

УДК 533.9.082.79

ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ T-10

М.А. Драбинский^{1, 3}, Ф.О. Хабанов^{2, 3}, А.В. Мельников^{3, 4}, Л.И. Крупник⁵, А.С. Козачек⁵, А.Д. Комаров⁵,
А.И. Жежера⁵

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁵Институт физики плазмы, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Описана модернизация установки для диагностики плазмы с помощью пучка тяжёлых ионов на токамаке T-10, который работает в НИЦ «Курчатовский институт». Модернизация направлена на увеличение плотности тока первичного пучка, необходимое для расширения диапазона исследуемых частот колебаний потенциала и плотности электронов до 500 кГц, диапазона плотности электронов до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и повышения отношения сигнал/шум при исследовании геодезических акустических мод в режимах с высокой плотностью. Предполагается увеличение значений тока пучка до 300 мкА при энергии пучка до 300 кэВ и диаметре пучка 7—10 мм. Описаны конструкция нового эмиттерно-экстракторного блока и система его питания, а также внутрикорпусные элементы первичного ионопровода, подготовленные к увеличению тока первичного ионного пучка.

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, потенциал плазмы, ионный пучок, плотность тока.

ENGINEERING ASPECTS OF MODERNISATION OF HEAVY ION BEAM PROBE DIAGNOSTICS ON THE T-10 TOKAMAK

M.A. Drabinski^{1, 3}, F.O. Khabanov^{2, 3}, A.V. Melnikov^{3, 4}, L.I. Krupnik⁵, A.S. Kozachek⁵, A.D. Komarov⁵, A.I. Zhezhera⁵

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

³National Research Center «Kurchatov Institute» Moscow, Russia

⁴National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

⁵Institute of plasma physics NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov, Ukraine

The upgraded Heavy Ion Beam Probe (HIBP) diagnostic system for the T-10 tokamak operating at the National Research Center «Kurchatov Institute» is presented. The upgrade is focused on the increase in the primary beam current density, which is required for the extension of the frequency range of the HIBP signals (potential and electron density oscillations) to 500 kHz, increasing the electron density operating limit to $5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ and the rise in the signal intensity to the noise ratio during the studies of the geodesic acoustic modes at the high plasma density. This becomes possible due to a newly designed emitter-extractor unit of the HIBP accelerator aiming at providing the primary beam with the current of 300 μA at the energy of the 300 keV and diameter of 7—10 mm. The new in-vessel components of the primary beamline (wire sensors and Faraday cup) were upgraded accordingly to be able to provide the probing beam with the advanced parameters to the plasma.

Key words: high-temperature plasma, plasmas potential, ion beam, current density.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-81-90

ВВЕДЕНИЕ

Зондирование плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗППТИ) — единственный способ измерения электрического потенциала в горячей области плазмы тороидальных термоядерных установок [1, 2]. Впервые эта диагностика была применена на токамаке ST Джобсом и Хикоком в 1970 г. [3]. В отличие от стандартной методики электрических зондов ЗППТИ не вызывает возмущений в плазме. Измерения, проводимые этим методом, являются прямыми и локальными, они охватывают как центр, так и периферию плазмы.

ЗППТИ является многофункциональной диагностикой, наряду с потенциалом плазмы она даёт возможность измерить колебания плотности электронов и поля тока плазмы. Областью локализации измерений является точка вторичной ионизации ионного пучка в плазме. Важно отметить, что измерение всех трёх величин происходит одновременно, что даёт возможность проводить совместный анализ электростатического и электромагнитного компонентов турбулентности плазмы. Высокое временное разре-

шение позволяет исследовать колебания потенциала в широком частотном диапазоне, в настоящее время вплоть до 300 кГц [4]. Ожидается, что после модернизации появится возможность исследовать колебания частотой до 500 кГц.

На токамаке Т-10, действующем в НИЦ «Курчатовский институт», измерения с помощью ЗППТИ начали проводиться с 1991 г. [5, 6] в омическом режиме с низкой плотностью и пониженным магнитным полем $B = 1,5$ Тл, используя ионы цезия Cs^+ . Позднее диагностика ЗППТИ несколько раз модернизировалась, что позволило, в конечном итоге, проводить измерения как в омическом режиме, так и в режиме с дополнительным нагревом с помощью электронно-циклотронного резонанса с высоким магнитным полем $B \leq 2,5$ Тл и плотностью плазмы до $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, используя ионы таллия Tl^+ [7]. Последние исследования с помощью ЗППТИ на токамаке Т-10 ориентированы на изучение широкополосной турбулентности в плазме [8] и квазикогерентных мод плазменных колебаний, таких как геодезическая акустическая мода (ГАМ) [9—12] и магнитогидродинамическая (МГД) тиринг-мода [13, 14].

ГАМ — это высокочастотный класс зональных потоков, который рассматривается как механизм саморегуляции турбулентности в плазме [15, 16]. Недавно было показано, что ГАМ может взаимодействовать с широкополосной турбулентностью в области ионно-дрейфовых частот (100—300 кГц) [17, 18], поэтому исследование совокупности этих процессов очень важно для понимания механизмов турбулентного переноса частиц и энергии в горячей области плазмы.

Взаимодействие между надтепловыми частицами, такими как нагретые ионы, ускоренные электроны и термоядерные альфа-частицы, с основной плазмой может приводить к возбуждению собственных альфвеновских мод, которые теоретически могут иметь значительное влияние на перенос как надтепловых частиц, так и тепловых частиц плазмы [19]. Таким образом, исследование собственных альфвеновских мод может внести значительный вклад в физику термоядерного синтеза. Альфвеновские моды, возбуждаемые инжекцией атомов, были исследованы с помощью ЗППТИ на стеллараторе TJ-II [20—23]. Более того, на TJ-II были обнаружены моды, возбуждаемые быстрыми электронами [24]. На Т-10 предполагается найти подобные моды в частотном диапазоне до 500 кГц.

