

ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОФОКУСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОМ СТЕНДЕ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД

© 2025 г. Н. А. Вадимов^{a, *}, Е. А. Виницкий^{a, b}, Л. Г. Елисеев^a, Н. К. Харчев^{a, c},
А. В. Мельников^{a, b}, Г. А. Саранча^{a, d}, М. А. Драбинский^a

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^cИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

^dМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*E-mail: vadimov_na@nrcki.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Изучены свойства диагностического пучка ионов таллия (Tl^+) в зависимости от параметров ионно-оптической системы инжектора диагностики плазмы зондированием пучком тяжелых ионов. Показана возможность получения как квазипараллельных, так и сходящихся пучков с фокусным расстоянием более 4 м, необходимых для создания диагностики для токамака Т-15МД. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования пучка в инжекторе.

Ключевые слова: плазма, токамак, диагностика, ионный пучок, зондирование плазмы пучком тяжелых ионов

DOI: 10.56304/S2079562924060447

ВВЕДЕНИЕ

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) – уникальная диагностика, позволяющая проводить прямые локальные измерения электрического потенциала высокотемпературной плазмы по всему сечению плазменного шнуря [1]. Кроме этого, диагностика позволяет одновременно измерять колебания потенциала и плотности плазмы, а также полоидального магнитного поля [2, 3]. Многоканальная версия диагностики позволяет измерять такие параметры как скорость вращения турбулентности и турбулентный поток частиц в основной плазме, что имеет важное значение для проведения исследований физики плазмы с магнитным удержанием [4]. В настоящее время разрабатывается проект диагностики для токамака Т-15МД [5, 6].

Принцип работы диагностики заключается в следующем. При пролете пучка зондирующих частиц через плазму происходит их вторичная ионизация по всей длине первичной траектории (рис. 1). При ионизации энергия ионов меняется на величину электрического потенциала плазмы в области наблюдения. Пучок вторичных ионов, вышедший из области наблюдения (SV), проходит через вторичный ионопровод и попадает в энер-

гетический анализатор, где определяется энергия пучка. На выходе из анализатора расположен позиционно-чувствительный пластинчатый детектор, регистрирующий ток и положение вторичного пучка по двум координатам. Предварительные оценки показывают, что ослабление пучка при пролете сквозь плазму токамака Т-15МД может достигать значений $I_{det}/I_0 \sim 10^{-6}–10^{-7}$ в режимах с высокой плотностью $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и магнитным полем $B_T = 1.5 \text{ Тл}$ [7]. Для зондирования плазмы токамака Т-15МД ионный пучок должен иметь интенсивность более 200 мА и фокусное расстояние в диапазоне 3–5 м [5, 8]. Чтобы максимизировать ток вторичного пучка, попадающего на детектор, необходимо точно фокусировать пучок в точке измерения в течение времени эксперимента на токамаке. Это позволит повысить соотношение сигнал/шум измеряемого сигнала, и, следовательно, диагностические возможности ЗПТИ. Работа организована следующим образом: в первой части приводится описание высоковольтного стенда ЗПТИ, на котором проводились измерения. Далее представлена схема эксперимента по измерению фокусного расстояния и полного тока пучка в зависимости от параметров ионно-оптической системы. В третьей части приводятся и обсуждаются полу-

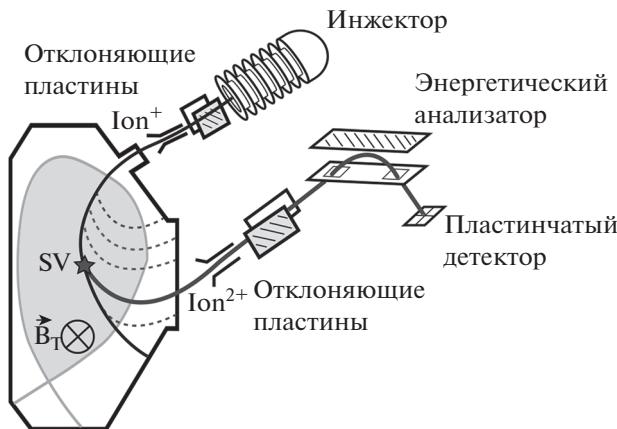


Рис. 1. Принципиальная схема ЗПТИ. Чёрная кривая – первичный пучок, серая сплошная – вторичный пучок, попавший в анализатор. Пунктир – веер вторичных траекторий. SV – область наблюдения, ВТ – тороидальное магнитное поле

ченные в эксперименте результаты. Далее проводится сравнение результатов эксперимента с численной моделью, построенной с помощью программного модуля HIBP-SOLVER. В Заключении формулируются основные выводы.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СТЕНД ЗПТИ

Эксперименты по получению длиннофокусных пучков проводятся на высоковольтном стенде

де ЗПТИ [9]. Стенд расположен на диагностической платформе токамака Т-10. Он состоит из высоковольтной системы питания, инжектора ЗПТИ, вакуумной пролетной камеры, набора из 4 проволочных датчиков и цилиндра Фарадея (рис. 2). Ключевым элементом инжектора ЗПТИ является эмиттерно-экстракторный блок (рис. 3). Он включает в себя нагревную вольфрамовую спираль, твердотельный ионный источник и экстракторный блок [10]. Конструкция эмиттерного блока позволяет быстро снимать его с инжектора для замены ионного эмиттера.

