

УДК 533.9; 533.922

## ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ

*Е.И. Солдаткина, П.А. Багрянский, К.В. Зайцев, А.А. Иванов, А.А. Лизунов, А.Н. Ложкина,  
В.В. Максимов, В.В. Приходько, А.Л. Соломахин, В.Я. Савкин, Ю.А. Трунев, Г.И. Шульженко*

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

Инжекция мощных электронных пучков вдоль магнитного поля является перспективным методом нагрева электронов плазмы и управления радиальным профилем потенциала в открытых ловушках. В работе представлены результаты первых экспериментов по инжекции электронного пучка в плазму установки Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН. Продемонстрирована возможность инжекции электронного пучка мощностью 400 кВт и энергией электронов 40 кэВ через магнитную пробку со степенью сжатия пучка до 120 в плазму. Особенность продольной инжекции пучка заключается в наличии встречного потока плазмы, который приводит к нестабильности работы электронной пушки. В работе определен диапазон параметров, в котором генератор пучка работал надёжно. Показано, что энергосодержание плазмы растёт линейно в течение всей длительности инжекции электронного пучка, не достигая стационарного уровня. При этом зафиксирован рост температуры электронов плазмы.

**Ключевые слова:** магнитное удержание плазмы, открытая ловушка, электронный пучок.

## FIRST EXPERIMENTS ON ELECTRON BEAM INJECTION INTO THE GAS-DYNAMIC TRAP

*E.I. Soldatkina, P.A. Bagryansky, K.V. Zaytsev, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, A.N. Lozhkina, V.V. Maksimov,  
V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin, Yu.A. Trunev, G.I. Shulzhenko*

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

Injection of high-power electron beams along the magnetic field is a promising method of heating the plasma electrons and the control of potential radial profile in open traps. The results of the first experiments on the injection of an electron beam into a gas-dynamic trap plasma are presented. The possibility of electron beam injection with beam power of 400 kW and electrons energy of 40 keV through the magnetic mirror with a compression ratio of the beam up to 120 into the plasma is demonstrated. Feature of the longitudinal beam injection is the presence of a plasma counter-flow, which leads to instability of the electron gun. The paper determines a range of parameters in which the beam generator operated safely. Shown that the plasma energy increases linearly during the entire duration of the electron beam injection before reaching steady-state level.

**Key words:** magnetic plasma confinement, open trap, electron beam.

### ВВЕДЕНИЕ

Открытые ловушки являются важнейшей ветвью современных термоядерных исследований. Существует достаточно хорошее теоретическое понимание поведения плазмы в таких системах. В последнее время найдены научные и технологические решения, которые позволяют существенно продвинуться по параметрам плазмы в установке следующего поколения. Переход от исследовательских и опытных термоядерных установок к системам крупномасштабной промышленной энергетики потребует решения ряда принципиально важных задач, связанных с обеспечением конкурентоспособности и экономической эффективности данного способа получения энергии.

В работе [1] предлагается концепция установки, сочетающей в себе физические принципы двух существующих ныне в ИЯФ СО РАН плазменных установок открытого типа — ловушек ГОЛ-3 и ГДЛ. Такое сочетание позволит одновременно обеспечить высокое энергосодержание плазмы (как это реализовано в ГДЛ [2]) и малые продольные потери (посредством многопробочных секций, как в ГОЛ-3 [3]).

На рис. 1 представлена схема проектируемой в ИЯФ Газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ). Большой центральный бак 1 предназначен для захвата восьми атомарных пучков мощностью по 1 МВт каждый, формирующих популяцию быстрых ионов с высокой энергией. За счёт неоднородного по оси магнитного поля соленоида 2 область остановки быстрых ионов (она же «активная зона» реактора) будет довольно протяжённой в отличие от узкой области остановки в ГДЛ. Многопробочные сверхпроводящие секции 3 служат для подавления продольного потока плазмы из ловушки за счёт возникающих внутри коллективных эффектов. Торцевые расширительные баки 4 предназначены для подавления продольной электронной теплопроводности. Также внутри этих баков установлены генераторы электронных пучков мощностью по 5 МВт каждый.

