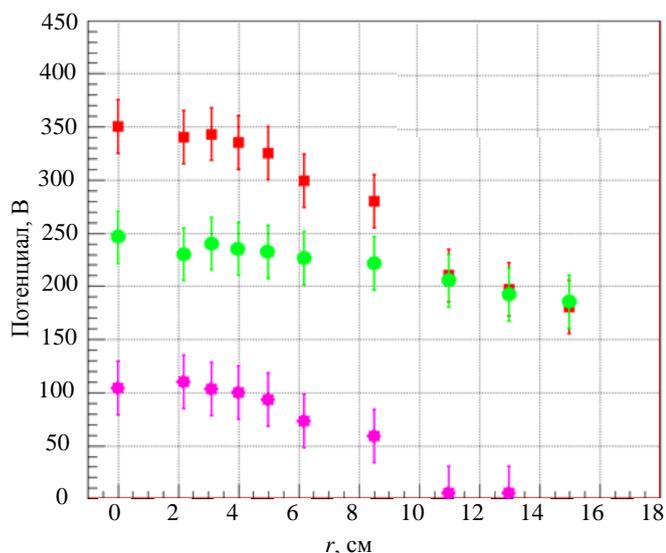


Рис. 7. Радиальный профиль амбиоплярного потенциала плазмы с инъекцией (■) и без инъекции (●) в КП ГДЛ, разность между профилями (*)

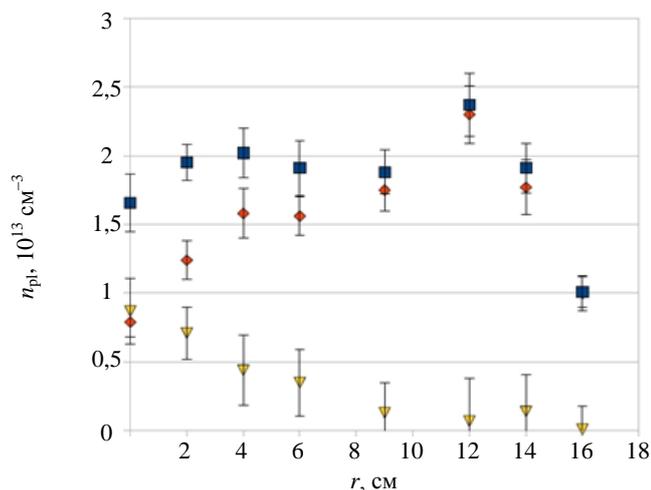


Рис. 8. Радиальный профиль плотности плазмы в центральной части ГДЛ в режимах без инъекции атомарных пучков в КП (◆) и с инъекцией в КП (■), разность между двумя профилями (▼)

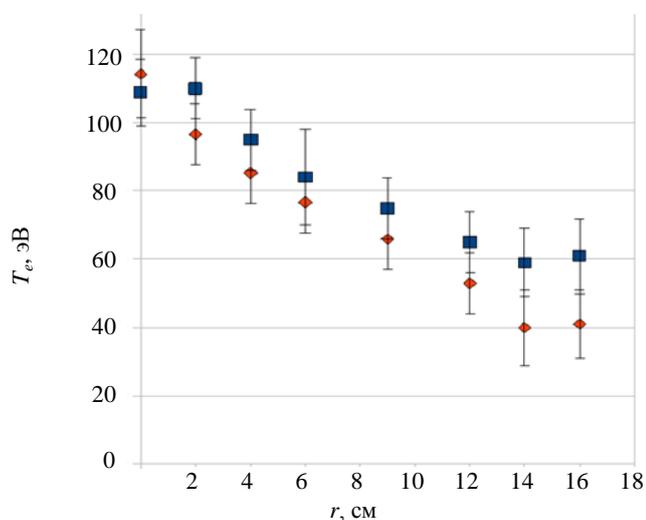


Рис. 9. Радиальный профиль температуры электронов плазмы в центральной части ГДЛ в режимах с инъекцией атомарных пучков в КП (■) и без инъекции в КП (◆)

амбиоплярного потенциала плазмы, измеренные данным методом для момента времени 7,5 мс. По данным проведённых измерений при создании в концевых пробкотронах плотных сгустков горячих ионов величина перепада амбиоплярного потенциала в КП (разность между профилями, обозначенная звездочками на рис. 7) составила ~100 В, что сравнимо с электронной температурой вытекающей мишенной плазмы в этом режиме.