Эмиттер представляет собой твердотельную цеолитовую матрицу с ионами таллия Tl^+ , растворенными в ней методом ионного замещения [11]. Полученный в процессе замещения порошок запекается в вольфрамовой чашечке при плавно колеблющейся температуре. В результате получается твердый субстрат сероватого оттенка. Термо-ионные эмиттеры отличаются простотой эксплуатации, высокой емкостью ионов рабочего тела и низким разбросом энергии (0.1–1 эВ).

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Интенсивность и угловая расходимость пучка определяются параметрами ионно-оптической системы (рис. 4). Интенсивность пучка зависит от мощности нагрева эмиттера P_{fil} и вытягивающего напряжения U_{extr} , а фокусное расстояние – от

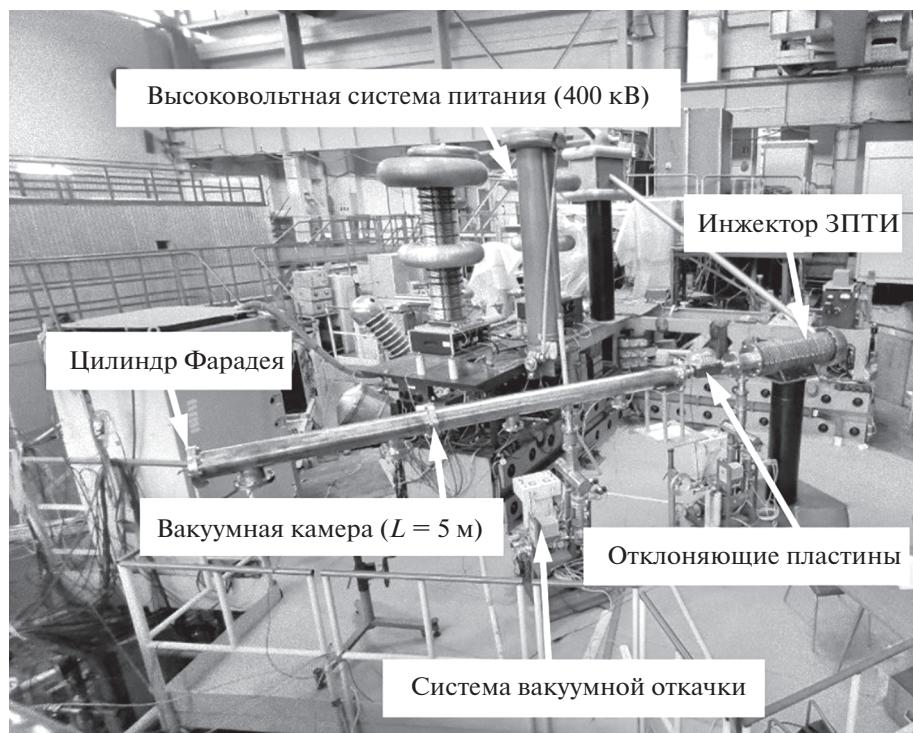


Рис. 2. Фотография высоковольтного стенда ЗПТИ.

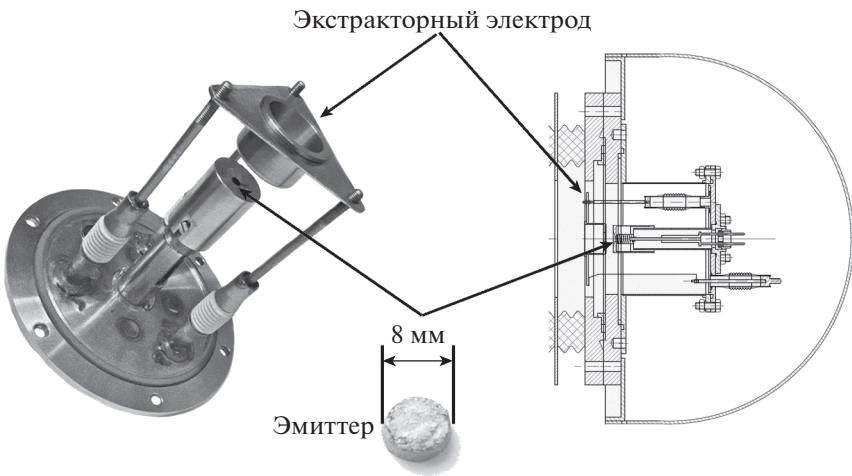


Рис. 3. Эмиттерно-экстракторный блок инжектора ЗПТИ. Слева: внешний вид; справа: эскиз. Посередине изображен термоионный эмиттер таллия Tl^+ .