Важным параметром для диагностики ЗППТИ, определяющим амплитуду выходного сигнала, является плотность тока ионов зондирующего пучка. Чем выше эта величина, тем выше максимальная плотность плазмы, при которой возможно проводить измерения, и тем выше максимальная частота детектируемых колебаний.

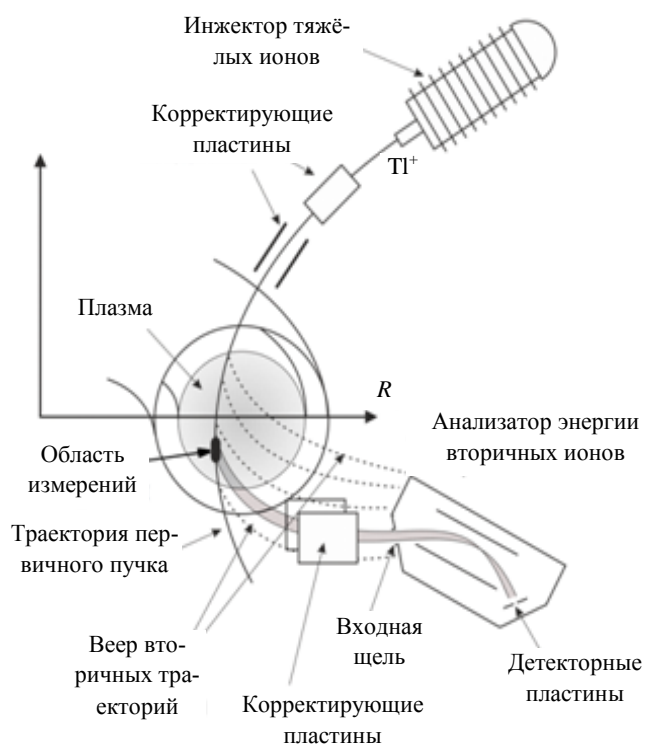


Рис. 1. Принципиальная схема работы ЗППТИ

Рис. 1 демонстрирует физические принципы измерений с помощью ЗППТИ [25]. Пучок ионов тяжелых элементов (таллий, цезий или золото), сформированный и ускоренный в инжекторе ионов, попадая в плазму, движется по ларморовской окружности под действием магнитного поля установки. Масса ионов и их энергия подбираются таким образом, чтобы радиус ларморовской окружности был сопоставим с размерами вакуумной камеры установки. В каждой точке траектории пучка в плазме происходит вторичная ионизация его ионов и образуется веер траекторий вторично ионизованных (вторичных) частиц. Ионы пучка в точке вторичной ионизации получают дополнительную энергию, равную потенциалу плазмы в этой точке.

На пути веера вторичных траекторий устанавливается малоапертурный энергетический анализатор, который «вырезает» из всего веера часть вторичных траекторий. Попадание этих траекторий в энергетический анализатор под требуемым углом влёта обеспечивают корректи-

рующие пластины вторичного ионпровода. Область вторичной ионизации ионов, попавших в энергетический анализатор, является точкой измерения, её положение определяется с помощью численного расчёта траекторий ионов. На рис. 2 изображена диагностика ЗППТИ, работающая на токамаке Т-10.

Положение области измерения можно перемещать по сечению плазмы с помощью изменения двух параметров — энергии первичного пучка и угла его входа в плазму, который задаётся с помощью корректирующих пластин первичного ионпровода.

Меняя энергию первичного пучка при фиксированном угле входа пучка в плазму, можно сдвигать точку вторичной ионизации по так называемой детекторной линии постоянного угла, меняя угол входа при фиксированной энергии пучка — по детекторной линии постоянной энергии. Множество линий постоянной энергии пучка и линий постоянного угла входа пучка в плазму образует детекторную сетку, которая показывает, в какой области могут быть проведены измерения с помощью ЗППТИ. Пример детекторной сетки показан на рис. 3.

После прохождения вторичного ионпровода веер вторичных частиц попадает в анализатор, на входе которого стоит 5-щелевая апертура, которая вырезает из него пять отдельных фрагментов (вторичных пучков), формируя тем самым пять отдельных пространственных каналов наблюдения в плазме.

Под действием постоянного электрического поля плоскопараллельных пластин анализатора пучок движется по параболе (рис. 4) и попадает на детекторные пластины. С них сигнал передаётся на усилитель, далее по оптоволокну он подаётся на АЦП, расположенные в пультовой диагностики.

Детектор каждого из пяти вторичных пучков составлен из четырёх пластин. Полный ток пучка представляет собой сумму парциальных токов пластин:

$$I = i_1 + i_2 + j_1 + j_2$$

(обозначения i, j соответствуют левым и правым пластинам, индексы 1, 2 — верхним и нижним (рис. 5)).