Таким образом была успешно продемонстрирована возможность создания амбиоплярных барьеров в концевых компактных пробкотронах на установке ГДЛ. Также было показано влияние создаваемых амбиоплярных барьеров на поток плазмы, вытекающей из центральной секции ГДЛ в расширители через секции КП.

УЛУЧШЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГДЛ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВУХ АМБИПОЛЯРНЫХ ЯЧЕЕК

Важнейшими параметрами плазмы, удерживаемой в магнитной ловушке, являются её плотность, температура и продольное время удержания. В этих экспериментах были проведены измерения плотности и температуры электронов в центральной плоскости ГДЛ с использованием метода томсоновского лазерного рассеяния [12]. На рис. 8 показан радиальный профиль плотности плазмы, на рис. 9 — радиальный профиль температуры электронов плазмы в центральной части ГДЛ в режимах без инъекции и с инъекцией в КП фокусированных атомарных пучков. Данные измерений представлены для момента времени 7,5 мс по шкале рис. 3.

Как видно на рис. 8, использование амбиоплярных пробков в эксперименте приводило к удвоению плотности плазмы на оси установки в центральном сечении. Профиль плотности плазмы в центральной части ГДЛ становился более пологим, без провала вблизи оси. В то же время использование КП практически никак не влияло на распределение температуры электронов в центральной части ГДЛ (см. рис. 9). Это обстоятельство может быть объяснено тем, что с существенным повышением плотности плазмы локальный энергобаланс системы изменялся. Так, например, мощность инъекции оставалась неизменной в ходе всех экспериментов и определялась энергетикой систем питания инжекторов, следовательно,

при увеличении плотности плазмы нагрев пучками уменьшался в пересчёте на ион-электронную пару. Кроме того, увеличение плотности плазмы на данной силовой линии приводило к увеличению (до 2 раз на оси) потока, идущего в пробку, что даже при использовании амбиполярных барьеров, уменьшающих этот поток, приводило в результате к выравниванию потоков с амбиполярными пробками и без них. Экспериментально этот эффект наблюдался при измерении потока ионов через восточный КП (см. рис. 6), где на некоторых силовых линиях поток на зонд через амбиполярную ячейку был несколько больше, чем без образования запирающего потенциала.

Тем не менее эффект увеличения плотности плазмы из-за улучшения продольного удержания, вызванного формированием на краях амбиполярных барьеров, был экспериментально продемонстрирован. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 10 показаны временные зависимости линейной плотности плазмы в центральной секции ГДЛ для режимов с амбиполярными пробками и без них. Скачок линейной плотности в момент инъекции атомарных пучков в КП напрямую связан с улучшением продольного удержания.

Как уже отмечалось, важнейшим параметром, характеризующим продольное удержание плазмы в открытых магнитных ловушках, является время продольного удержания. Оценим из полученных экспериментальных данных время продольного удержания плазмы $\tau_{||}$ и параметр удержания $n\tau_{||}$ для частиц в приосевой области в режимах с инъекцией (обозначим в уравнениях звездочкой *) и без инъекции пучков в оба КП.

По данным измерений, приведённых на рис. 5 и 6, продольный поток плазмы из ловушки вблизи оси в момент времени 7,5 мс (середина усредняемого диапазона, см. рис. 3) без инъекции в КП атомарных пучков (без создания амбиполярного барьера) можно оценить как

$$j_3(r=0, t=7,5 \text{ мс}) \approx j_B = j \approx 0,1 \text{ А/см}^2,$$

здесь j_3 и j_B — потоки тёплых ионов через западный и восточный КП соответственно. При создании амбиполярных барьеров в КП поток тёплых ионов вблизи оси по данным измерений уменьшался примерно в 2 раза с западной стороны и оставался на том же уровне с восточной:

$$j_3^* \approx j/2, \quad j_B^* \approx j.$$

Как следует из рис. 8, плотность плазмы в центральной части ГДЛ вблизи оси увеличивалась в 2 раза при использовании амбиполярного запираения, т.е.