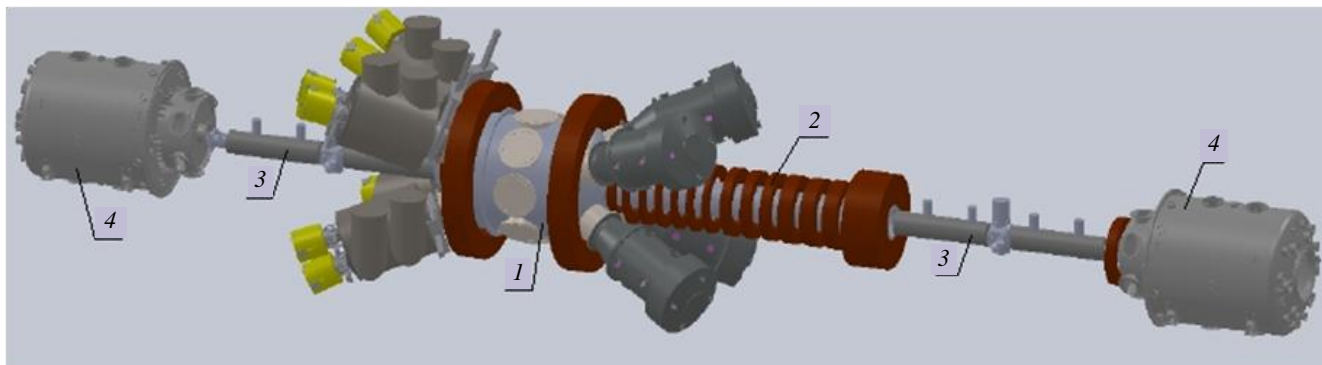


Рис. 1. Будущая установка ГДМЛ: 1 — центральный бак с восемью инжекторами нейтральных атомов; 2 — соленоид; 3 — сверхпроводящие многопробочные секции; 4 — торцевые расширители с электронными пучками и генератором первичной плазмы внутри

Предполагается, что в установке ГДМЛ будет получена плазма с электронной температурой до 2 кэВ, относительным давлением до 40%, плотностью быстрых ионов до  $3,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и энергетическим временем жизни 1 с. Достижение этих параметров позволит обеспечить эффективность DT-реакции синтеза на уровне 10% и продемонстрировать возможность строительства термоядерного реактора на основе ловушки открытого типа.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ В ОТКРЫТЫХ ЛОВУШКАХ

Важной частью установки ГДМЛ являются электронные пучки, инжектируемые из торцевых баков в центральную ячейку. Эти пучки призваны выполнять две ключевые функции:

- управление радиальным профилем электрического потенциала плазмы, что необходимо для преодоления влияния МГД-неустойчивости на удержание частиц и энергии;
- дополнительный нагрев электронного компонента плазмы.

В обзоре [4] приводятся экспериментальные данные по взаимодействию электронных пучков с плазмой в открытых ловушках. Интересно отметить, что в ряде исследований показана возможность нагрева плазмы электронным пучком в результате как коллективных эффектов взаимодействия с плазмой (возбуждение и затухание волн в плазме), так и за счёт создания радиального электрического поля, приводящего к нагреву ионов за счёт дрейфа в скрещенных полях. Другое направление экспериментальных и теоретических работ, приведённых в этом обзоре, посвящено использованию электронного пучка в качестве инструмента стабилизации неустойчивостей горячих ионов и МГД-стабилизации плазмы. Именно с целью стабилизации на установке ТМХ-U было проведено исследование инжекции электронного пучка с мощностью порядка 1 МВт. Поэтому проверка перспективности технологии инжекции электронных пучков вдоль магнитного поля именно как инструмента стабилизации плазмы необходима и в проекте ГДМЛ. Эффективный метод МГД-стабилизации уже был обоснован теоретически и экспериментально проверен на установке ГДЛ, где плазма стабилизировалась с помощью механизма «вихревого удержания» [5].

Базовый режим работы установки ГДЛ нельзя назвать устойчивым и осесимметричным, хотя он и демонстрирует отличное поперечное удержание плазмы. Этот режим является примером того, что стремиться к МГД-устойчивости необязательно, достаточно эффективно контролировать радиальные переносы. На установке ГДЛ это достигается созданием радиального перепада электростатического потенциала плазмодриёмников порядка электронной температуры. Теория вихревого удержания описывает происходящие при этом процессы как нелинейно-диссипативное насыщение желобковой неустойчивости, при котором конвективные движения имеют малую амплитуду и разделены во внешней и внутренней частях шнура. В результате наблюдаемые отклонения от осевой симметрии и классической поперечной диффузии незначительны. Кроме того, при отрицательной полярности приложенного потенциала на оси системы появляется значительный, важный и благоприятный эффект пинчевания популяции быстрых ионов. Эффект пинчевания связан с несохранением азимутального момента импульса частиц в системе с нарушенной симметрией. А его направление определяется направлением радиального тока, текущего по плазме в результате работы внешнего источника, поддерживающего потенциалы плазмодриёмника. Эффект пинчевания благоприятен, поскольку позволяет создать пикированные на оси про-

фили плотности быстрых ионов и сократить их радиальные потери. В качестве перспективного инструмента стабилизации и управления плазмой в термоядерном реакторе рассматривается технология инжекции электронных пучков вдоль магнитного поля. Эта технология позволит контролировать электрический потенциал плазмы даже при высокой электронной температуре и хорошем продольном удержании, когда непосредственный электрический контакт плазмы с торцевыми пластинами становится недостаточным или неэффективным. Осесимметричная инжекция заряда пучком электронов в горячую зону плазмы, в то время как потенциал холодной периферии определяется дивертором, может реализовать бесконтактную схему вихревого удержания. Таким образом, разработка технологии инжекции интенсивных электронных пучков в плазму, возможно, позволит преодолеть проблему МГД-устойчивости плазмы в ловушке ГДМЛ и даже управлять радиальным переносом быстрых ионов.

