

МНОГОХОРДОВАЯ ПУЧКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ
НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB© 2022 г. А. В. Никишин^{а,*}, И. А. Иванов^а, В. И. Баткин^а, А. В. Бурдаков^а,
К. Н. Куклин^а, К. И. Меклер^а, В. В. Поступаев^а, А. Ф. Ровенских^а^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: A.V.Nikishin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 05.10.2021 г.

После доработки 17.11.2021 г.

Принята к публикации 18.11.2021 г.

Описана многохордовая пучковая диагностическая система для открытой многопробочной ловушки ГОЛ-NB. Система основана на ленточном пучке быстрых нейтральных атомов водорода с энергией 10 кэВ, формируемом с помощью широкоапертурного ионного инжектора с дуговым источником плазмы. Профиль линейной плотности плазмы рассчитывается по ослаблению пучка после прохождения сквозь плазму. В работе обсуждается конструкция диагностики и ее возможности, а также приведены измеренные профили линейной плотности плазмы в эксперименте по заполнению ловушки стартовой плазмой. Описан модернизированный вариант диагностики и ожидаемое увеличение ее разрешающей способности. Оценены перспективы применения метода перезарядной рекомбинационной спектроскопии – Charge eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS) на имеющейся элементной базе установки.

Ключевые слова: открытая многопробочная ловушка, ГОЛ-NB, низкотемпературная плазма, атомарный пучок, спектроскопия плазмы

DOI: 10.31857/S036729212203012X

1. ВВЕДЕНИЕ

Концепция многопробочного удержания плазмы была впервые предложена в 1971 г. Г.И. Будкером, В.В. Мирновым и Д.Д. Рютовым [1]. Результативность этой идеи была продемонстрирована на установке ГОЛ-3, где наблюдался многократный рост времени удержания плазмы при включении многопробочной конфигурации магнитного поля [2]. Развитие физики открытых ловушек и, в частности, многопробочного удержания, привело к появлению проекта ГДМЛ – газодинамической многопробочной ловушки с плазмой реакторного класса [3, 4]. ГДМЛ представляет собой объединение физических и технологических решений, отработанных на установках ГОЛ-3 [2] и ГДЛ (газодинамическая ловушка) [5]. Основная задача установки – получить термодерную плазму в условиях газодинамической ловушки (ожидаемый рабочий диапазон: $n \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $T_e \sim 0.05 - 1.2 \text{ кэВ}$). При этом для увеличения эффективности продольного удержания на место “стандартных” пробоч ловушки планируется установить многопробочные секции. Продемонстрировать эффект подавления продольных потерь в условиях, когда длина свободного пробега ионов больше длины элементарного пробоч-

трона ($\lambda \gg 1$), но возникает возможность их рассеяния на плазменных колебаниях, возникающих при коллективном течении плазмы через многопробочную систему, – основная задача установки ГОЛ-NB. Ожидаемые параметры плазмы в установке в чисто газодинамическом режиме: $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_i \sim 30 \text{ эВ}$. В такой конфигурации эксперимента $\lambda \sim 2 \text{ м}$, при длине элементарного пробочтрона многопробочной секции ГОЛ-NB, $l = 0.22 \text{ м}$ [6]. Установка ГОЛ-NB состоит из центрального пробочтрона, работающего в режиме газодинамической ловушки, двух секций солонида, создающих гофрированное магнитное поле и двух торцевых расширителей (см. рис. 1). Стартовая плазма создается дуговой плазменной пушкой [7], ее дальнейший нагрев осуществляется с помощью нейтральных пучков с энергией 25 кэВ и мощностью до 1.5 МВт. Таким образом, ГОЛ-NB является одним из переходных этапов между ГОЛ-3 и ГДМЛ. Более подробно проект ГОЛ-NB обсуждается в [8].

Параллельно с вводом в эксплуатацию установки ГОЛ-NB на ней был смонтирован диагностический комплекс, состоящий из набора электростатических зондов, многохордового пучкового зондирования плазмы, импульсных изме-

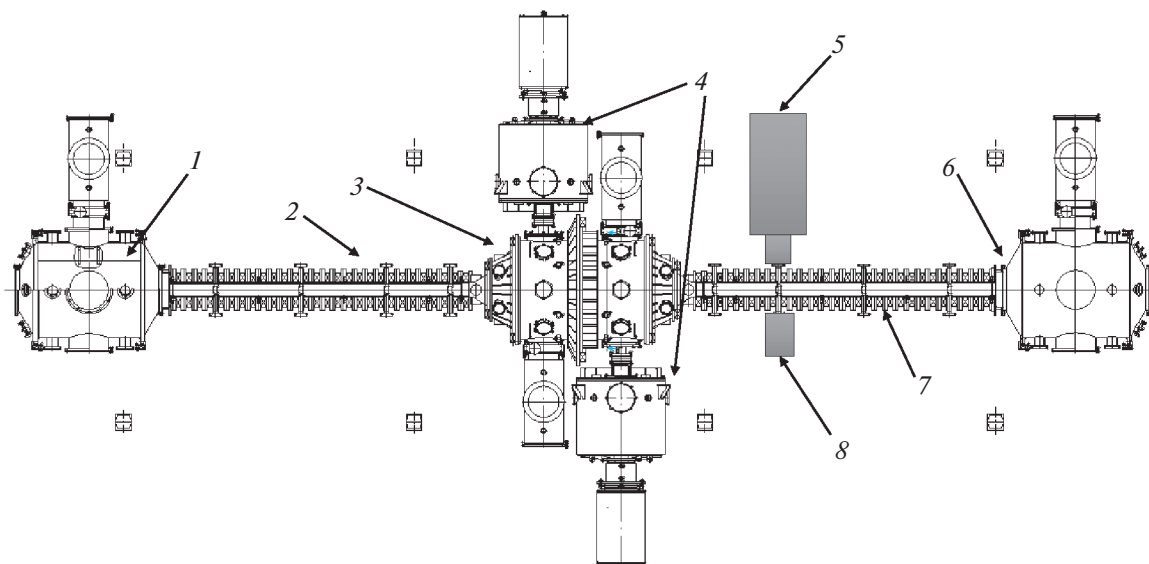


Рис. 1. Общая схема установки ГОЛ-NB. 1 – входной расширитель с плазменной пушкой; 2, 7 – секции соленоида с гофрированным полем; 3 – центральная ловушка; 4 – нагревные инжекторы; 5 – диагностический инжектор; 6 – выходной расширитель; 8 – система регистрации прошедшего пучка.