$$n^* \approx 2n.$$

Время продольного удержания на осевой силовой трубке можно оценить как время вытекания плазмы плотностью n из единичного объёма V этой трубки потоками j_3 и j_B через западную и восточную пробки соответственно:

$$nV/\tau_{||} \approx j_3 + j_B.$$

Тогда для случая без амбиполярного запираения (только магнитные пробки)

$$\tau_{||} = nV/2j.$$

А для амбиполярного запираения

$$\tau_{||}^* = n^*V/(j + j/2) = 4nV/3j = (8/3)\tau_{||} \approx 2,7 \tau_{||}.$$

Таким образом, время продольного удержания для частиц в приосевой области ГДЛ по данным экспериментальных измерений увеличилось в 2,7 раза при использовании амбиполярных барьеров:

$$\tau_{||}^* \approx 2,7 \tau_{||}.$$

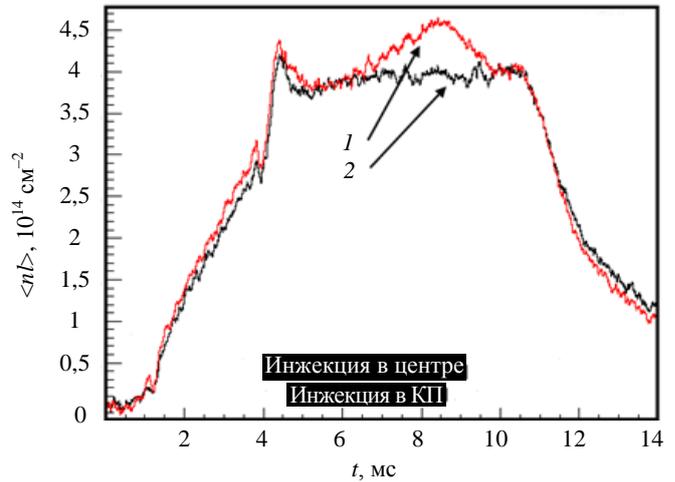


Рис. 10. Временная зависимость линейной плотности плазмы в центральной плоскости ГДЛ по данным ДИ: 1 — с инъекцией атомарных пучков в оба КП, старт инъекции в момент времени 4,2 мс; 2 — без инъекции в КП

Что же касается параметра $n\tau_{||}$, иллюстрирующего улучшение продольного удержания, то

$$n^*\tau_{||}^* \approx 5,4n\tau_{||}$$

Аналогичные вычисления для других радиусов с последующим усреднением по сечению плазменного шнура ($\langle \dots \rangle$) дают

$$\langle \tau_{||}^* \rangle \approx 1,8 \langle \tau_{||} \rangle \quad \text{и} \quad \langle n^*\tau_{||}^* \rangle \approx 2,9 \langle n\tau_{||} \rangle$$

соответственно.

Из полученных сравнений можно сделать вывод, что в данных экспериментах при использовании амбиполярных пробок с достаточно умеренными параметрами (высота пика потенциала была порядка температуры плазмы) было получено улучшение продольного удержания более чем в 5 раз на оси установки и почти в 3 раза в среднем по сечению плазмы.

Улучшение удержания мишенной плазмы в ГДЛ положительным образом отражалось на накоплении и удержании популяции быстрых ионов в центральной части ГДЛ. Из данных измерения локального диамагнетизма с помощью спектральной диагностики на основе динамического эффекта Штарка (MSE) [13] можно получить максимальное значение относительного давления плазмы $\beta_{\max} = 0,45$ и максимальную плотность быстрых ионов в точке остановки $n_{f\max} \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (для средней энергии ионов $\langle E_f \rangle = 10 \text{ кэВ}$). Эти значения являются рекордными для установки ГДЛ с мощностью инжекции 4,5 МВт (шесть нагревных инжекторов в центральной части).

Для дальнейшего исследования влияния эффекта амбиполярного запираия на параметры удерживаемой в ГДЛ плазмы было решено несколько увеличить магнитное поле всей системы ГДЛ—КП, так что в центральном сечении ГДЛ поле возросло с 2,95 до 3,35 кГс. Повышение магнитного поля привело к более ярким результатам, демонстрирующим повышение параметров плазмы из-за использования двух амбиполярных барьеров. На рис. 11 показаны временные зависимости линейной плотности плазмы в центральной плоскости ГДЛ по данным дисперсионного интерферометра с инжекцией в КП и без для режима с повышенным магнитным полем. На рис. 12 аналогичным образом представлено сравнение диамагнетизма плазмы в центральной ячейке ГДЛ по данным диамагнитного зонда (петли). Как видно из представленных сравнений, инжекция пучков в КП, т.е. создание амбиполярных барьеров, в режиме с повышенным магнитным полем приводила к существенному росту плотности и диамагнетизма плазмы, что однозначно связывается с улучшением продольного удержания плазмы.