Важно отметить, что инжекция электронного пучка в плазменную ловушку сильно отличается от стандартных задач СВЧ-электроники или ускорительных комплексов. Прежде всего это необходимость получить интенсивный пучок с угловыми характеристиками, позволяющими проводить его через сильную магнитную пробку на входе в ловушку (адиабатическое сжатие пучка в магнитном поле). Так как время рабочего импульса ГДМЛ порядка 1 с, то из простых энергетических соображений ясно, что средняя мощность электронного пучка не должна превышать 10 МВт. Кроме того, электронная пушка работает в натекающем потоке теплой плазмы из установки. Очевидно, что избежать данной ситуации при осевой инжекции пучка в ловушку и разумных технологических решениях нельзя. Поэтому необходимо искать компромисс между степенью сжатия пучка в магнитном поле и допустимой плотностью потока плазмы, который неизбежно будет конвертироваться в ионы в ускоряющем промежутке электронно-оптической системы (ЭОС) пушки, что обычно приводит к нарушению генерации электронного пучка. Системы с натекающей на генератор пучка плазмой уже исследовались в ряде работ [6, 7], где продемонстрирована генерация пучка с мощностью до 1 МВт, ускоряющим напряжением до 100 кВ и длительностью импульса в сотни микросекунд.

Для успешной реализации возложенных на электронный пучок функций необходимо предварительно решить две задачи:

- проверить возможность инжекции электронного пучка с мощностью мегаваттного диапазона через пробочный узел с большой степенью сжатия пучка;
- определить диапазон плотностей потока ионов из плазмы, где генератор электронного пучка может работать надежно.

Кроме того, необходимо провести измерение общих параметров плазмы с целью определения степени воздействия электронного пучка на плазму, так как, несмотря на обилие экспериментальных и теоретических работ [4, 8] по изучению взаимодействия пучка и плазмы, многие эффекты ещё недостаточно изучены в диапазоне мощности пучков 0,1—100 МВт и квазистационарной (от 0,1 мс) и стационарной длительности.

Решение этих задач было основным мотивом цикла первых экспериментов по инжекции электронного пучка в ГДЛ.

### ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ ГДЛ

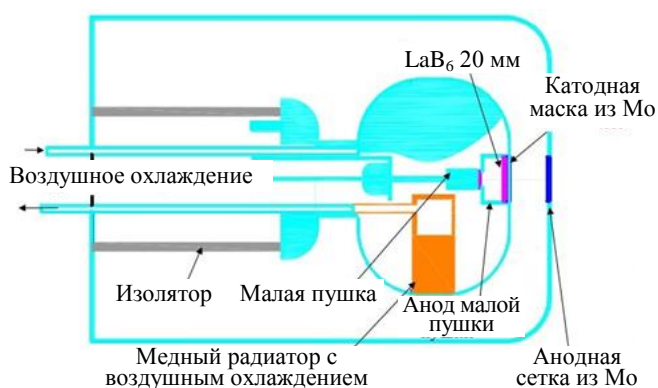


Рис. 2. Схематическое изображение электронной пушки, разработанной для экспериментов на установке ГДЛ

Для формирования пучка была разработана электронная пушка (рис. 2).

Катод из бориды лантана  $LaB_6$  диаметром 20 мм импульсно за 1 мин нагревался электронным пучком от дополнительной малой электронной пушки с энергией электронов 1,5 кэВ. Такая двухступенчатая схема позволила минимизировать тепловую нагрузку на катодный узел и использовать воздушное охлаждение. Анод был выполнен в виде молибденовой сетки толщиной 0,5 мм с 37 отверстиями диаметром 2,4 мм, расположенными в гексагональном порядке. Сум-

марная площадь отверстий составила  $1,67 \text{ см}^2$ . Катод закрыт молибденовой маской идентичной формы.

Параметры электронной пушки в ходе экспериментов на установке ГДЛ были следующими: ускоряющее напряжение до 45 кВ, ток пучка 8—12 А, длительность импульса 0,3 мс.

Электронная пушка была установлена в одном из торцевых баков-расширителей установки ГДЛ, как показано на рис. 3. На момент проведения экспериментов магнитная конфигурация установки представляла собой центральный соленоид с пристыкованными с торцов компактными пробкотронами, в каждом из которых было установлено по одному атомарному инжектору. В центральном соленоиде работали шесть инжекторов атомарных пучков. Максимальное пробочное отношение в такой системе составляло  $R = 16$ , магнитное поле в центре установки  $B_0 = 3 \text{ кГс}$ . Плазма, удерживаемая в ГДЛ в такой конфигурации, включает два компонента ионов с сильно различающимися характерными энергиями. Один компонент — тёплая «мишенная» плазма с температурой  $T_i \sim T_e \sim 100 \text{ эВ}$  и плотностью  $n_p \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  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 инжекции мощных атомарных пучков водорода или дейтерия и удерживается в адиабатическом режиме.