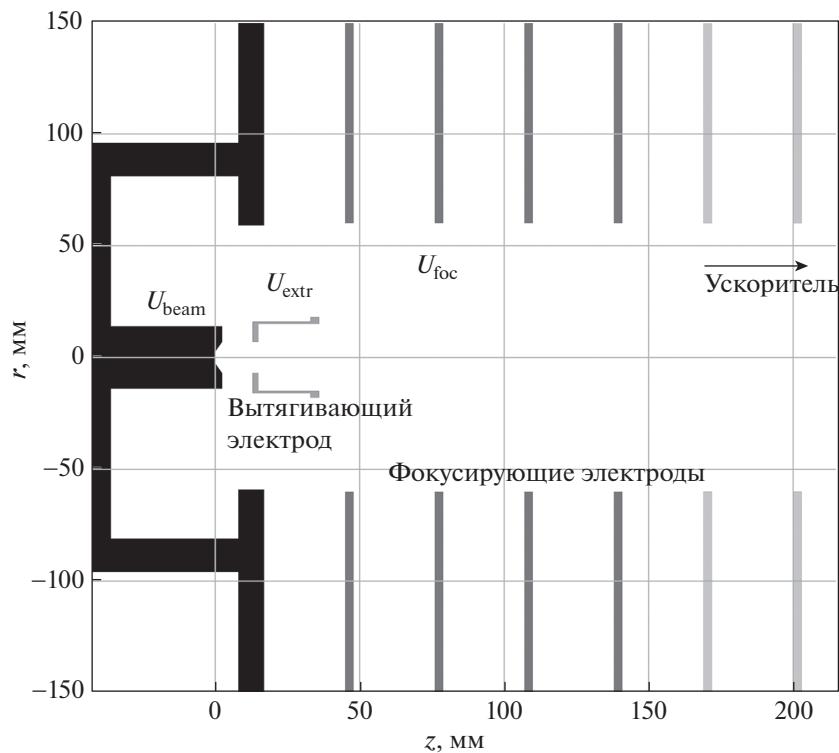


Рис. 4. Схема ионно-оптической системы инжектора ЗПТИ.

комбинации вытягивающего, фокусирующего U_{foc} и ускоряющего U_{beam} напряжений. Ускоряющее напряжение определяет также энергию ионов пучка.

Для определения положения точки фокуса на высоковольтном стенде используются три проволочных датчика (рис. 5), расположенных последовательно вдоль оси пролетной камеры стенда. При отклонении пучка от оси электрическим полем отклоняющих пластин, он попадает на про-

волоки датчиков, возбуждая в них ток. Диаметр пучка определяется по углу отклонения пучка и расстоянию между проволоками:

$$d_{beam} = \frac{w_{peak}}{L_{1-2}} \cdot 70 \text{ мм.}$$

По данным о диаметре пучка в трех и более точках вдоль оси макета устанавливается его расходимость и положение фокуса.

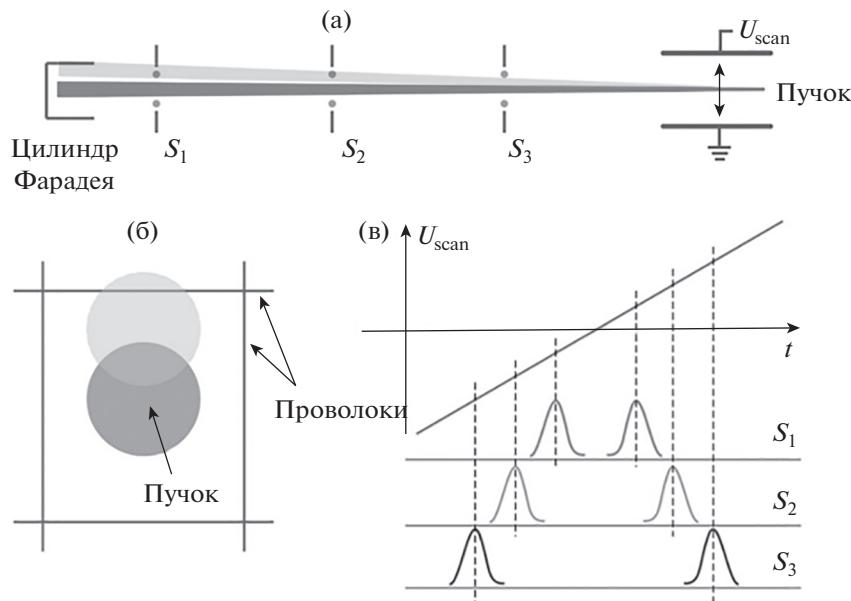


Рис. 5. Схема эксперимента на стенде ЗПТИ. Пучок отклоняется от своей оси с помощью отклоняющих пластин и попадает на проволоки датчиков. Сигналы тока с проволок позволяют определить диаметр пучка. Цилиндр Фарадея измеряет полный ток пучка.

Полный ток пучка измеряется цилиндром Фарадея. Он обеспечивает прямые измерения тока (рис. 6). Кроме того, ток пучка можно оценить по току нагрузки высоковольтного источника (рис. 7), а также интегрированием сигнала тока пучка на проволочных датчиках (рис. 8) при изменении сканирующего напряжения U_{scan} .