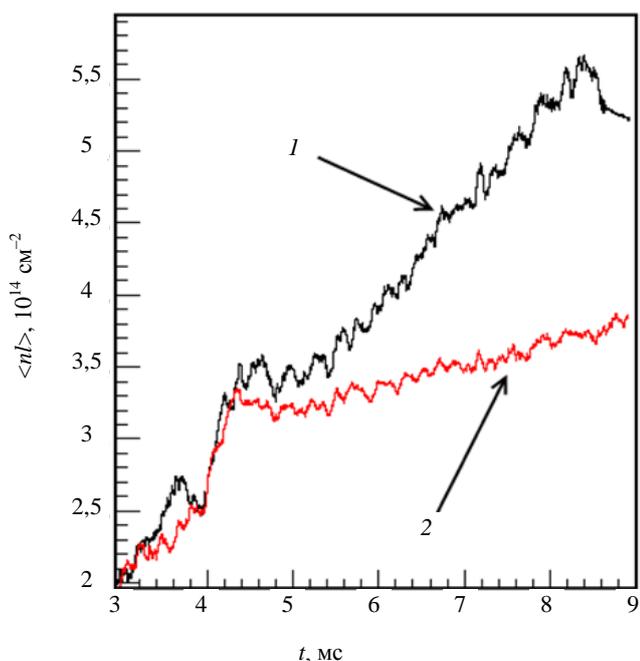


Рис. 11. Временные зависимости линейной плотности плазмы в центральной плоскости ГДЛ для режима с повышенным магнитным полем: 1 — с инжекцией в оба КП; 2 — без инжекции

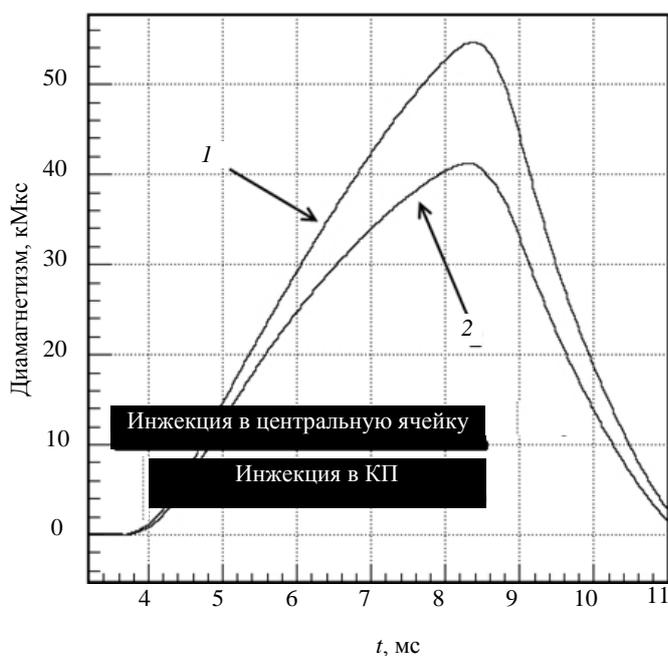


Рис. 12. Сигналы с диамагнитного зонда в центральном сечении ГДЛ ($R = 1$) в режиме с повышенным полем: 1 — с инжекцией в оба КП; 2 — без инжекции

В режимах с повышенным магнитным полем более ярко проявилось влияние амбиполярного потенциала, создаваемого в КП, на максимальные значения плотности и температуры плазмы в центральной части ГДЛ. Согласно данным измерений системой томсоновского рассеяния в устойчивом режиме с повышенным магнитным полем и амбиполярными пробками температура электронов на оси в момент времени $t = 8$ мс составила $T_e^* = 138 \pm 7$ эВ при плотности $n^* = (2,2 \pm 0,2)10^{13}$ см⁻³. Для сравнения при том же значении магнитного поля, но без амбиполярного запираия (без инъекции пучков в концевые КП) температура была заметно ниже $T_e = 109 \pm 9$ эВ, плотность при этом была более чем в 2 раза ниже $n = (0,9 \pm 0,05)10^{13}$ см⁻³.