рителей газонапуска, калориметрии прошедших нагревных нейтральных пучков, фото- и видеофиксации изображения плазмы, обзорной спектроскопии и систем измерения вспомогательных электрофизических параметров. На данном этапе в стадии окончательного введения в эксплуатацию находится анализатор нейтральных частиц и диагностика перезарядной рекомбинационной спектроскопии (Charge eXchange Recombination Spectroscopy – CXRS) на базе нейтральных пучков водорода. К текущему моменту на установке используется один диагностический и два нагревных пучка быстрых нейтральных атомов водорода. Диагностический пучок используется для диагностической системы по многоходовому зондированию плазмы.

Подобная диагностика известна достаточно давно [9–11]. Идея метода заключается в ослаблении потока быстрых нейтральных атомов при прохождении через плазму. Ослабление пучка можно записать как:

$$\frac{dn_a}{dt} = -\sum_i n_a n_i \langle \sigma_{ia} v_{ia} \rangle_{f_i}, \quad (1)$$

где n_a – концентрация частиц в пучке, сумма по i обозначает различные процессы, за счет которых происходит ослабление, n_a – плотность атомов пучка, n_i – плотность соответствующего сорта частиц, σ_{ia} – сечение процесса, а v_{ia} – относительные скорости сталкивающихся частиц. Усреднение производится по функции распределения частиц.

При энергиях пучка 5–15 кэВ и рассматриваемых параметрах плазмы (температура $T_e \sim T_i \leq 100$ эВ, $n \sim 2 \times 10^{19} - 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$), доминирует процесс резонансной перезарядки. Менее существенный вклад (около 10–20%) вносит ионизация электронным ударом. Это связано с меньшим сечением процесса в рассматриваемом диапазоне энергий [12, 13]. После усреднения по функции распределения частиц плазмы можно получить эффективное сечение взаимодействия, интегрально приводящее к ослаблению пучка. В случае перезарядки, из-за разницы скоростей атомов пучка и ионов плазмы, процесс выглядит, как рассеяние на неподвижных частицах. Для расчета эффективного сечения электронного удара была использована измеренная температура электронов плазмы, $T_e \sim 10$ эВ, [14].

С учетом всего вышеперечисленного плотность тока пучка после его прохождения через ловушку должна рассчитываться следующим образом:

$$J = J_0 e^{-\int n_i \sigma_{ex} v_{ib} dl} e^{-\int_{v_b}^{n_e} \sigma_{ion} v_{eb} dl} e^{-\int n_a \sigma_{aa} v_{ib} dl}, \quad (2)$$

где J – ток прошедшего через плазму пучка, J_0 – полный ток пучка, а экспоненциальные множители соответствуют процессам перезарядки, ионизации электронным ударом и столкновений с нейтральными атомами водорода в камере установки, соответственно. В условиях ГОЛ-NB ($n_i \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_i \sim 5$ эВ, $T_e \sim 10$ эВ) эффективное сечение перезарядки $\sigma_{ex} \sim 1 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ [12], ионизации электронным ударом $\sigma_{ion} \sim (5-9) \times 10^{-17} \text{ см}^2$

[13]. Потерями пучка за счет его обдирки на газе, присутствующем в камере установки, с учетом проведенных калибровочных экспериментов, можно пренебречь, в частности, эта ситуация согласуется с опытом использования аналогичных диагностик, например, [8, 10].

Таким образом, измерив отношение плотности тока ослабленного пучка к неослабленному, можно определить линейную плотность плазмы nl . Практическую формулу можно получить из уравнения (2)

$$\int n dl = \frac{1}{\sigma_{tot}} \ln \frac{J_0}{J}, \quad (3)$$

здесь $\sigma_{tot} \cong 1.1 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ – общее эффективное сечение потерь пучка.

В связи с тем, что диагностический пучок имеет достаточно большую эквивалентную плотность тока, для оценки ослабления пучка можно использовать систему вторично-эмиссионных датчиков (ВЭД), в частности, регистрирующую только прошедшие сквозь плазму частицы, однако, в таком случае необходим дополнительный калибровочный эксперимент без плазмы.

Пространственное разрешение данного метода определяется собственным угловым разбросом пучка, параметрами системы ВЭД, а также рассеянием нейтральных атомов пучка на ионах плазмы. Однако влияние последнего фактора невелико. Транспортное сечение упругого рассеяния атомов водорода на протонах $\sigma_{mp} \approx 10^{-22} \text{ см}^2$ [15], что позволяет оценить увеличение углового разброса пучка $\Delta\theta^2 = \sigma_{mp} nl \approx 0.4$ мрад. Измеренная величина начального углового разброса пучка составляет 18 мрад (см. разд. 2. Конструкция системы многохордового зондирования плазмы), поэтому в данной работе влиянием рассеяния атомов пучка на ионах плазмы на точность диагностики мы пренебрегаем.

В итоге такая диагностическая система позволяет вычислить линейную плотность ионов плазмы. Подобную функцию может выполнить многохордовая интерферометрическая система, диагностирующая линейную плотность электронов. Однако, в нашем случае наличие имеющейся элементной базы, в первую очередь, широкоапертурного пучка быстрых атомов водорода, позволило быстро реализовать диагностическую систему многохордового зондирования плазмы путем измерения ослабления потока быстрых атомов, прошедших через плазму.