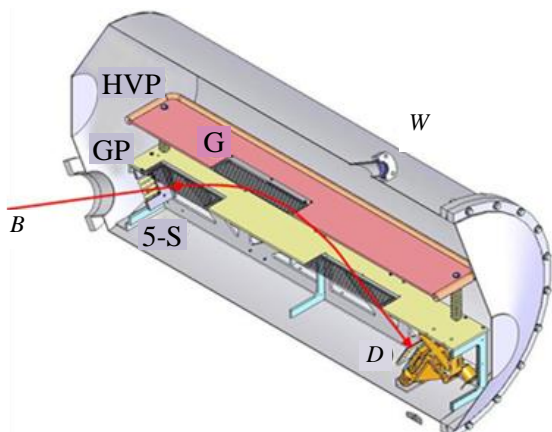


Рис. 4. Прохождение ионного пучка в объёме энергетического анализатора: B — ионный пучок; GP и HVP — заземлённая и высоковольтная пластины анализатора; G — проволочная сетка; 5-S — щели анализатора; W — юстировочный патрубок; D — детектор

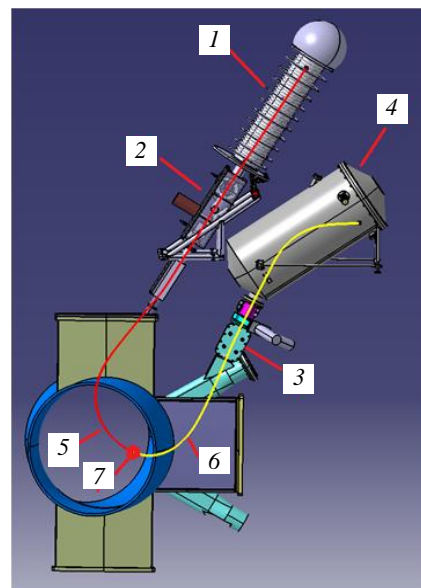


Рис. 2. Аппаратура диагностики ЗППТИ на токамаке Т-10, вид сбоку: 1 — ускоритель зондирующих ионов; 2 — первичный ионпровод; 3 — вторичный ионпровод; 4 — энергетический анализатор; 5 — первичная траектория; 6 — вторичная траектория; 7 — точка измерения

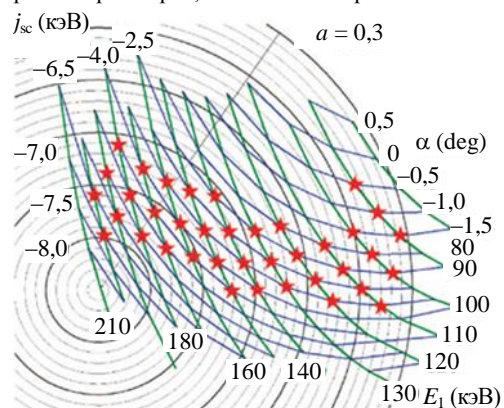


Рис. 3. Детекторная сетка для ионов Pi^+ , $B_z = 1,5$ Тл: — — линии равного угла; — — линии равной энергии; ★ — области, в которых возможны 5-канальные измерения

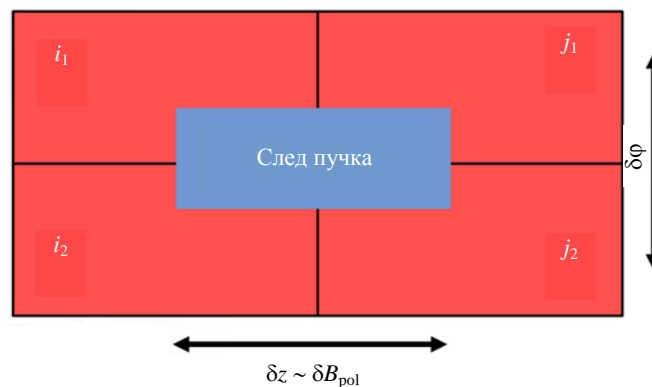
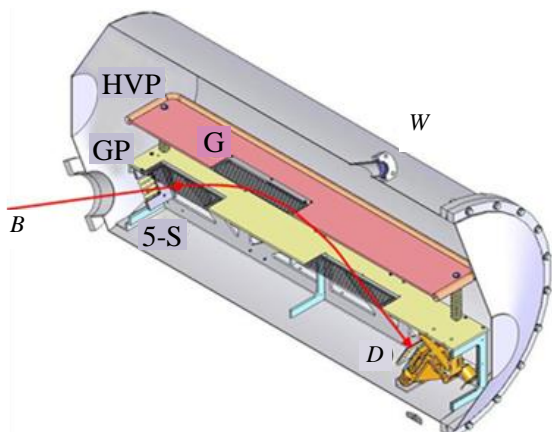


Рис. 5. Принципиальная схема измерений позиционно-чувствительным датчиком тока пучка: ■ — детекторные пластины

Значение электрического потенциала φ в точке наблюдения измеряется по разнице энергий первичных (E_1) и вторичных (E_2) ионов. Поскольку полная энергия иона сохраняется, а во время вторичной ионизации ион теряет электрон с потенциальной энергией $-e\varphi$, энергия вторичного иона равна

$$E_2 = E_1 + (q_2 - q_1)\varphi.$$

Так как в нашем случае $q_2 - q_1 = e$, выражение для потенциала φ примет следующий вид:

$$\varphi = (E_2 - E_1)/e.$$

Так как энергия E_1 составляет сотни кэВ, а потенциал плазмы — порядка сотни вольт, который нужно измерить с погрешностью не более 10%, то задача о нахождении величины потенциала плазмы является задачей о нахождении малой разности больших величин, что является достаточно сложной технической задачей. Это обстоятельство предъявляет очень высокие требования к стабильности величины E_1 и точности проводимых измерений E_2 — она должна быть не хуже 10^{-5} .