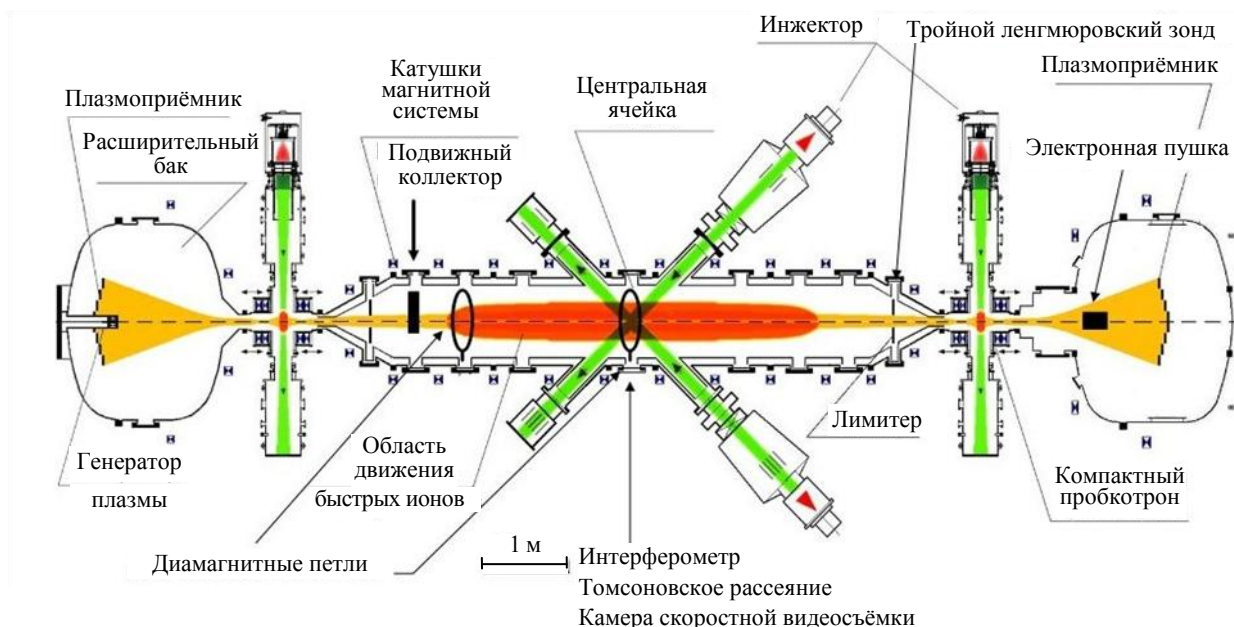


Рис. 3. Схема установки ГДЛ

На начальном этапе эксперимента электронный пучок инжектировался в режиме без создания плазмы, давление остаточного газа в установке ГДЛ при этом не превышало  $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ . Ток и энергия пучка регистрировались с помощью подвижного коллектора-калориметра, установленного внутри ловушки вблизи противоположного пробочного узла. Величина магнитного поля в области электронной пушки могла изменяться с помощью специальной катушки, установленной на баке-расширителе. В результате измерений показано, что при степени сжатия пучка в диапазоне  $K = 60—120$  ( $K$  — отношение магнитного поля в пробке к магнитному полю в области анода пушки) пучок без потерь транспортируется внутрь ловушки и регистрируется коллектором-калориметром.

### ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА В ХОЛОДНУЮ ПЛАЗМУ

Для изучения взаимодействия пучка с плазмой на установке ГДЛ был реализован так называемый «распадный» режим, при котором ловушка заполнялась в течение 4 мс тёплой плазмой с помощью плазменного генератора, расположенного в противоположном от места расположения электронной пушки баке-расширителе. Затем плазма свободно вытекала из ловушки и её плотность экспоненциально спадала во времени. Инжекторы атомарных частиц не включались.



Рис. 4. Зависимость линейной плотности плазмы от времени. Указаны промежутки времени, в котором работает плазменный генератор, и промежутки, в котором включался электронный пучок

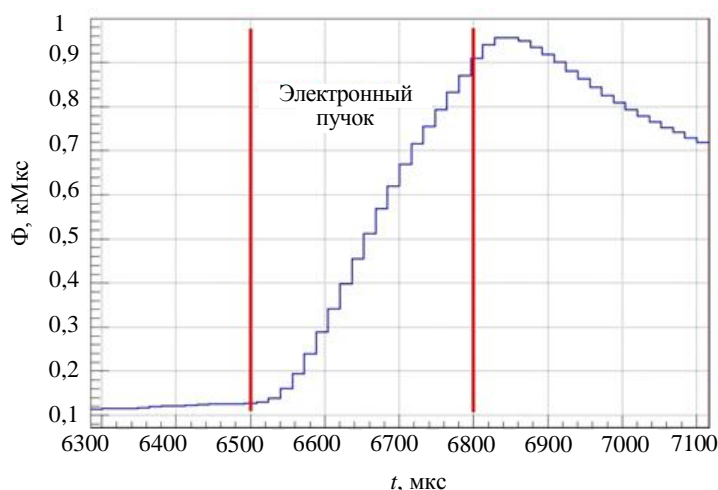


Рис. 5. Форма импульса сигнала диамагнитной петли. Указан интервал работы электронной пушки