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ПУЧКА ОТ ПАРАМЕТРОВ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В работе исследуется зависимость свойств пучка от напряжений на электродах ионно-оптической

системы макета инжектора ЗПТИ. В проведенных экспериментах параметры ионно-оптической системы менялись в следующих диапазонах:

- $U_{\text{beam}} = 120-240$ кВ, шаг по энергии $\Delta E = 30$ кВ
- $P_{\text{fil}} = 26-45$ Вт, шаг по мощности $\Delta P = 5$ Вт
- $U_{\text{foc}} = -U_{\text{beam}}/48, -U_{\text{beam}}/24$
- $U_{\text{extr}} = 0-2$ кВ, шаг по вытягивающему напряжению $\Delta U = 100$ В.

Эти четыре параметра должны меняться независимо. Настоящая работа выполнена в условиях отсутствия независимого источника фокусирующего напряжения, поэтому U_{foc} задавалось как до-

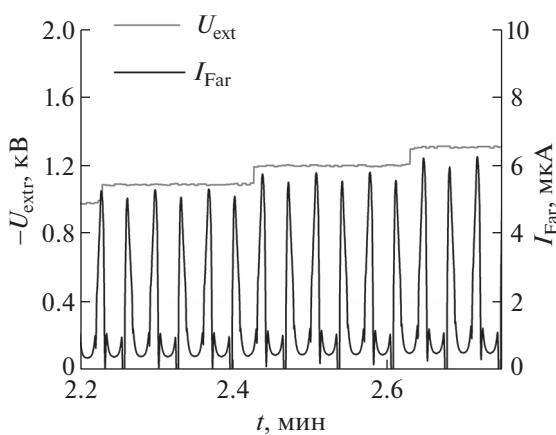


Рис. 6. Измерения тока пучка с помощью цилиндра Фарадея.

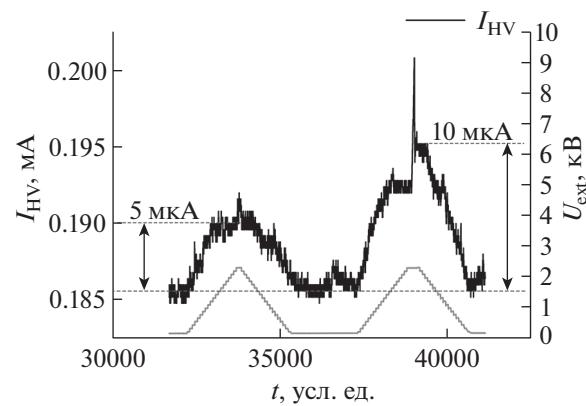


Рис. 7. Измерение тока нагрузки источника высокого напряжения (черная кривая) в эксперименте со ступенчатым изменением вытягивающего напряжения во времени (серая кривая).

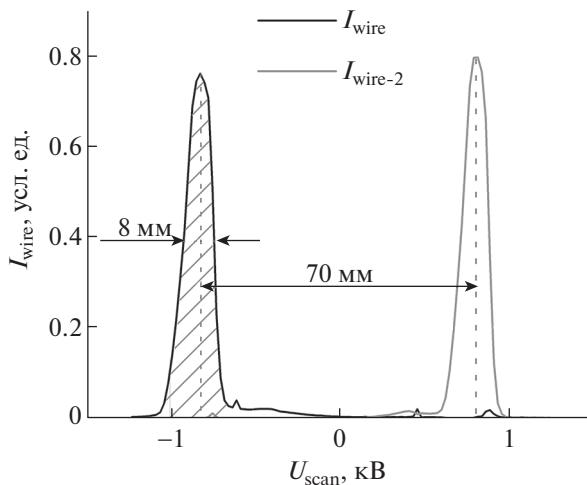


Рис. 8. Сигнал тока на проволочном датчике. Интеграл от функции зависимости тока от напряжения сканирования U_{scan} , или плотности тока ионов в пучке (заштрихованная область) равен полному току пучка

ля от высокого напряжения U_{beam} . Фокусирующий электрод был соединен со вторым кольцом линейного ускорителя, поэтому в работе рассмотрены два значения его потенциала, равные $-1/48U_{\text{beam}}$ и $-1/24U_{\text{beam}}$. Все остальные параметры задавались независимо. U_{foc} и U_{extr} задавались относительно высокого напряжения ускорителя U_{beam} .

С помощью проволочных датчиков была изучена зависимость профиля тока пучка от вытягивающего напряжения (рис. 9). Показано, что с ро-

стом U_{extr} ток пучка увеличивается, но вместе с тем профиль пучка теряет гауссову форму. Оптимальное значение U_{extr} , при котором сохраняется гауссова форма профиля, а ток максимальен, составляет $-0.9 \dots -1$ кВ.

Огибающая поверхность ионного пучка, свободно летящего по камере от ускорителя до цилиндра Фарадея, имеет форму гиперболоида. Положением фокуса пучка будем считать положение точки “перетяжки”, в которой диаметр пучка минимальен. Поскольку интересующая нас область фокусных расстояний находится в дальней части вакуумной камеры, для определения фокусного расстояния достаточно линейной аппроксимации расходимости пучка. Такую расходимость можно определить как $r' = dr/dz$, где r' – коэффициент наклона прямой, а z – координата вдоль оси пучка (рис. 10). Таким образом, по знаку r' можно определить, сходится ($r' < 0$) или расходится ($r' > 0$) пучок в интересующей нас области. Если $r' \sim 0$, пучок можно назвать квазипараллельным.