Потенциал φ пропорционален вертикальному смещению следа ионного пучка (см. рис. 5), оцениваемому по нормализованной разности токов δi на детекторных пластинах:

$$\varphi \sim \delta i \sim ((i_1 + j_1) - (i_2 + j_2))/I.$$

Анализатор откалиброван таким образом, чтобы горизонтальная линия «перекрестия» четвёрки пластин соответствовала конкретной величине φ .

Величина тороидального смещения пучка δz оценивается по нормализованному горизонтальному смещению следа пучка на детекторных пластинах:

$$\delta z \sim (i_1 + i_2) - (j_1 + j_2)/I.$$

По тороидальному смещению пучка можно вычислить полоидальное магнитное поле, создаваемое током плазмы токамака:

$$\ddot{z} = \frac{qe}{m} v_r B_{\text{pol}}.$$

Концентрация электронов n_e в области наблюдения связана с полным током I на пластины следующим образом:

$$I \sim I_0 F_1 F_2 \sigma_{\text{эф}} l n_e,$$

где I — ток вторичного пучка; I_0 — ток первичного пучка; $\sigma_{\text{эф}}$ — эффективное сечение ионизации; l — линейный размер наблюдаемого объёма вдоль траектории; n_e — концентрация электронов в наблюдаемом объёме; $F_{1,2}$ — коэффициенты ослабления тока пучка вдоль траекторий, определяемые следующим образом:

$$F_j = \exp(-\int \sigma_j n_e dl),$$

$j = 1$ для первичной и 2 для вторичной траектории; σ_j — сечение ионизации из состояния j ; интегрирование проводится по всей траектории движения пучка.

Высокое временное разрешение измерений в токовом режиме позволяет проводить измерения флуктуаций всех перечисленных величин:

- потенциала $\delta\varphi(t) \sim \delta i(t)$;
- полоидального поля $\delta B_{\text{pol}}(t) \sim \delta z(t)$;
- концентрации электронов $\delta n_e(t) \sim \delta I(t)$.

Измерения с помощью ЗППТИ могут быть затруднены в двух случаях — при высокой плотности электронов плазмы и при проведении измерений в области высоких частот. Поскольку ослабление тока пучка $F_{1,2}$ увеличивается с ростом плотности электронов плазмы, при высокой плотности сигнал на детекторных пластинах снижается и становится неотличимым от шума. Если же ток вторичного пучка в анализаторе I постоянен, то при повышении частоты измеряемых флуктуаций количество частиц, регистрируемых в течение одного периода колебаний, падает. В пределе токовый режим измерений переходит в режим счёта отдельных частиц, при котором измерение флуктуаций ограничено уровнем дробового шума.

Повышение тока вторичного пучка позволит пропорционально увеличить амплитуду вторичного сигнала и за счёт этого расширить исследуемые диапазоны частот и плотностей электронов плазмы.

Поскольку вторичные ионы приходят в энергетический анализатор из ограниченного объёма, в котором производятся измерения (см. рис. 2), его продольный размер определяется апертурой входной щели анализатора, поперечный — диаметром пучка. Эти размеры определяют пространственное разрешение измерений. Для его повышения необходимо максимально фокусировать пучок, не теряя при этом его интенсивности. Таким образом, необходимо получить высокую плотность ионного тока в области измерений, что и является конечной целью модернизации. Соответственно, главной задачей модернизации ЗПТИ является достижение высокой плотности тока первичного пучка. Чтобы добиться этого, необходимо, кроме повышения тока первичного пучка, добиться более качественной его фокусировки в плазме.

ПОДГОТОВКА ВНУТРИКОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВИЧНОГО ИОНОПРОВОДА

Конечная цель модернизации диагностики — повышение отношения сигнал/шум за счёт увеличения тока вторичного пучка I . Поскольку для этого необходимо повысить ток первичного пучка I_0 , диаметр пучка также может возрасти. Поэтому необходимо внести изменения в конструкцию первичного ионопровода для того, чтобы гарантированно избежать взаимодействия пучка с её элементами (рис. 6).

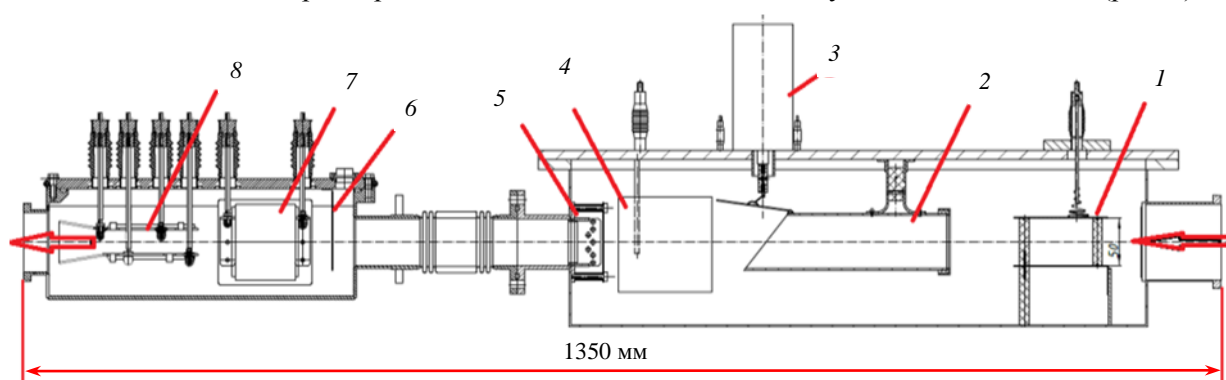


Рис. 6. Первичный ионопровод: \leftarrow — направление движения пучка; 1, 4, 7, 8 — управляющие пластины; 2 — цилиндр Фарадея, совмещённый с запирающим устройством; 3 — тяговое реле; 5, 6 — проволочные датчики пучка