Целью работ, описываемых в статье, являлась разработка диагностического комплекса, предназначенного для измерения параметров плазмы в установке ГОЛ-NB на основе пучков быстрых атомов водорода. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: адаптация и

модернизация системы многохордового зондирования плазмы путем измерения ослабления широкоапертурного диагностического пучка, использованной в экспериментах ГОЛ-3 [16], в условиях полноценного эксперимента ГОЛ-NB, оценка применимости CXRS-метода на имеющихся атомарных пучках водорода и ее практическая реализация в сечении инжекции нагретого пучка.

Конструкция диагностики и методика эксперимента описаны в пункте 2. В пункте 3 приведены результаты экспериментов по измерению хордового профиля линейной плотности плазмы в экспериментах по заполнению ловушки ГОЛ-NB стартовой мишенной плазмой. В завершающей части описаны перспективы создания диагностики перезарядной спектроскопии (CXRS) на имеющейся на установке элементной базе и первые результаты по наблюдению спектров излучения в сечении инжекции нагретых пучков.

2. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ МНОГОХОРДОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

Диагностический инжектор расположен на расстоянии 7.3 м от анода плазменной пушки (рис. 1 п. 5). Это соответствует многопробочной секции между центральной ловушкой и выходным расширителем. Такое расположение диагностики позволяет наблюдать за изменением потока плазмы из центральной ловушки, т.к. во входном расширителе установлен источник мишенной плазмы, который создает встречный поток. Данное расположение также оптимально ввиду единственности диагностической системы и ее малой мобильности.

Основой для диагностики служит инжектор нейтральных атомов водорода на базе дугового ионного источника. Конструкция ионного источника и системы электропитания аналогичны описанным в [17]. Газ, поступающий через компактный полый катод, ионизируется с помощью магнитоизолированной электрической дуги с тонким диафрагмированным каналом ($\varnothing 7$ мм, длина 30 мм). Для первичной стабилизации тока дуги, и как следствие формируемого ионного пучка, используется расширитель плазмы с магнитной стенкой. Вытягивание и ускорение ионов осуществляется с помощью ионно-оптической системы (ИОС) на основе проволочных электродов. Однако в данном инжекторе присутствует ряд модификаций: ИОС состоит из 3 электродов, отсутствует магнитная линза, а также модернизирована система газонапуска. Источник создает пучок ионов водорода с регулируемой энергией ($E_p = 10-15$ кэВ) длительностью до 500 мкс (определяется возможностью системы электропитания). С учетом малой линейной плотности плаз-

мы энергия пучков была выбрана равной 10 кэВ. Эквивалентная плотность тока пучка нейтральных атомов в месте расположения ВЭД составляет $J \sim 30$ мА/см². Преимуществом данного инжектора является большой диаметр формируемого пучка (~100 мм), превышающий размер диагностического окна в камере соленоида ($Ш \times В = 40 \times 80$ мм). Это позволяет провести измерения профиля плазмы за один эксперимент без необходимости перемещения элементов диагностической системы в пространстве, но ценой потери части пучка. Однако потеря части общего тока пучка в данном случае допустима, так как плотность тока достаточна для регистрации атомов пучка с помощью ВЭД. Для уменьшения натекания газа из перезарядной мишени в рабочий объем ловушки перед входом в вакуумную камеру установки размещена молибденовая диафрагма с щелью шириной 10 мм, создающей ленточный пучок.

Регистрация прошедшего пучка проводилась системой ВЭД со следующими параметрами, см. рис. 2а. Использовалось 11 алюминиевых (коэффициент вторичной электронной эмиссии для 10 кэВ атомов водорода ≈ 0.7 при нормальном падении [18]) датчиков шириной 4 мм с шагом 8 мм по хорде наблюдения и расположенных в 260 мм от центра камеры. Для сбора электронов и подавления перекрестных помех (ситуации, когда вторично-эмиссионные электроны улавливаются соседним датчиком системы ВЭД) между датчиками установлен заземленный экран из нержавеющей фольги. Во время эксперимента для облегчения вторичной электронной эмиссии на приемник пучка подавалось отрицательное напряжение смещения согласно электрической схеме, показанной на рис. 2в. Его оптимальная величина была определена экспериментально по вольтамперной характеристике детекторов и составила 100 В. Для измерения тока использовался аналого-цифровой преобразователь (АЦП) со входным сопротивлением 50 Ом.

Перед введением аппаратуры диагностики в эксплуатацию была проведена серия экспериментов, задачей которой являлось определение углового разброса атомарного пучка и максимальной разрешающей способности диагностики, определяемой данным разбросом и геометрией ВЭД. Для этого на пути пучка в центре ловушки была помещена диафрагма с горизонтальной щелью шириной 1 мм и длиной 15 мм (больше ширины пучка). Диафрагма перемещалась по радиусу ловушки с шагом 2 мм. В результате была получена среднестатистическая аппаратная функция чувствительности одиночного ВЭД, см. рис. 3. Данный график получен путем смещения профилей чувствительности ВЭД в соответствие с их хордовым расположением. На рисунке экспериментальная зависимость аппроксимирована

гауссианом с шириной $\Delta R_{1/2} = 7.7 \pm 0.7$ мм. Т.к. сигналы являются сверткой углового разброса пучка (предполагаем, что он достаточно хорошо аппроксимируется гауссианом) и аппаратной функции ВЭД (которую в данном случае можно представить в виде меандра с периодом 8 мм), угловой разброс пучка составляет $\Delta\theta_{1/2} = 18 \pm \pm 1.8$ мрад.