Для определения зависимости расходимости пучка от параметров ИОС было проведено полное сканирование по области изменения всех четырех параметров ИОС: U_{beam} , P_{fil} , U_{foc} , U_{extr} . На рис. 11 приведены графики зависимости расходимости пучка от U_{extr} при различных параметрах ИОС для потенциала $U_{\text{foc}} = -U_{\text{beam}}/48$.

Видно, что при этом значении фокусирующего напряжения расходимость монотонно растет с увеличением U_{extr} , и все полученные пучки получаются строго расходящимися. Это говорит о том, что такое U_{foc} слишком мало.

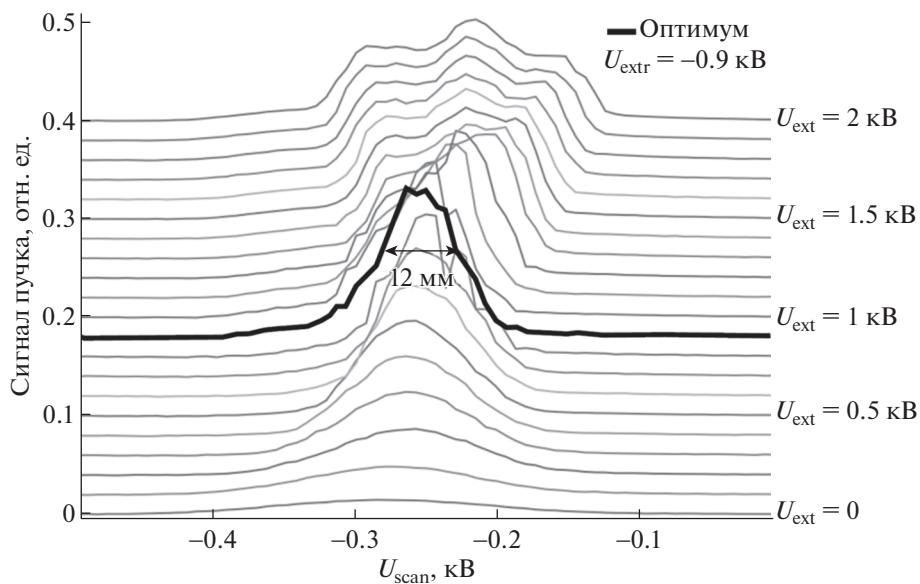


Рис. 9. Зависимость профиля пучка от U_{extr} . При увеличении U_{extr} ток пучка, вычисляемый как площадь под кривой $I_{\text{wire}}(U_{\text{scan}})$, растет. Начиная с $U_{\text{extr}} = 1$ кВ профиль тока пучка теряет гауссову форму.

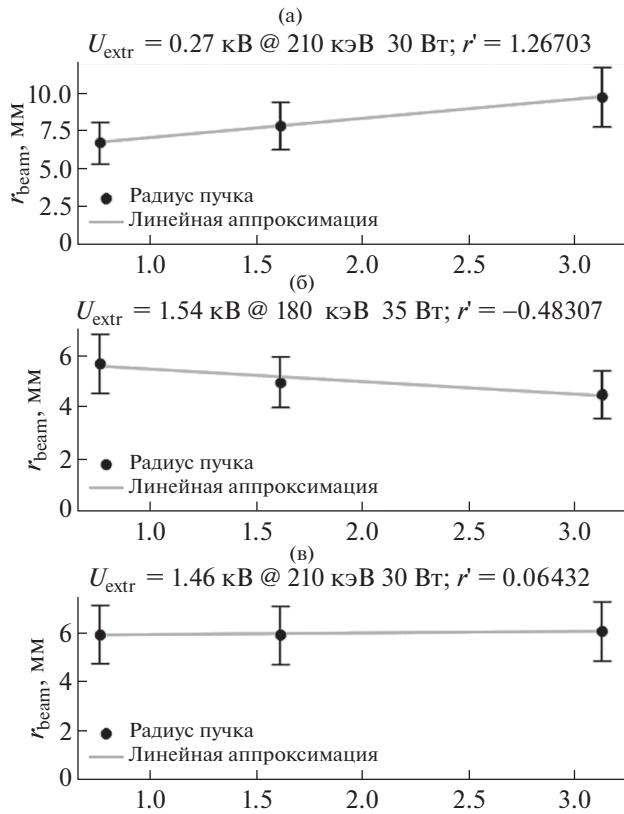


Рис. 10. Примеры расчета расходимости пучка по измерению его радиуса r_{beam} на проволочных датчиках: (а) расходящийся пучок, (б) сходящийся пучок, (в) квазипараллельный пучок.