Для расширения канала прохождения пучка через первичный ионопровод были спроектированы и установлены цилиндр Фарадея (2) и проволочный датчик (5) новой конструкции, а также изменено расстояние между корректирующими пластинами первичного ионопровода (1). Цилиндр Фарадея совмещает в себе две функции — измерение тока пучка и запираение пучка между импульсами токамака. Последнее необходимо по двум причинам. Во-первых, для соблюдения вакуумной гигиены на начальном этапе разряда, когда магнитное поле нарастает до своего номинального значения. Если стенки камеры токамака недостаточно обезгажены и очищены от примесей, что часто встречается в условиях реального эксперимента, то частицы зондирующего пучка, ударяясь о стенку, могут вызвать некоторый дополнительный приток рабочего газа и примесей в камеру. В условиях «грязной» камеры этот небольшой приток может затруднить получение желаемых характеристик разряда. Во-вторых, пучок способен быть источником заряженных частиц за счёт ионизации остаточного газа в камере токамака или выбивания электронов со стенок камеры ионами пучка. Возникшие электроны могут быть ускорены нарастающим продольным магнитным полем токамака за счёт бетатронного эффекта. Для исключения возможности возникновения описанных нежелательных эффектов пучок ионов запирается откидным доньшком цилиндра Фарадея.

Запирающее устройство цилиндра Фарадея является нормально закрытым, т.е. без подачи напряжения на тяговое реле пучок попадает внутрь цилиндра на его закрытое доньшко и проводится измерение его тока. Такая конструкция исключает нежелательное попадание пучка в камеру токамака при возникновении неполадок в работе тягового реле. Диаметр цилиндра Фарадея увеличен до 50 мм (см. рис. 6, 2) для обеспечения полного попадания в него даже сильно расфокусированного пучка. Длина цилиндра также увеличена для исключения возможности вылета вторичных электронов из цилиндра, что предотвращает их возможное попадание в область электрического поля ускорителя и дальнейшее ускорение вплоть до его рабочего напряжения 300 кэВ. Даже незначительный по интенсивности поток столь высокоэнергичных электронов может привести к дополнительной нагрузке на источник питания ускорителя, а также к нарушению работы эмиттера вплоть до его разрушения и к появлению рентгеновского излучения.

Расстояние между корректирующими пластинами (см. рис. 6, 1) увеличено до 50 мм во избежание их касания сильно расфокусированным пучком.

Проволочный датчик обеспечивает измерение положения и профиля пучка. В новой конструкции влияние проволочного датчика на пучок сведено к минимуму путём уменьшения количества детектирующих проволок до необходимого минимума (два на каждое направление вместо пяти-шести в старом варианте) и их расположения вне оси пучка (рис. 7).

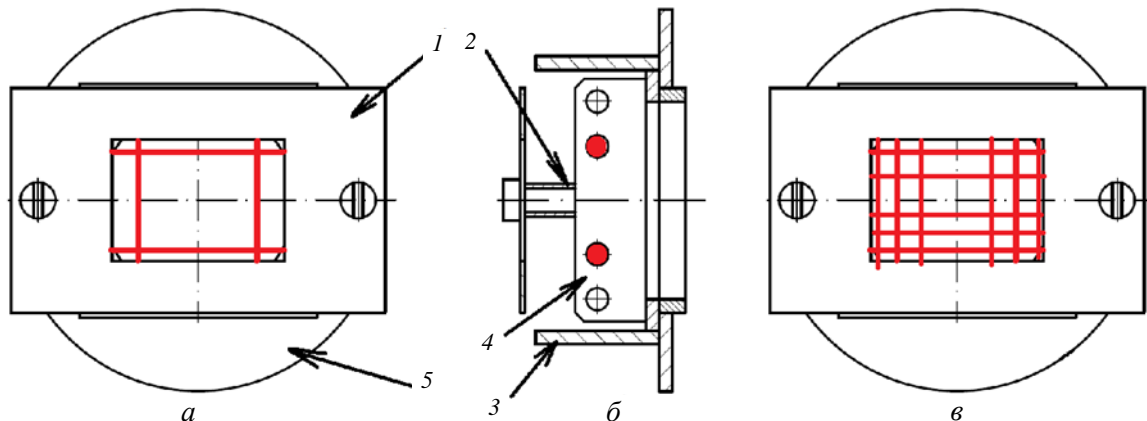


Рис. 7. Конструкция проволочного датчика пучка: *а* — вид со стороны пучка; *б* — вид сбоку; *в* — старая схема крепления проволок; ● и — проволочки для измерения тока пучка; 1 — диафрагма; 2 — дистанёр диафрагмы; 3, 4 — крепления проволок; 5 — основание

На рис. 7 видно, что при сканировании в любом направлении при старой схеме расположения проволок пучок наталкивался на «частокол» из них, в новом варианте этого не происходит, следовательно, пучок не искажается.

ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННОГО ПУЧКА

В настоящее время получение ионного пучка в ускорителе ЗППТИ на токамаке Т-10 осуществляется с помощью эмиттерного блока, изображённого на рис. 8. Термоионный эмиттер 1 нагревается с помощью накальной спирали 2, электрическое поле, создаваемое экстракторно-фокусирующим электродом 3, вытягивает из эмиттера ионы, которые затем ускоряются в ускорительной трубке (см. рис. 2, 1), на анодном конце которой располагается эмиттерный блок в первичном ионопроводе.