Использование одного набора ВЭД, регистрирующих только прошедшие через ловушку атомы пучка, в каждой серии экспериментов с плазмой требует дополнительного тестового эксперимента, калибрующего текущее состояние диагностики. Для этого необходим выстрел диагностического пучка в установку с полным магнитным полем, но без плазмы. При дальнейшей обработке данные этого выстрела используются для расчета ослабления. Этот метод предъявляет высокие требования к стабильности тока пучка и повторяемости импульса, а также к количеству набранной статистики экспериментов. Другой проблемой метода является плохое временное разрешение. Это связано с нестабильностью и небольшой продолжительностью импульса диагностического пучка, в результате чего, значение токов с ВЭД за импульс необходимо усреднять. Однако, несмотря на эти недостатки, данная диагностическая система обладает достаточной точностью, погрешность измеряемых значений составляет 10%. Данные результаты измерений хорошо согласуются с другими диагностиками [15, 19].

После серии экспериментов было обнаружено, что плотность тока пучка и соотношение сигнал/шум позволяют уменьшить поперечный размер датчиков и, соответственно, увеличить их число, что должно привести к увеличению разрешающей способности диагностики. Модернизированная система ВЭД представляет собой 15 цилиндрических датчиков из бескислородной меди диаметром 2 мм, см. рис. 2б. В качестве экрана выступает заземленная опорная пластина, в прорезях которой расположены датчики. Таким образом достигается эффективное подавление перекрестных помех с ВЭД. Новое расположение на расстоянии 130 мм от центра камеры системы ВЭД, в сочетании с большим количеством датчиков должно привести к увеличению разрешающей способности диагностики. Расчетная аппаратная функция ВЭД приведена на рис. 3 (пунктир) и имеет ширину $\Delta R_{1/2} = 5.3 \pm 0.5$ мм. Для уменьшения влияния углового разброса пучка, новое расстояние от системы ВЭД до плазмы было уменьшено. Предел приближения системы ВЭД определялся вероятностью зажигания магнетронного разряда, т.е. в данном локальном месте магнитное поле установки почти равно нулю, и как следствие, не влияет на работу ВЭД.

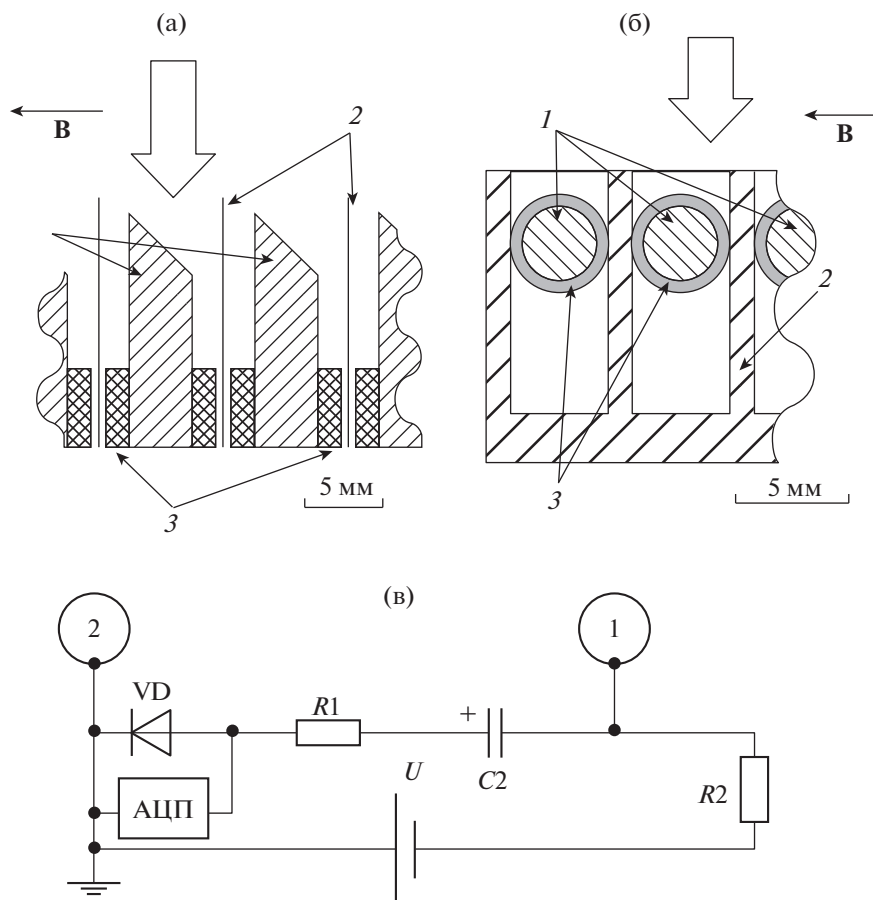


Рис. 2. Схема конструкции вторично-эмиссионных датчиков. а) – первый вариант (11 линейно установленных ВЭД); б) – усовершенствованный вариант (15 линейно установленных ВЭД), в – измерительная схема. 1 – датчики ВЭД, 2 – элементы экрана, 3 – изолятор, вектор **B** показывает направление индукции магнитного поля, $U = 100$ В – напряжение смещения, $R_1 = 50$ Ом (для согласования с волновым сопротивлением кабеля и АЦП), $R_2 = 0.13$ МОм, $C_2 = 100$ мкФ. Нумерация на рисунках а, б, в сквозная, цифры 1 и 2 в кружках на рисунке в обозначают места подключения соответствующим образом датчиков и элементов экрана к электрической измерительной схеме.