На рис. 12 приведены примеры результатов измерений с $U_{foc} = -U_{beam}/24$ для энергий 180 и 210 кэВ. Рисунок показывает, что с увеличением U_{extr} расходимость пучка уменьшается, и, начиная с некоторого значения, пучок начинает сходиться. Это видно на графике зависимости $r'(U_{extr}, P_{fil})$ для пучка с энергией 180 кэВ. На аналогичном графике для энергии 210 кэВ видно, что полученные пучки являются расходящимися, а зависимость имеет локальный минимум в области оптимального $U_{extr} = 1.0\text{--}1.5$ кэВ в зависимости от мощности нагрева спирали. Поскольку U_{foc} в этих экспериментах оставалось неизменным для

каждого значения энергии, по-видимому, значение $U_{foc} = -U_{beam}/24$ было неоптимальным для энергий более 180 кэВ. Это предположение предстоит проверить в эксперименте с независимым источником фокусирующего напряжения. Тем не менее, в результате экспериментов удалось показать, что сходящиеся пучки могут быть получены при разных комбинациях E_{beam} , U_{extr} и P_{fil} , см. рис. 12а.

Особенно наглядно наличие экстремума расходимости видно на графиках зависимости диаметра пучка от параметров ИОС на значительном расстоянии от выхода из инжектора (рис. 13). На этом рисунке представлены сканы по мощности P_{fil} (а) и по энергии E_{beam} (б) зависимости диаметра пучка на $z = 5$ м от инжектора. Это расстояние соответствует положению цилиндра Фарадея в пролетной камере стенда и примерно соответствует положению входной апертуры вторичного ионопровода в проекте диагностики ЗПТИ токамака Т-15МД. На обоих графиках видно, что минимальный диаметр пучка находится в области оптимального $U_{extr} \sim -1$ кэВ. Минимальный диаметр пучка при разных энергиях составил от 8 до 15 мм при мощности $P_{fil} = 30$ Вт, а при энергии 210 кэВ – от 11 до 20 мм при мощности нагрева эмиттера от 26 до 45 Вт.

В табл. 1 представлены наилучшие варианты пучков, полученных в рассмотренной области параметров. Минимальный размер и самая низкая расходимость (первая строка) составили 8 мм и -0.15 мм/м соответственно. Наибольший полученный ток – 15 мА (вторая строка). В третьей и четвертой строках представлены оптимальные пучки, полученные при высоких энергиях 210 и 240 кэВ. Пучок с энергией 240 кэВ обладает наилучшей комбинацией тока, расходимости и минимального диаметра в области измерений. Энергия этих пучков лежит в области, пригодной для измерений в плазме Т-15МД в режимах $B_T = 1\text{--}1.5$ Тл, $I_{pl} = 1$ МА.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

С помощью программного модуля НИВР-SOLVER была построена численная модель движения частиц пучка в геометрических условиях стенда, учитывающая параметры и геометрию ИОС [12].

Таблица 1. Оптимальные параметры пучков, полученных в эксперименте на высоковольтном стенде для различных энергий

E_{beam} , кэВ	I_{beam} , мА	$d_{z=5}$, мм	r' , мм/м	U_{extr} , кэВ	P_{fil} , Вт
180	5	8	-0.15	-1.1	30
210	15	35	1	-2	45
210	8	19	1.5	-0.9	45
240	6	13	0.5	-1	30

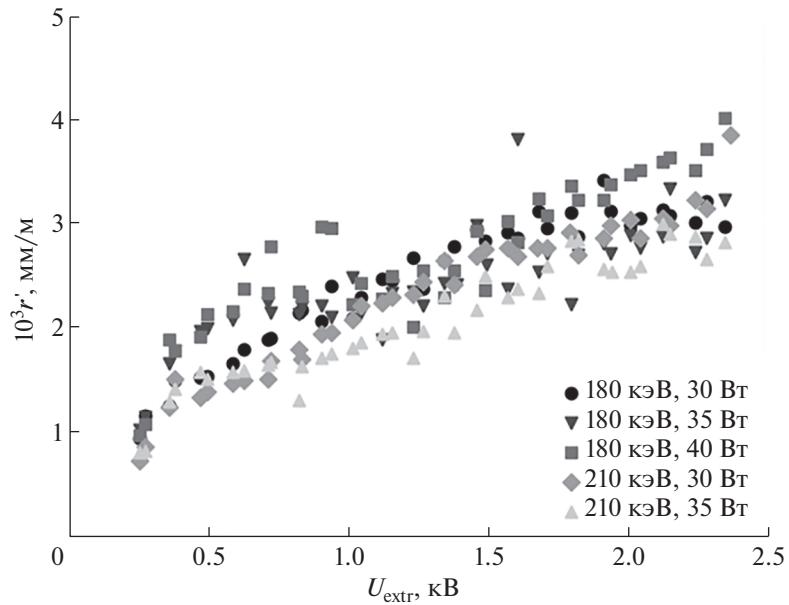


Рис. 11. зависимость расходимости пучка $r' = dr/dz$ от U_{extr} при различных параметрах ИОС для фокусирующего напряжения $U_{\text{foc}} = -U_{\text{beam}}/48$.