На рис. 9 представлена осциллограмма сигналов двух проволочных датчиков при фокусировании на первый датчик (см. рис. 6, 5). Видно, что ионный пучок имеет правильную гауссову форму на обоих

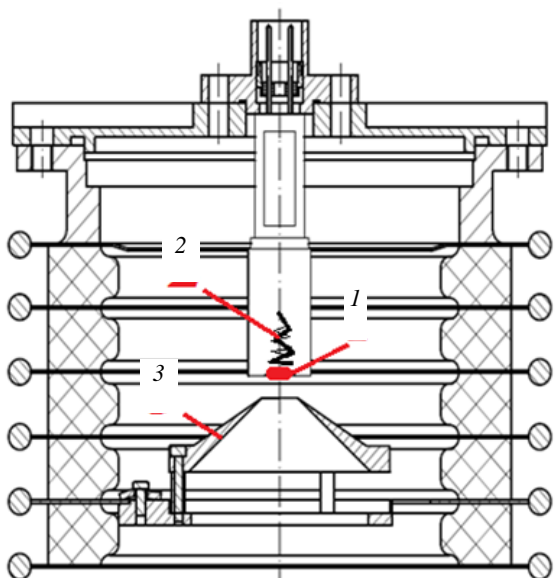


Рис. 8. Конструкция эмиттерного блока: 1 — термоионный эмиттер; 2 — накальная спираль; 3 — экстракторно-фокусирующий электрод

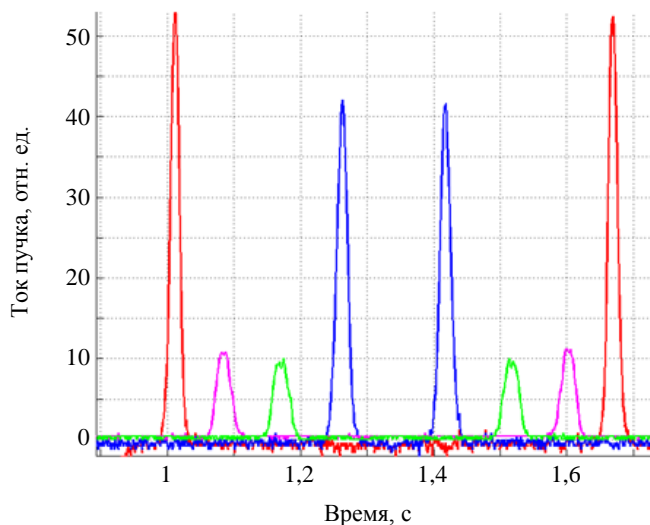


Рис. 9. Осциллограммы сигналов с проволочных датчиков первичного ионопровода: —, — пучок сфокусирован на первом датчике; —, — сигнал со второго проволочного датчика

датчиках. Поскольку расстояния между проволоками датчиков известны, из данных осциллограммы был вычислен диаметр пучка на полувысоте его профиля, который оказался равным 2 мм в области фокуса. Различные значения максимального тока на проволоках разных датчиков (красный и синий цвет — первый датчик, фиолетовый и зелёный — второй датчик) обусловлены различным сечением проволок. Так как проволочные датчики используются в основном для определения положения пучка, эти расхождения не являются принципиальными. При определении размеров пучка это обстоятельство также не имеет никакого влияния, так как для определения размеров пучка необходимо знать только время достижения пикового значения сигнала и расстояние между проволоками.

ПОВЫШЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПЕРВИЧНОГО ПУЧКА В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Поднять плотность тока первичного пучка в области измерений можно за счёт одновременного повышения тока пучка и лучшей фокусировки. Для улучшения обеих характеристик были спроектированы и подготовлены к сборке новые эмиттерный блок (рис. 10) и система его питания (рис. 11).

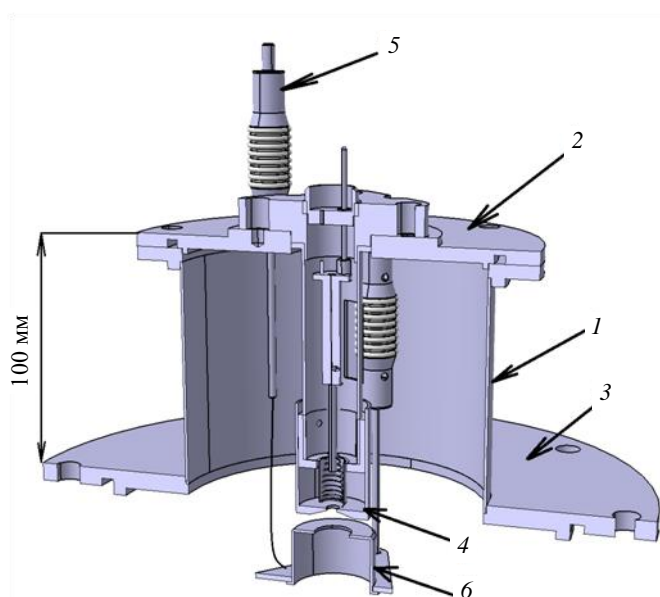


Рис. 10. Новая конструкция эмиттерного блока: 1 — корпус эмиттерного блока; 2 — крышка эмиттерного блока; 3 — соединительный фланец; 4 — патрон эмиттера; 5 — подвод экстракторного напряжения; 6 — экстракторный электрод