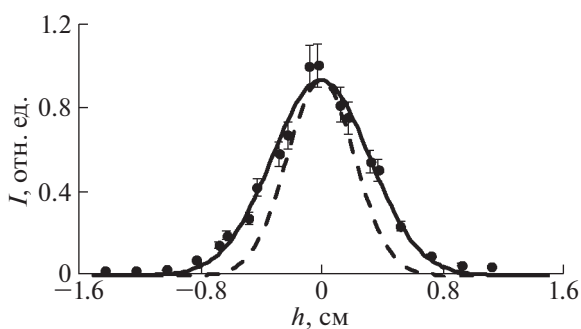


Рис. 3. Суммарная аппаратная функция отдельного датчика ВЭД, полученная путем измерения тока с ВЭД в тестовом эксперименте без плазмы с вырезанием части пучка атомов водорода узкой подвижной щелевой диафрагмой шириной 1 мм, находящейся в аксиальном сечении установки. Маркеры соответствуют сигналам ВЭД с различным расположением диафрагмы по высоте h относительно оси установки, сплошная линия – интерполяция гауссианом, штриховая линия – ожидаемый вид аппаратной функции для усовершенствованной системы ВЭД.

Также было принято решение усовершенствовать методику измерений. Для этого был создан второй комплект ВЭД, устанавливаемый перед плазмой на таком же расстоянии от центра камеры, что и система ВЭД, регистрирующая прошедшие через плазму атомы. Данный входной профиль пучка позволяет повысить точность измерений и избавиться от необходимости делать часто калибровочный выстрел, т.к. исключает неопределенность, связанную с нестабильностью работы диагностического инжектора. В настоящее время весь комплект ВЭД установлен и ведутся эксперименты по ее калибровке.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МНОГОХОРДОВОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ ПЛАЗМЫ

Многохордовая зондирующая диагностика успешно использовалась на стартовой конфигурации установки ГОЛ-НВ [15, 19]. С помощью

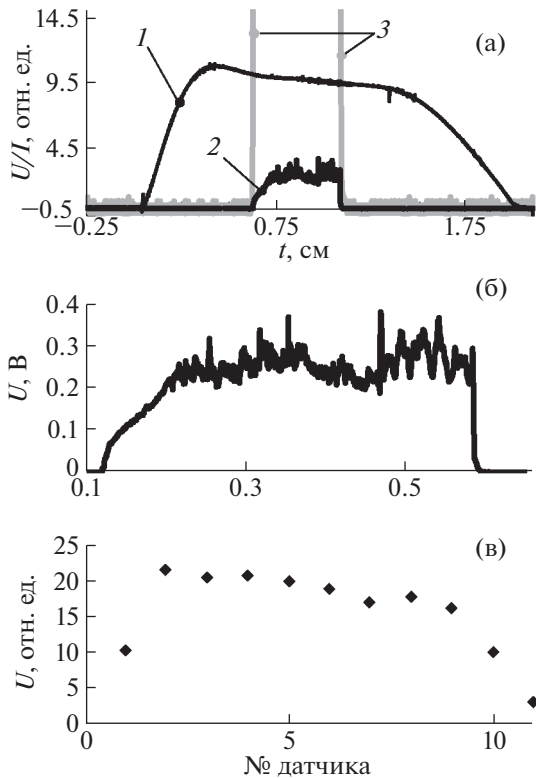


Рис. 4. Примеры получаемых сигналов при энергии атомов пучка 10 кэВ. а) – зависимость шума на ВЭД от внешних условий: 1 – ток катода плазменной пушки, 2 – сигнал с одиночного ВЭД, 3 – сигнал с одиночного ВЭД, увеличенный в 50 раз; б) – типичный сигнал с одиночного ВЭД; в) – типичный профиль пучка в плоскости расположения системы ВЭД (каждая точка соответствует усредненному по времени профилю тока одиночного ВЭД). Неравномерность профиля пучка связана с неравномерностью плотности потока атомов пучка по высоте, в частности, вызываемая затенением датчиков патрубками вакуумной камеры на краях профиля.

нее был прокалиброван комплекс электростатических зондов для измерения локальных параметров плазмы. В результате был изучен процесс формирования и транспортировки стартовой плазмы от дугового источника через длинный многопробочный соленоид.

В первую очередь для регистрации ослабленного пучка необходимо было экспериментально проверить отсутствие помех на системе ВЭД от присутствия в установке плазмы. Эти помехи включают в себя вторично эмиссионный ток от УФ-излучения и быстрых нейтральных частиц плазмы, а также электромагнитные наводки от систем электропитания плазменной пушки, магнитных катушек соленоида и других мощных электрических систем установки. На рис. 4а приведены ток плазменной пушки, сигнал с датчиков и он же, увеличенный в 50 раз. Видно, что ток вторичной электронной эмиссии регистрируется

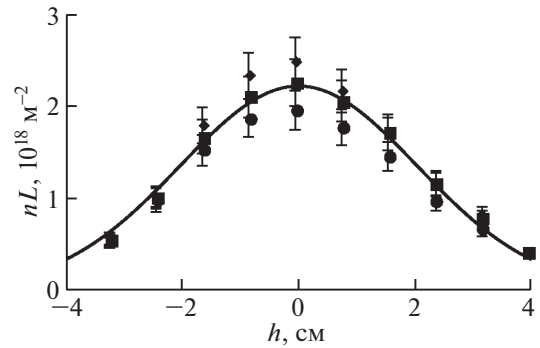


Рис. 5. Профиль линейной плотности ионов плазмы от высоты хорды наблюдения в различных выстрелах установки ГОЛ-NB, вычисленный по степени ослабления диагностического пучка согласно формуле 3. Обозначения: ромбы – #4016, круги – #4018, квадраты – #4020, кривая – гауссиан с шириной на полувысоте 5.4 см.