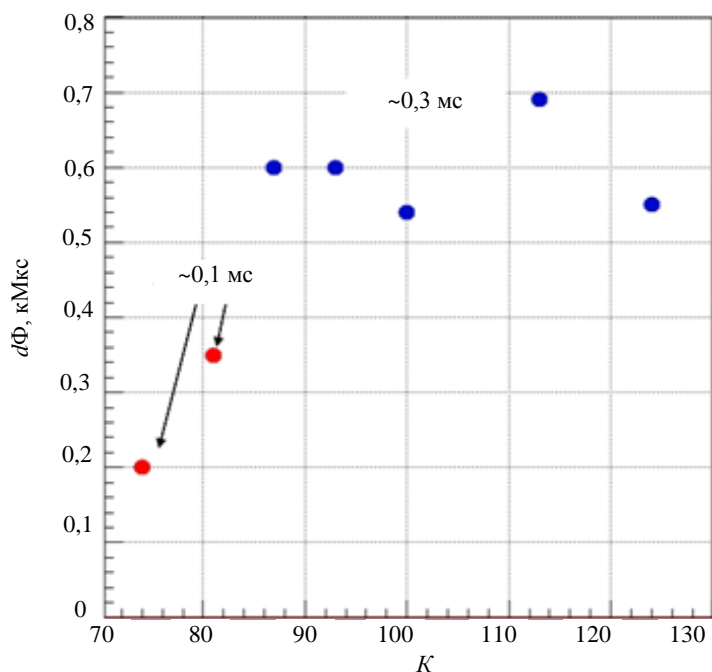


Рис. 6. Зависимость амплитуды диамагнитного сигнала от степени сжатия пучка в пробке

Рис. 4 демонстрирует временную диаграмму эксперимента по данным дисперсионного интерферометра.

Включая электронную пушку в различные моменты времени на стадии распада плазмы, можно было производить инъекцию электронов в плазму различной плотности в диапазоне  $n = 0\text{--}3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , электронная температура плазмы составляла 2 эВ.

На рис. 5 представлена типичная форма импульса сигнала диамагнитного зонда, расположенного в центральной плоскости установки ГДЛ. Амплитуда импульса сигнала диамагнитного зонда пропорциональна полной энергии плазменного столба. Из результатов измерений видно, что энергия плазмы растёт линейно в течение всего времени инъекции электронного пучка и стационарное состояние по нагреву плазмы пучком не достигается.

На рис. 6 показан основной результат данной серии измерений — зависимость амплитуды диамагнитного сигнала (энергии, переданной пучком плазме) от степени сжатия пучка в пробке  $K$ .

Видно, что в диапазоне степени сжатия  $K = 85\text{--}120$  энергия, переданная пучком плазме, остаётся неизменной. Отсюда следует вывод, что в этом диапазоне степени сжатия пучок беспрепятственно транспортируется внутрь ловушки и взаимодействует с плазмой. При  $K < 85$  плотность потока ионов на анод пушки превышает  $15 \text{ mA/cm}^2$ , что является предельной величиной диапазона надёжной работы электронной пушки. Длительность её работы сокращалась и ограничивалась пробоем. Электронная температура и плотность плазмы измерялись с помощью ленгмюровского зонда (рис. 7) и системы лазерного рассеяния (рис. 8).

По данным тройного зонда были построены радиальные профили температуры и плотности плазмы в момент перед началом инъекции электронного пучка и после первых 100 мкс его работы (рис. 9). Эти данные дают представление о взаимодействии электронного пучка с плазмой, при котором электронная температура растёт, а столб плазмы уширяется вдвое.

Для визуализации прохождения электронного пучка через плазму была использована

быстрая камера, регистрирующая видимое излучение. Камера была установлена в одном из центральных портов установки. На рис. 10 представлены кадры, сделанные камерой с интервалом 106 мкс.

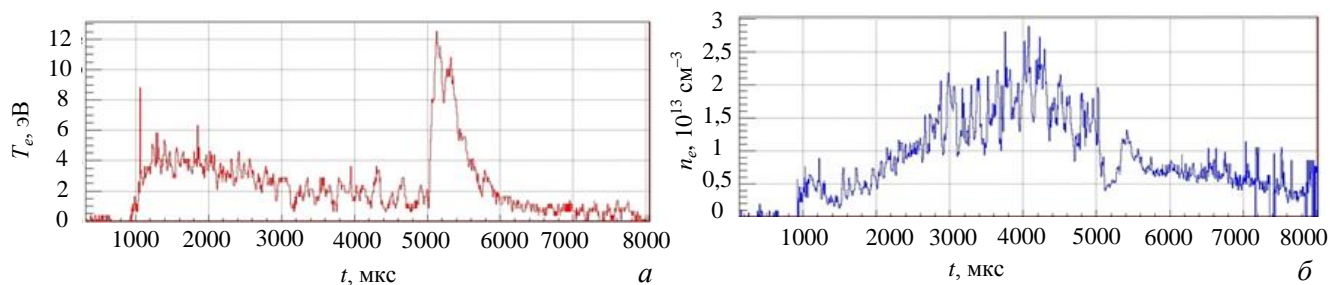


Рис. 7. Временной ход температуры (а) и плотности плазмы (б) по данным тройного ленгмюровского зонда, находящегося на расстоянии 2 см от оси установки. Электронный пучок включался в момент 5 мс