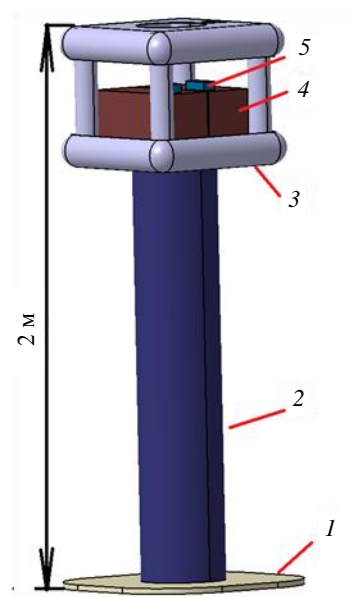


Рис. 11. Новая система питания эмиттерного блока: 1 — диэлектрическая платформа; 2 — диэлектрическая колонна; 3 — высоковольтная площадка с антикоррозийной защитой; 4 — аккумуляторы; 5 — источники высокого напряжения

Новый эмиттерный блок представляет собой трёхэлектродную линзу. Первый электрод линзы — экстракторный электрод; второй — 2—4 кольца ускорительной трубки, находящиеся под фокусирующим потенциалом; третий — 5—6 колец ускорительной трубки, находящихся под потенциалом экстрактора.

Новая конструкция эмиттерного блока вместе с системой его питания позволит независимо изменять три параметра: ток накала спирали эмиттера, экстракторное напряжение и фокусирующее напряжение. Таким образом, можно будет менять ток первичного пучка (ток накала и экстракторное напряжение) и положение точки фокусировки (фокусирующее напряжение) по отдельности. Это сделает управление пучком более гибким — при заданном значении тока первичного пучка при постоянном токе накала можно будет изменять положение точки фокуса, что невозможно при нынешней конструкции эмиттерного блока.

Помимо нагрева термоионного эмиттера и величины экстракторного напряжения, на величину тока первичного пучка влияет расстояние между эмиттером и экстракторным электродом. По сравнению с предыдущими экспериментальными кампаниями это расстояние было уменьшено с 16 до 11 мм. Такое

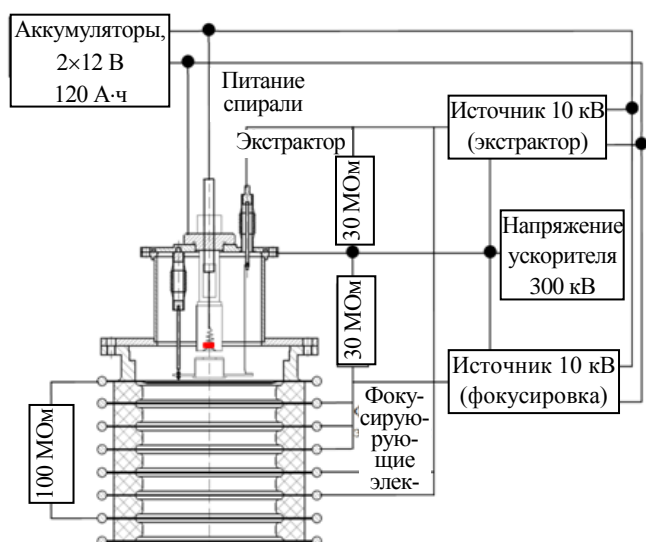


Рис. 12. Схема питания нового эмиттерно-экстракторного блока

же межэлектродное расстояние (с возможностью изменения) заложено в конструкцию нового эмиттерно-экстракторного блока.

Новая система питания включает в себя два аккумулятора большой ёмкости (по 120 А·ч) и два источника напряжения на 10 кВ. Все эти элементы расположены на высоковольтной площадке (см. рис. 11). В существующей схеме питания вместо аккумуляторов используется накальный трансформатор. Необходимость его замены обусловлена его недостаточной мощностью, которая не позволяет поднять ток эмиттера до необходимой величины. Схема питания эмиттерно-экстракторного блока показана на рис. 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках модернизации диагностики ЗППТИ на токамаке Т-10 были разработаны и подготовлены к сборке новые эмиттерный блок и его система питания, что позволит поднять ток первичного пучка ионов до 300 мкА. Такое значение тока позволит расширить диапазон исследуемых частот колебаний потенциала и плотности плазмы до 500 кГц, диапазон плотности электронов до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и повысить отношение сигнал/шум при исследовании геодезических акустических мод в режимах с высокой плотностью. Модернизированы внутривакуумные элементы ионопровода для обеспечения проведения ионного пучка с увеличенным током.

Подробнее все характеристики эмиттерного блока в сравнении до и после модернизации описаны в таблице.

Характеристики эмиттерного блока в сравнении до и после модернизации

Параметр	Современные параметры	Ожидаемые после модернизации параметры
Ток первичного пучка	До 300 мкА (в калибровочном эксперименте без плазмы)	До 300 мкА (в рутинном эксперименте с плазмой)
Плотность тока пучка	До 1 А/м ²	До 5 А/м ²
Ток вторичного пучка	До 100 нА	До 300 нА
Рабочий диапазон плотностей плазмы	До $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	До $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Рабочий диапазон исследуемых частот	До 300 кГц	До 500 кГц
Управление положением точки фокуса при фиксированном токе пучка	Только вместе с током первичного пучка	Не изменяя ток первичного пучка
Конфигурация электродов	Трёхэлектродная линза с постоянным фокусирующим потенциалом	Трёхэлектродная линза с независимым фокусирующим потенциалом

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-22-00193.