Таким образом, в режиме с повышенным магнитным полем удалось продемонстрировать существенный рост плотности и температуры, вызванный улучшением продольного удержания при использовании двух амбиполярных ячеек в виде концевых КП с перпендикулярной инъекцией в них атомарных пучков. Время продольного удержания $\tau_{||}$ и параметр $n\tau_{||}$ в режиме с увеличенным полем были также заметно выше. В приосевой области ГДЛ по данным экспериментальных измерений вычисления дают

$$\begin{aligned} \tau_{||}^* &\approx 2,9\tau_{||}; \\ n^*\tau_{||}^* &\approx 6,6n\tau_{||}. \end{aligned}$$

Для исследования эффективности каждой из амбиполярных пробок были проведены специальные эксперименты, когда инъекция пучков велась только в восточный или только в западный КП. Результаты этих исследований представлены на рис. 13. Как видно, оба КП обладали примерно одинаковой эффективностью в качестве амбиполярных пробок и давали половинный вклад в улучшение удержания.

Стоит отметить также, что исследование колебаний потенциала плазмы и магнитного поля в области ионно-циклотронных частот показало отсутствие в этих режимах альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости, которая наблюдалась в предыдущих экспериментах на установке ГДЛ с одним компактным пробкотроном [15, 16]. Это объясняется более низкими параметрами ионных плазмодов в данных экспериментах в КП и пороговым характером развития данной микронеустойчивости.

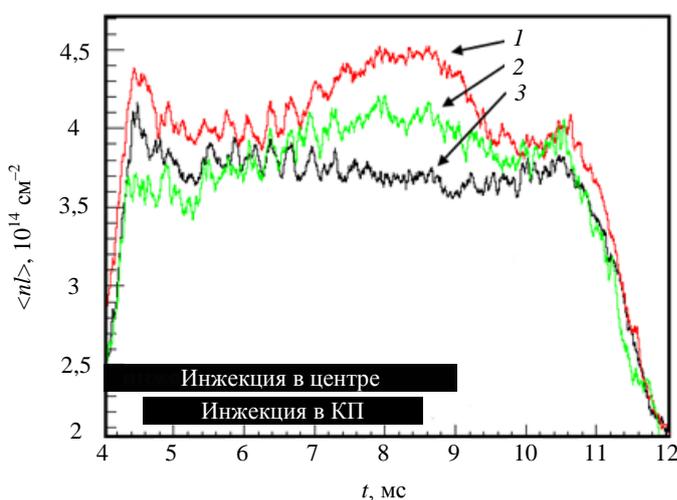


Рис. 13. Сравнение эффективности восточного и западного КП по временной зависимости линейной плотности плазмы $\langle n l \rangle$ в центральной плоскости ГДЛ для режимов с повышенным магнитным полем: 1 — инъекция пучков в оба КП; 2 — инъекция пучка только в один (западный) КП; 3 — без инъекции пучков в КП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги представленной работы, можно сформулировать следующие основные результаты проведенных исследований.

На установке ГДЛ продемонстрирована возможность создания эффективных амбиполярных барьеров (пробок) в полностью аксиально-симметричной геометрии магнитного поля путём перпендикулярной инъекции фокусированных атомарных пучков мощностью 0,5 МВт каждый в компактные концевые пробкотроны.

Продемонстрировано улучшение продольного удержания при использовании двух амбиполярных барьеров, создаваемых в компактных пробкотронах с обеих сторон установки ГДЛ. При этом наблюдались двукратное увеличение плотности плазмы на оси в центральной части ГДЛ, уменьшение продольных потерь и заметное повышение температуры электронов. В результате параметр $n\tau_{||}$ в приосевой области был увеличен более чем в 6 раз по сравнению с режимом без амбиполярных пробок.

Существенным отличием результатов, представленных в этой статье, от экспериментов на установке ТМХ 1980 г. [4] является тот факт, что в экспериментах с амбиполярными пробками на установке ГДЛ удалось достичь аналогичных или даже более высоких результатов по улучшению продольного удержания, но впервые в полностью аксиально-симметричной геометрии и при инъекции всего около 0,5 МВт мощности нейтральных пучков в каждую амбиполярную ячейку по сравнению с 7 МВт инъекции в экспериментах на ТМХ. Этому способствовали более благоприятные вакуумные условия, меньшие размеры области пространства, занимаемого быстрыми ионами, а также большая степень анизотропии функции распределения плещущихся ионов в представленных экспериментах на установке ГДЛ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 12.