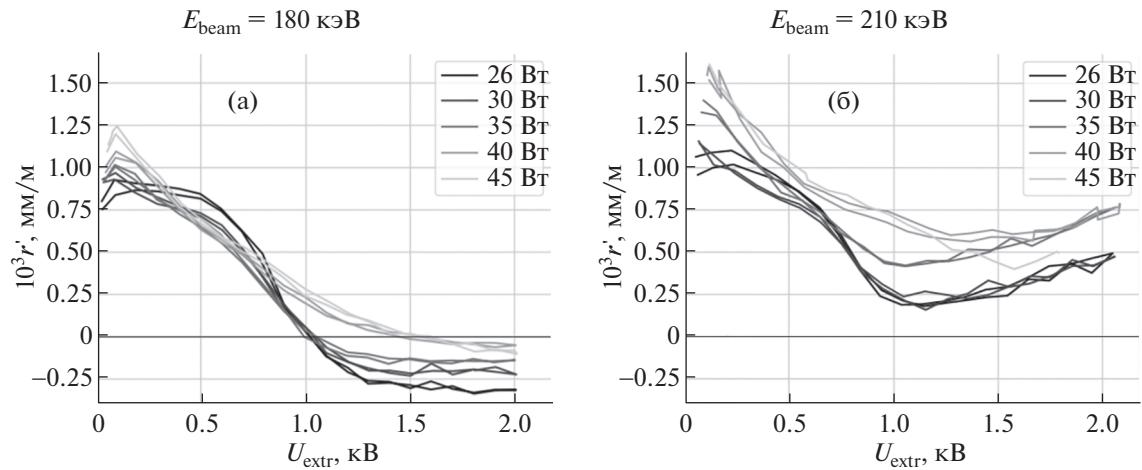


Рис. 12. Зависимость расходимости пучка от U_{extr} и P_{fil} при $E_{\text{beam}} = 180$ кэВ (а) и 210 кэВ (б). С увеличением U_{extr} расходимость пучка уменьшается, при энергии 180 кэВ начиная с некоторого значения U_{extr} пучок начинает сходиться. При энергии 210 кэВ фокусирующее напряжение не является оптимальным, из-за этого все полученные пучки являются слаборасходящимися.

Модель основана на решении уравнения движения заряженной частицы в электрическом поле инжектора. Она позволяет рассчитывать фокусное расстояние пучка и его расходимость. Экспериментальные результаты используются для валидации модели (рис. 14). На текущем этапе разработки модели полного согласия между расчетом и экспериментом не достигнуто, хотя в некоторых случаях модель показывает результаты, качественно согласующиеся с экспериментальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На высоковольтном стенде показана возможность получения квазипараллельных ионных пучков ($E_{\text{beam}} = 180$ кэВ), а также пучков, хорошо сфокусированных ($d \leq 15$ мм) на расстоянии 5 м, что превышает расстояние до точки измерения в условиях Т-15МД (в среднем 4 м). Полученные пучки имеют энергию до 240 кэВ, которая соответствует интервалу измерений в плазме Т-15МД с полем B_T 1–1.5 Тл. Результаты моделирования

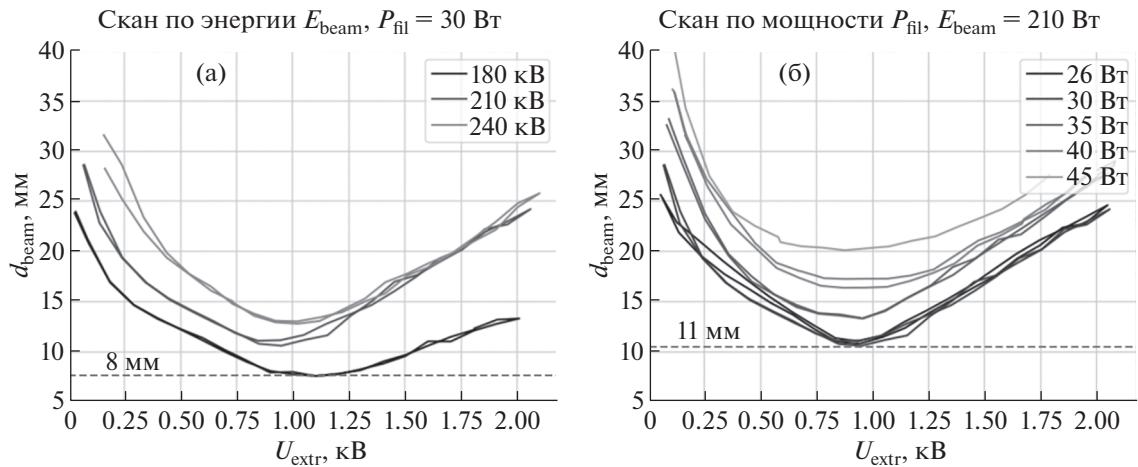


Рис. 13. Зависимость диаметра пучка на расстоянии 5 м от точки инжекции от U_{extr} и P_{fil} .