только при включении диагностического пучка. Сам ток пучка нейтральных атомов нестабилен (см. рис. 4б), поэтому возникает необходимость усреднения сигнала по времени. Результатом усреднения является набор из 11 точек (по числу датчиков). Типичный пример такого профиля без плазмы в установке приведен на рис. 4в. Воспроизводителю профиля и амплитуды сигналов определяет итоговую ошибку измерения линейной плотности (10%), указанную в разд. 2. Падение тока по краям профиля объясняется затенением датчиков, вызываемым геометрией патрубков окна. Так как для определения линейной плотности необходимо отношение токов ослабленного и неослабленного пучков, различия в индивидуальной чувствительности ВЭД не влияют на результат.

На рис. 5 приведены измеренные по трем выстрелам (#4016, #4018, #4020) профили линейной плотности ионов. Полученные результаты аппроксимированы гауссианом с шириной на полувысоте $\Delta h_{1/2} \approx 5.5 \pm 0.5$ см.

Хордовые измерения линейной плотности ионов должны позволить восстановить профиль их плотности. Однако, при попытке это сделать возникает так называемая “некорректная обратная задача”, что приводит к резкому возрастанию ошибок измерений и, как следствие, невысокой точности рассчитываемых радиальных профилей. Поэтому основной задачей данной диагностики является максимально точное измерение профиля линейной плотности ионов.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ CXRS-ДИАГНОСТИКИ НА ГОЛ-NB

В мировой практике инжекторы быстрых нейтральных атомов активно используются как ос-

нова для CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) диагностик [20]. Идея CXRS основана на анализе спектров быстрых атомов перезарядки. Доплеровское уширение линий позволяет измерить скорость атомов, а их интенсивность — оценить радиальное распределение плотности ионов. Такие диагностики часто и успешно применяются на многих токамаках [21, 22].

Кроме того, существует методика измерения функции распределения ионов на основе анализаторов нейтральных атомов, также возникающих при перезарядке ионов плазмы на атомах пучка, см. напр. [23]. Данная методика имеет ряд общих черт с CXRS, в частности это необходимость инъекции быстрых нейтральных атомов в плазму, возможность определения ионной температуры и состава плазмы. На ГОЛ-NB планируется параллельная работа CXRS системы и анализатора нейтралов перезарядки, вводимого на данный момент в эксплуатацию, что увеличит степень достоверности получаемой информации о параметрах плазмы. Однако, обсуждение диагностической системы на основе анализатора атомов перезарядки выходит за рамки данной статьи.

Для корректной работы CXRS диагностической системы требуется достаточно большая интенсивность излучения перезарядных атомов. Ориентируясь на использование ФЭУ (или его полупроводникового аналога на лавинных фотодиодах с дополнительным усилением сигнала) с коэффициентом усиления до $K \sim 10^8$, а также разумными параметрами системы по сбору светового потока, необходимая удельная мощность излучения из плазмы в диапазоне линии H_α должна быть не менее ~ 3 мкВт/см³. Предполагая, что данный вид излучения возникает непосредственно при перезарядке, его мощность можно оценить следующим образом, см., напр. [24]:

$$L_{CX}(\lambda) = \frac{h\nu}{2\pi} \int_{LOS} n_z(l)n_0 \times Q_{эфф}(l)dl,$$

где n_z — плотность ионов плазмы, n_0 — плотность частиц нейтрального пучка, $Q_{эфф}$ — коэффициент эффективной эмиссии линии H_α , а LOS обозначает интегрирование по линии наблюдения. В данном случае коэффициент эффективной эмиссии составляет $Q_{эфф} \cong 4 \times 10^{-10}$ см³/с [25]. Для имеющегося диагностического пучка с эквивалентной плотностью тока ~ 30 мА/см² суммарная по хорде наблюдения с поперечным размером $\varnothing \sim 1$ см мощность должна составить около 10 мкВт/см³, что теоретически позволяет проводить измерения профиля ионной температуры тепловой компоненты плазмы, вытекающей через многопробочный соленоид, по трем хордам наблюдения.

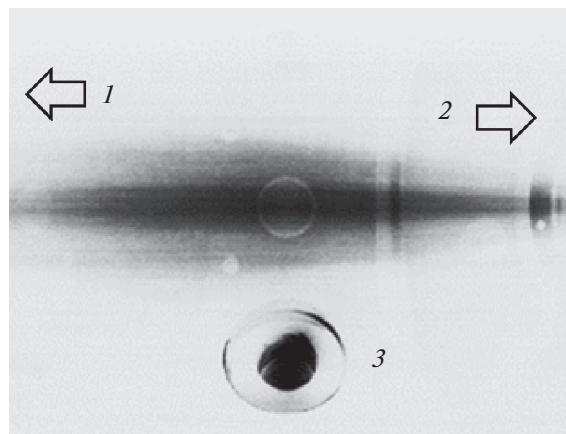


Рис. 6. Фотография плазмы (#5184) в красном цвете в сечении инъекции нагретых атомов водорода (обозначение 4 рис. 1, правый инжектор). 1 — направление на центр ловушки, 2 — направление на выходную пробку, 3 — патрубок ввода пучка.

Помимо диагностического инжектора на установке ГОЛ-NB используются два мощных нагретых инжектора с энергией 30 кэВ и плотностью тока ~ 0.9 А/см². В случае, если базой для CXRS-диагностики выступают именно они, мощность перезарядного излучения должна составить ~ 300 мкВт/см³, что позволит использовать для регистрации фотографические системы на основе С-MOS или CCD-камер с полосовыми светофильтрами.

Для изучения процесса накопления быстрых ионов в течение инъекции нагретых пучков была проведена серия экспериментов по регистрации спектра излучения из области плазмы в сечении инъекции. Геометрия ввода пучков на установке ГОЛ-NB такова, что данное сечение соответствует точке остановки захваченных быстрых ионов. Фотография свечения плазмы в красном спектральном интервале длин волн области инъекции пучка приведена на рис. 6. Как видно, на фоне излучения плазмы транспортировка, а также перезарядное излучение из плазмы в области непосредственного движения быстрых атомов, не видны. Это показывает малую мощность излучения смещенных по спектру из-за эффекта Доплера линий H_α соответствующих атомов.