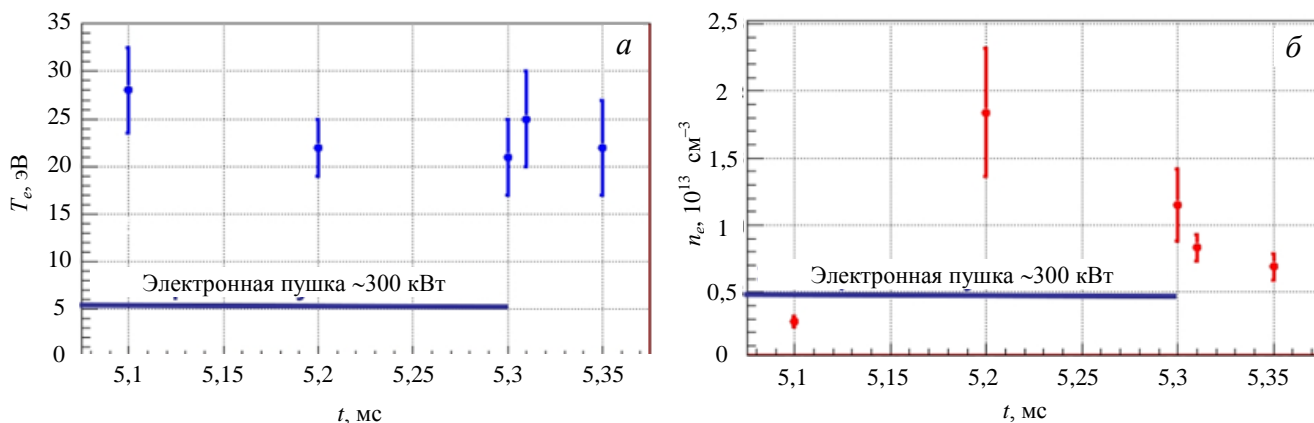


Рис. 8. Временной ход температуры (а) и плотности плазмы (б) на оси установки по данным системы томсоновского рассеяния

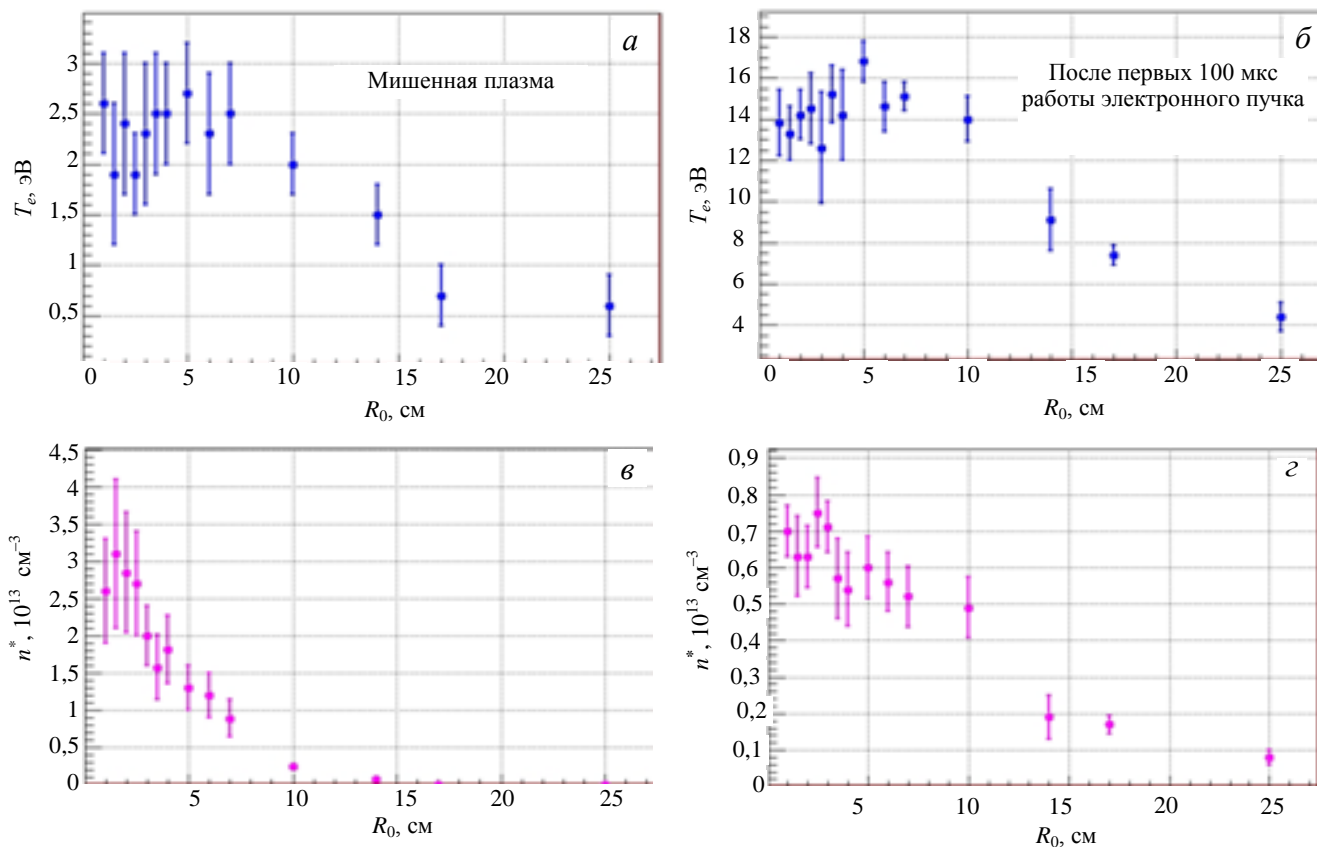


Рис. 9. Радиальные профили температуры (а, б) и плотности плазмы (в, з) до включения электронного пучка (а, в) и после первых 100 мкс его работы (б, з), полученные при помощи тройного зонда. Радиальные координаты указаны в пересчёте на центральную плоскость ловушки