REFERENCES

1. Fujisawa A., Ido T., Shimizu A. et al. Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. 718.
2. Melnikov A.V., Hidalgo C., Eliseev L.G. et al. Plasma potential and turbulence dynamics in toroidal devices (survey of T-10 and TJ-II experiments). — Ibid., 2011, vol. 51, p. 083043.
3. Jobes F.C., Hickok R.L. A direct measurement of plasma space potential. — Ibid., 1970, vol. 10, pp. 195—197.
4. Melnikov A.V., Eliseev L.G., Jiménez-Gómez R. et al. Internal measurements of Alfvén eigenmodes with heavy ion beam probing in toroidal plasmas. — Ibid., 2010, vol. 50, p. 084023.
5. Dnestrovskij Yu.N., Melnikov A.V., Krupnik L.I., Nedzelskij I.S. Development of heavy ion beam probe diagnostics IEEE trans. — Plasma Sci., 1994, vol. 22 (4), pp. 310—331.

6. **Melnikov A.V., Bondarenko I.S., Efremov S.L. et al.** HIBP diagnostics on T-10. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, vol. 66, p. 317.
7. **Melnikov A.V., Andreev V.F., Grashin S.A. et al.** Electric potential dynamics in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 093019.
8. **Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Subbotin G.F. et al.** Density fluctuations as an intrinsic mechanism of pressure profile formation. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, p. 063014.
9. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Gudozhnik A.V. et al.** Investigation of the plasma potential oscillations in the range of geodesic acoustic mode frequencies by heavy ion beam probing in tokamaks Czech. — *J. Phys.*, 2005, vol. 55, pp. 349—360.
10. **Melnikov A.V., Vershkov V.A., Eliseev L.G. et al.** Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48, S87-S110.
11. **Zenin V.N., Eliseev L.G., Kozachek A.S. et al.** Study of poloidal structure of geodesic acoustic modes in the T-10 tokamak with heavy ion beam probing. — *Problems Atomic Sci. Techn. Series: Plasma Physics*, 2014, vol. 6 (94), p. 269.
12. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Perfilov S.V. et al.** The features of the global GAM in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, p. 063001.
13. **Eliseev L.G., Ivanov N.V., Kakurin A.M., Melnikov A.V. Perfilov S.V.** Magnetic island and plasma rotation under external resonant magnetic perturbation in the T-10 tokamak. — *Phys. Plasmas*, 2015, vol. 22, p. 052504.
14. **Eliseev L.G., Ivanov N.V., Kakurin A.M. et al.** Study of the large-scale MHD mode and its effect on GAM in the T-10 tokamak. — In: 42-nd EPS Conf. on Plasma Physics. Lisbon, Portugal, 22—26 June. Rep. P5.159, <http://ocs.ciemat.es/EPS2015PAP/html>.
15. **Winsor N., Johnson J.L., Dawson J.M.** Geodesic acoustic waves in hydromagnetic systems. — *Phys. Fluids*, 1968, vol. 11, p. 2448.
16. **Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K. Hahm T.S.** Zonal flows in plasma. — *A review Plasma Phys. Control. Fusion*, 2005, vol. 47, R35.
17. **Nakashima Y., Hoshino K., Ejiri A. et al.** Observation of nonlinear coupling between small-poloidal wave-number potential fluctuations and turbulent potential fluctuations in ohmically heated plasmas in the JFT-2M tokamak. — *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 95, p. 095002.
18. **Ido T., Miura Y., Kamiya K. et al.** Geodesic-acoustic-mode in JFT-2M tokamak plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48, p. S41.
19. **Heidbrink W.W.** Basic physics of Alfvén instabilities driven by energetic particles in toroidally confined plasmas. — *Phys. Plasmas*, 2008, vol. 15, p. 055501.
20. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Jiménez-Gómez R. et al.** Study of Alfvén eigenmodes in the TJ-II stellarator. — *Plasma and Fusion Research*, 2010, vol. 5, S2019.
21. **Jiménez-Gómez R., Könies A., Ascasibar E. et al.** Alfvén eigenmodes measured in the TJ-II stellarator. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 033001.
22. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Ascasibar E. et al.** Alfvén eigenmode properties and dynamics in the TJ-II stellarator. — *Nucl. Fusion*, 2012, vol. 52, p. 123004.
23. **Melnikov A.V., Ochando M., Ascasibar E. et al.** Effect of magnetic configuration on frequency of NBI-driven Alfvén modes in TJ-II. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 123002.
24. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Ochando M.A.** A quasi-coherent electrostatic mode in ECRH plasmas on TJ-II. — *Plasma and Fusion Research*, 2011, vol. 6, p. 2402030.
25. **Melnikov A.V.** Applied and fundamental aspects of fusion science. — *NATURE Physics*, 2016, vol. 12, p. 386.

AUTHORS

Drabinskii M.A. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Drabinskii91@yandex.ru

Khabanov F.O. Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, 141700 Dolgoprudny, Moscow Region, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; khabanov@phystech.edu

Melnikov A.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Melnikov_07@yahoo.com

Krupnik L.I. Institute of plasma physics NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Akademicheskaya ul. 1, 61108 Kharkov, Ukraine; Krupnik@ipp.kharkov.ua

Kozachek A.S. Institute of plasma physics NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Akademicheskaya ul. 1, 61108 Kharkov, Ukraine; hibp@ipp.kharkov.ua

Komarov A.D. Institute of plasma physics NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Akademicheskaya ul. 1, 61108 Kharkov, Ukraine; hibp@ipp.kharkov.ua

Zhezhera A.I. Institute of plasma physics NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Akademicheskaya ul. 1, 61108 Kharkov, Ukraine; hibp@ipp.kharkov.ua

Received 28 March 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 81—90.