Для наблюдения спектра перезарядных атомов в сечении инъекции нагретых пучков водорода была собрана спектральная система на основе спектрометра МДР-12 с регистрацией излучения с помощью ПЗС-камеры SDU-285. Геометрия сбора излучения из установки показана на рис. 7. На рисунке инъекция пучка показана слева-направо. Луч зрения спектрометра повернут примерно на 45° против линии инъекции пучка. Таким образом эта схема позволяет разрешить ли-

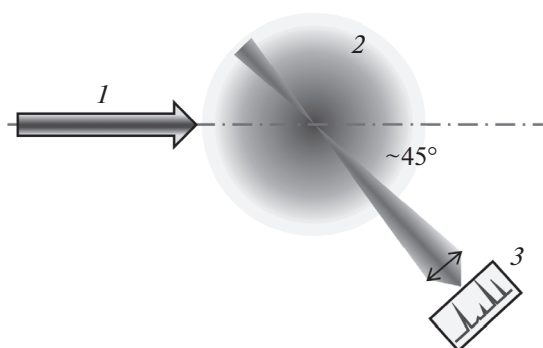


Рис. 7. Схема диагностической системы наблюдения спектра перезарядных атомов на установке ГОЛ-НВ в сечении инъекции нагретых атомов. Обозначения: 1 – направление потока быстрых нейтральных атомов водорода, 2 – плазма, 3 – спектрометр на основе МДР-12 с фоторегистрацией цифровой ПЗС-камерой SDU-285.

нии излучения атомов инжектируемого пучка и перезарядных атомов плазмы.

Усредненный в течение двух последовательных выстрелов установки спектр излучения вблизи линии H_{α} показан на рис. 8. Данное излучение регистрировалось в обсуждаемом сечении установки при наблюдении вдоль хорды, близкой к краю плазмы, и соответствующей лучу зрения по ходу вращения в магнитном поле захваченных быстрых ионов, а затем перезарядившихся и излучивших фотоны с красным смещением (рис. 8 (область б)). Наибольшая спектральная мощность регистрируется в области несмещенной H_{α} . Также на спектре хорошо видно излучение, соответствующее инжектируемым атомам с полной, половинной и 1/18 энергией, и находящееся в синей области от несмещенной H_{α} . Дробные энергии возникают вследствие ускорения в ИОС инжектора ионов H_2^+ и H_2O^+ .

Самая яркая центральная несмещенная компонента линии H_{α} на спектре соответствует излучению перезарядных атомов, получаемых из ионов тепловой компоненты плазмы. Мощность данного излучения позволяет достаточно уверенно проследить за поведением температуры этих ионов, как и предполагалось при анализе перспективы использования данной CXRS-методики в начале раздела. В высокоразрешающем режиме работы спектрометра измеряемая ширина профиля центральной линии дает расчетную температуру тепловых ионов плазмы в течение инъекции нагретых пучков на уровне 1 ± 0.5 эВ. Обсуждение поведения температуры тепловой компоненты выходит за рамки статьи, т.к. это напрямую связано с физикой нагрева и удержания плазмы в установке, а также за недостаточностью

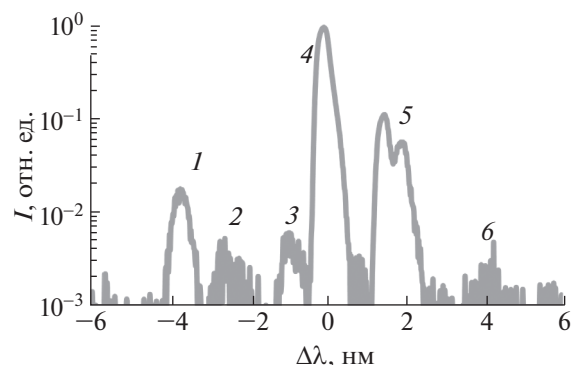


Рис. 8. Спектр излучения перезарядных атомов вблизи линии H_{α} в сечении инъекции нагретых пучков водорода, измеренный согласно оптической схеме, показанной на рис. 7, в течение #5189 и #5190 импульсов установки. Все максимумы, кроме 5, соответствуют линии H_{α} : 1, 2 и 3 – смещенная линия от пучка атомов с полной, половинной (H_2^+) и 1/18 (H_2O^+) энергией, 4 – несмещенная линия мишенной плазмы, 6 – смещенная линия от захваченных быстрых протонов, 5 – мультиплет примеси С II.

полной совокупности экспериментальных данных по поведению плазмы в ГОЛ-НВ, которая также, как и обсуждаемая диагностическая система, недавно начала работать в проектной конфигурации.

При захвате плазмой нагретых пучков атомов водорода, возникает популяция быстрых надтепловых протонов. Перезарядное излучение от быстрых протонов, соответствующее смещенному в красную область излучению линии H_{α} , регистрируется данной системой на уровне шумов. Как следствие пока невозможно провести изучение процесса накопления и удержания быстрых ионов в установке. Однако, данный спектр был получен с помощью высокоразрешающего спектрометра с ПСЗ-регистратором излучения. В связи с этим, у авторов есть дальнейшие планы по увеличению чувствительности данной системы за счет применения многоканального оптического волокна, совмещенного с ФЭУ, например, как это было выполнено в [26]. В спектре вблизи линии H_{α} также наблюдается дуплет однократно ионизированного углерода CII (657.8 и 658.288 нм). Предположительно углерод возникает в системе из остаточного вакуума, т.к. вакуумные уплотнения установки выполнены из витона, который может являться источником углерод содержащих молекул.