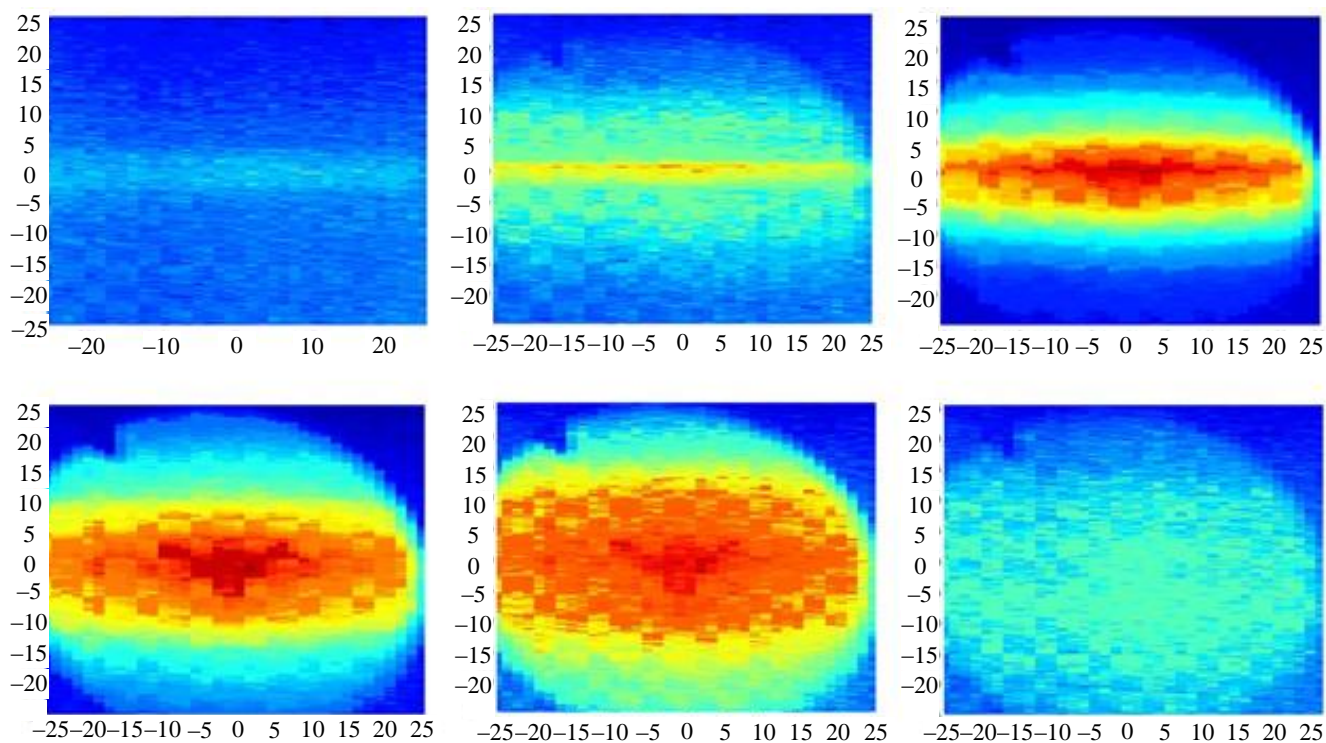


Рис. 10. Визуализация электронного пучка при помощи быстрой камеры

### ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА В ПЛАЗМУ С ГОРЯЧИМИ ИОНАМИ

Также проведена отдельная серия экспериментов, в которой электронный пучок инжектировался в плазму, нагретую шестью атомарными инжекторами в центральном соленоиде.

На рис. 11 приведён сигнал линейной плотности плазмы по данным дисперсионного интерферометра, расположенного в центральном сечении установки. Видно, что интерферограммы в выстреле с электронным пучком и без него не отличаются в течение длительности работы пучка. Также не было видно отличий в сигналах с диамагнитной петли, расположенной в точке остановки быстрых ионов и фиксирующей их энергосодержание (рис. 12).

По результатам, приведённым на рисунках, можно сделать вывод, что инжекция электронного пучка в плазму, нагреваемую атомарными инжекторами, не влияет на удержание образующихся горячих ионов.