REFERENCES

1. **Dimov G.I.** — UFN(Physics –Uspekhi), 2005, vol. 175, № 11, pp. 1185—1206.
2. **Dimov G.I., Zakaydakov V.V., Kishinevsky M.E.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1976, vol. 2, p. 597 (in Russian).
3. **Fowler T.K., Logan B.G.** — Comments on Plasma Phys. and Contr. Fusion, 1977, vol. 2, p.167.
4. **TMX Groop** Summary of Results from the Tandem Mirror Experiment (TMX). UCRL-53120. Ed. T.S. Simonen. — Livermore, CA: LLL, 1981.
5. **Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Ivanov A.A., Lizunov A.A., Murakhtin S.V., Prikhodko V.V., Solomakhin A.L., Noack K.** — J. of Fusion Energy, 2007, vol. 26, p. 103—107.
6. **Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Lizunov A.A., Maximov V.V., Murakhtin S.V., Prikhodko V.V., Solomakhin A.L.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2010, vol. 36, № 5, pp. 413—422 (in Russian).
7. **Skovorodin D.I., Beklemishev A.D.** — Fusion Science and Technology, 2011, vol. 59, issue 1T, p. 199.
8. **Mirnov V.V., Ryutov D.D.** Gas-dynamic trap. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1980, issue 1(5), pp. 57—66 (in Russian).
9. **Bagryansky P.A., Anikeev A.V., Beklemishev A.D., Donin A.S., Ivanov A.A., Kovalenko Yu.V., Kruglyakov E.P., Lizunov A.A., Lvovskiy A.V., Maximov V.V., Murakhtin S.V., Pinzhenin E.I., Prikhodko V.V., Pushkareva A.N., Salnikov V.Ya., Solomakhin A.L., Zaytsev K.V.** — Fusion Science and Technology, 2011, vol. 59, Issue 1T, pp. 31—35.
10. **Solomakhin A.L., Bagryansky P.A., Voskoboynikov P.V., Zubarev P.V., Kvashnin A.N., Lizunov A.A., Maximov V.V., Khil'chenko A.D.** — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Technique), 2005, № 5, pp. 96—106 (in Russian).
11. **Murakhtin S.V., Prikhodko V.V.** — Transactions of Fusion Science and Technology, 2005, vol. 47, pp. 315—317.
12. **Pushkareva A.N.** Temperature measurement of plasma by Thomson scattering method on installation GDT — In: Materials of XLVIII Youth Scientific Conf. «Student and Scientific-and-Technological Advance». NSU, Novosibirsk, 2010, p. 172 (in Russian).
13. **Lizunov A.A., Den Hartog D.J., Donin A.S., Ivanov A.A., Prikhodko V.V.** — Review of Scientific Instruments, 2011, vol. 82, p. 086105.
14. **Soldatkina E.I., Bagryansky P.A., Solomakhin A.L.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2008, vol. 32, № 4, pp. 1—6 (in Russian).
15. **Korzhavina M.S., Anikeev A.V., Bagryansky P.A.** — Vestnik NGU. Ser. Fizika (Herald of NSU. Ser. Physics), 2009, vol. 4. issue 1, pp. 25—29 (in Russian).
16. **Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Chernoshtanov I.S., Korzhavina M.S., Prikhodko V.V., Tsidulko Yu.A.** — Fusion Science and Technology, 2011, vol. 59, Issue 1T, pp. 104—107.

AUTHORS

Anikeev A.V. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; a.v.anikeev@inp.nsk.su

Bagryansky P.A. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; p.a.bagryansky@inp.nsk.su

Donin A.S. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia.

Zaytsev K.V. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia.

Korzhavina M.S. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia.

Lizunov A.A. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russia; a.a.lizunov@inp.nsk.su

Lozhkina A.N. Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; anna.lozhkina@gmail.com

Maksimov V.V. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; V.V.Maximov@inp.nsk.su

Prihodko V.V. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; V.V.Prihodko@inp.nsk.su

Soldatkina E.I. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russia; E.I.Soldatkina@inp.nsk.su

Solomakhin A.L. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Russia.

Received 3 September 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 3—13.