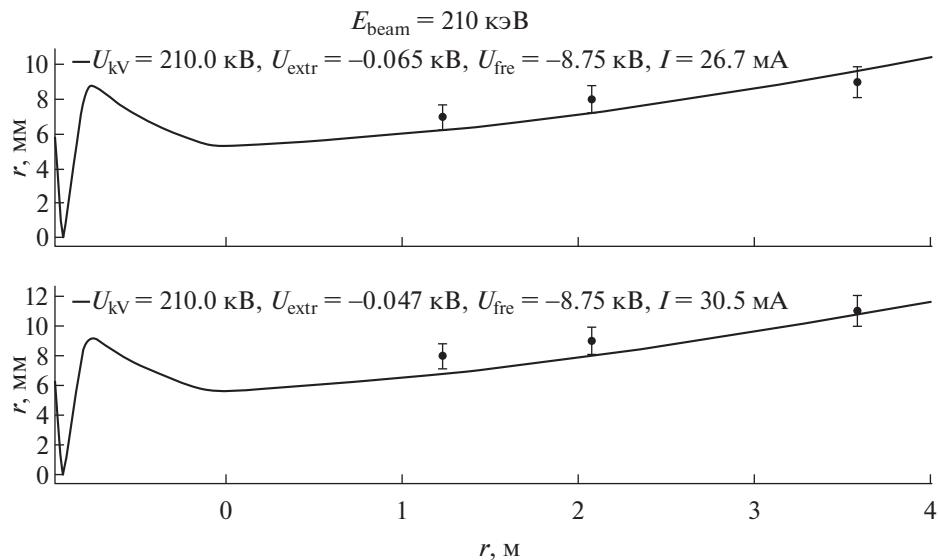


Рис. 14. Сравнение экспериментальных результатов (точки) с моделированием пролета пучка (черные кривые).

пучка показывают качественное совпадение с экспериментальными результатами, численная модель требует дальнейшего уточнения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”. Работа Н.А. Вадимова, Е.А. Виницкого, Г.А. Саранчи и Н.К. Харчева поддержана Российским научным фондом, грант № 23-72-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Jobes F.C., Hickok R.L.* // Nucl. Fusion. 1970. V. 10 (2). P. 195.

2. *Donné A.J.H. et al.* // Czech. J. Phys. V. 52 (10). P. 1077–1096. <https://doi.org/10.1023/A:1021024005348>
3. *Melnikov A.V. et al.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57 (7). P. 072004. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5382>
4. *Melnikov A.V.* // Nat. Phys. 2016. V. 12. P. 386–390. <https://doi.org/10.1038/nphys3759>
5. *Drabinskiy M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Lysenko S.E., Khabanov Ph.O., Vadimov N.A., Krokhalev O.D., Gorbun M.S., Sarancha G.A., Gutsevich E.I., Prokofieva T.Yu., Nedbaylov K.O.* // XIX All-Russ. Conf. Diagnostics of High-Temperature Plasma. Sochi. 2021. Book of Abstr. P. 163–166.

6. *Melnikov A.V. et al.* // *Fusion Eng. Des.* 2015. V. 96–97. P. 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.080>
7. *Krokhalev O.D., Eliseev L.G., Melnikov A.V.* // *X Int. Conf. Laser, Plasma Research and Technology – LaP-las-2024. Moscow.* 2024. Book of Abstr. P. 172.
8. *Krupnik L.I., Barcala J., Chmyga O.O., et al.* // *Vopr. Atom. Nauki Tekh. Ser.: Fiz. Plazmy.* 2020. V. 130 (6). P. 190–194 (in Russian).
9. *Vadimov N.A., Sarancha G.A., Drabinsky M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Komarov O.D.* // *Vopr. Atom. Nauki Tekh. Ser.: Fiz. Plazmy.* 2020. V. 130 (6). P. 200–203 (in Russian).
10. *Bondarenko I.S., Chmyga A.A., Dreval N.B., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Melnikov A.V., Perfilov S.V.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. V. 75. P. 1835 (2004).
11. *Krupnik L.I., Komarov A.D., Kozachek A.S., Melnikov A.V., Nedzelskiy I.S.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* V. 36 (4). P. 1536–1544.
12. *Shelegeda I.A., Ammosov Ya.M., Vadimov N.A., et al.* // *LI Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Fusion. Moscow.* 2024. Book of Abstr. P. 110.

Achievement of Long-Focus Ion Beams on the High Voltage Test Bench for Heavy Ion Beam Probe Diagnostics on the T-15MD Tokamak

N. A. Vadimov^{1, *}, E. A. Vinitsky^{1, 2}, L. G. Eliseev¹, N. K. Kharchev^{1, 3},
A. V. Melnikov^{1, 2}, G. A. Sarancha^{1, 4}, and M. A. Drabinsky¹

¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

³ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, Moscow oblast, 141701 Russia

*e-mail: vadimov_na@nrcki.ru

Received May 27, 2024; revised June 3, 2024; accepted June 11, 2024

Abstract—The dependence of the focal length of the thallium (Tl^+) ion beam on the parameters of the ion-optical system of the injector for heavy ion beam probe plasma diagnostics has been studied. The possibility of obtaining quasi-parallel beams and converging beams with a focal length of more than 4 m has been shown. Experimental results are compared with the results of computer modeling of the beam trajectory in the injector.

Keywords: plasma, tokamak, diagnostics, ion beam, heavy ion beam probe of a plasma