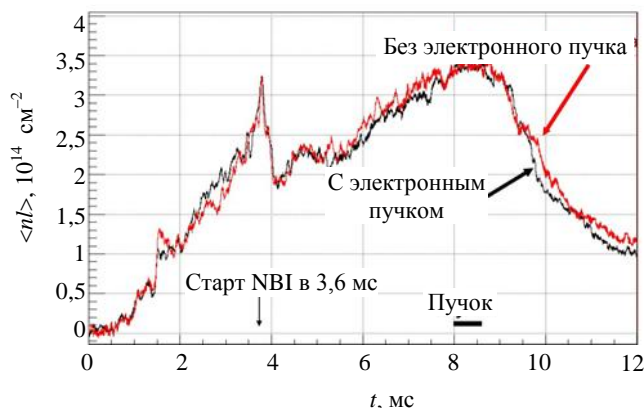


Рис. 11. Линейная плотность плазмы в зависимости от времени в выстрелах с электронным пучком и без него. Начало атомарной инжекции в 3,6 мс, окончание в 8,6 мс. Электронный пучок работал в диапазоне 8—8,3 мс

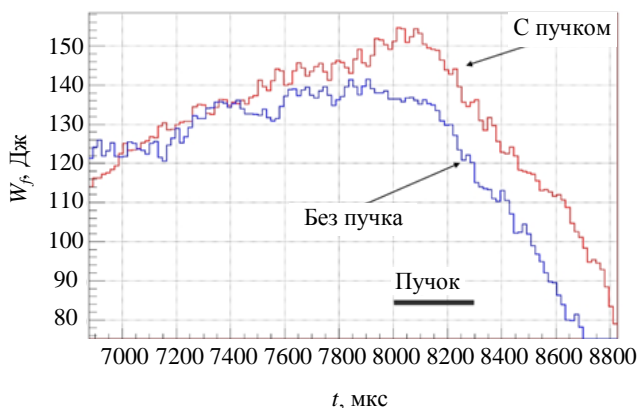


Рис. 12. Энергосодержание быстрых ионов в точке их остановки при инжекции электронного пучка в плазму и без его инжекции

Однако стоит отметить, что в режиме с атомарной инжекцией был зафиксирован рост электронной температуры по данным системы томсоновского рассеяния: в момент 8,2 мс (через 0,2 мс после начала работы электронного пучка) температура электронов составила по серии выстрелов  $T_e = 45,6 \pm 4,2$  эВ, без инжекции пучка при прочих равных условиях температура оказалась равной  $T_e = 29,2 \pm 2,7$  эВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам первых экспериментов с инжекцией электронного пучка на установке ГДЛ можно сделать следующие выводы:

— продемонстрирована возможность инжекции электронного пучка через магнитную пробку со степенью сжатия до  $K = 120$  в плазму ГДЛ;

— показано, что электронная пушка работает надёжно в диапазоне плотности тока ионов плазмы на её анод  $0 < j_i < 15$  мА/см<sup>2</sup>;

— энергосодержание плазмы растёт линейно в течение всего времени инжекции электронного пучка. При этом энергия, переданная от пучка к плазме, не зависит от степени сжатия пучка в пробке в диапазоне  $80 < K < 120$ ;

— инжекция электронного пучка не влияет на удержание горячих ионов;

— при инжекции электронного пучка мощностью 300 кВт в плазму, нагреваемую атомарными инжекторами, зафиксирован рост электронной температуры  $\Delta T_e \approx 15$  эВ.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведутся разработка и конструирование электронной пушки следующего этапа. Благодаря длительности рабочего импульса 1 мс эта пушка позволит приблизиться к стационарному режиму инжекции, мощность 1 МВт даст возможность зафиксировать больший рост электронной температуры плазмы.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Бурдакову А.В. за подробные консультации при проведении эксперимента, Субботину В.Г. за монтаж системы питания электронной пушки и Мыскину О.К. за конструирование отдельных узлов электронной пушки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Правительства Новосибирской области и РФФИ (грант 12-02-31511-мол-а).

## REFERENCES

1. **Beklemishev A.D. et al.** Fusion prospects of axisymmetric traps with multi-mirror end plugs. — In: Transactions of 38th EPS Conf. on Plasma Physics, 2011, p 1.045.
2. **Bagryansky P.A. et al.** Confinement of hot ion plasma with  $\beta = 0.6$  in the gas dynamic trap. — Fusion Science and Technology, 2011, vol. 59, № 1T, pp. 31—35.
3. **Burdakov A.V. et al.** Concept of fusion reactor based on multi-mirror trap. — Fusion Science and Technology, 2011, vol. 59, № 1T, pp. 9—16.
4. **Seidl M.** A Review of Electron Beam Heating of Magnetic Mirror Confined Plasmas, with Applications to the Tandem Mirror Experiment. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1979, UCRL-52759, 1979.
5. **Beklemishev A.D. et al.** — Fusion Science and Technology, 2010, vol. 57, № 4, p. 351—360.
6. **Azarova O.N., Zav'yalov M.A., Neganova L.A., Tzkhay V.N.** Bipolar diode with plasma anode. — Radiotekhnika i elektronika (Radio Engineering and Electronics), 1987, vol. XXXII, issue 10, p. 2200 (in Russian).
7. **Santoru J., Schumacher R., Gregoir D.** Plasma-anode electron gun. — J. of Applied Physics (ISSN 0021-8979), 1994, vol. 76, № 10, pt. 1, pp. 5629—5635.
8. **Smullin L.D.** A Review of the Beam Plasma Discharge. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, PFC-RR-80-7, 1980.



## AUTHORS

**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

**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

**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.

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

**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

**Maximov 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

**Prikhodko 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.Prikhodko@inp.nsk.su

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

**Savkin V.Ya.** Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Russia.

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

**Shulzhenko G.I.** Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, pr. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk; Russia.

Received 27 September 2012  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 14—22.