Данные первые эксперименты показывают перспективность использования диагностики перезарядной спектроскопии на установке ГОЛ-НВ. В частности, для измерения параметров плазмы, вытекающей вдоль многопробочной секции, а

также, при последующей модернизации диагностики, — процесса накопления быстрых ионов в центральной ячейке установки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для установки ГОЛ-NB разработан диагностический комплекс на основе пучков быстрых нейтральных атомов водорода, включающий в себя систему многохордового зондирования плазмы широкоапертурным диагностическим пучком и спектроскопическая система перезарядных атомов в сечении нагревных инжекторов атомов водорода. Система многохордового зондирования позволяет проводить измерения профиля линейной плотности плазмы с точностью 10%. В ходе ее адаптации к экспериментам ГОЛ-NB была увеличена пространственно-разрешающая способность на $\approx 25\%$ по сравнению с предыдущей версией диагностической системы, использовавшейся в экспериментах первой очереди установки ГОЛ-NB. Спектроскопическая система перезарядных атомов позволяет измерить компонентный состав инжектируемого нагревного пучка, а также определить температуру мишенной компоненты плазмы, создаваемой плазменной пушкой. Дальнейшие планы по развитию данной системы связаны с увеличением чувствительности детектирования разложенного по спектру излучения с помощью многоканального оптоволоконного совмещенного с ФЭУ, с последующей регистрацией быстродействующим высокоомным АЦП. Такой детектор позволит измерить динамику накопления быстрых ионов в плазме.

Сооружение и эксплуатация установки ГОЛ-NB комплекса открытых ловушек ДОЛ финансировались Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Исследование возможности создания CXRS диагностической системы на установке и тестовые эксперименты по наблюдению спектров от нагревных пучков атомов водорода выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках Проекта № 20-42-540014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. С. 320.
2. Koidan V.S., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Derevyankin G.E., Ivanenko V.G., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Konyukhov V.V., Kuznetsov S.A., Makarov A.G., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Shoshin A.A., Sinitzky S.L., Sulyaev Yu.S., Zubairov E.H. // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 47. № 1Т. P. 35. <https://doi.org/10.13182/FST05-A605>
3. Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V., Bagryansky P., Burdakov A., Davydenko V., Gavrilenko D., Ivanov A., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Polosatkin S., Postupaev V., Sinitzky S., Shoshin A., Timofeev I., Tsidulko Yu. // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. № 1Т. P. 46. <https://doi.org/10.13182/FST13-A16872>
4. Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Postupaev V.V. // J. Fusion Energy. 2019. V. 38. P. 162. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0174-1>
5. Ivanov A.A., Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Bocharov V.N., Deichuli P.P., Karpushov A.N., Maximov V.V., Pod'minogin A.A., Rogozin A.I., Salikova T.V., Tsidulko Yu.A. // Phys. Plasmas. 1994. № 1. P. 1529. <https://doi.org/10.1063/1.870704>
6. Postupaev V.V., Yurov D.V. // Plasma Phys. Reports. 2016. V. 42. P. 1013. <https://doi.org/10.1134/S1063780X16110076>
7. Иванов И.А., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Ку克林 К.Н., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 9. С. 856. <https://doi.org/10.31857/S0367292121090031>
8. Postupaev V.V., Batkin V.I., Beklemishev A.D., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Chernoshanov I.S., Gorbovsky A.I., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N., Yurov D.V. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/3/036012>
9. Березовский Е.Л., Кисляков А.И., Михайлов Е.А. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19. № 5. С. 283.
10. Equipe T.F.R. // Nucl. Fusion. 1978. V. 18. P. 647.
11. Иванов А.А., Кабанцев А.А., Росляков Г.В. // Препринт ИЯФ СО АН СССР № 83-15, Новосибирск, 1983.
12. Kaganovich I.D., Shnidman A., Harrison Mebane, Davidson R.C. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (2009). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.084>
13. [https://open.adas.ac.uk/detail/adf07/szd93\]\[h/szd93\]\[h_h0.dat](https://open.adas.ac.uk/detail/adf07/szd93][h/szd93][h_h0.dat)
14. Поступаев В.В., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Ку克林 К.Н., Меклер К.И., Ровенских А.Ф. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 4. С. 321.
15. Schultz D.R., Krstic P.S., Lee T.G., Raymond J.C. // The Astrophysical Journal. 2008. V. 678. P. 950.
16. Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V., Batkin V., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivskiy M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kuklin K., Kuznetsov S., Makarov A., Makarov M., Mekler K., Polosatkin S., Popov S., Postupaev V., Rovenskikh A., Shoshin A., Sinitzky S., Stepanov V., Sulyaev Yu., Trunev Yu., Vyacheslavov L., Zubairov E.H. // Fusion Sci. Technol. 2009. V. 55. № 2Т. P. 63.
17. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 2. С. 464.
18. Higatsburger M.I., Demores H.L., Nier A.O. // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. P. 883.
19. Ivanov I.A., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Kuklin K.N., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Sidorov E.N., Rovenskikh A.F. // AIP Advances. 2017. V. 7. 125121. <https://doi.org/10.1063/1.5009528>

20. *Isler R.C.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. P. 171–208.
21. *Aydeeva G.F., Miroshnikov I.V., Bakharev N.N., Kurskiy G.S., Patrov M.I., Sergeev V.Yu., Schegolev P.B.* // Journal of Physics: Conf. Ser. 2016. P. 666. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/666/1/012002>
22. *Jing W.U., Lieming Y.A.O., Jianhua Z.H.U., Xiaoyu H.A.N., Wenzhu L.I.* // Plasma Science and Technology. 2012. V. 14. № 11.
23. *Petrov M.P., Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Mironov M.I., Petrorov S.Ya.* // Eur. Phys. J. H(2021) 46:5. <https://doi.org/10.1140/epjh/s13129-021-00009-6>
24. *McDermott R.M., Dux R., Pütterich T., Geiger B., Kapatou A., Lebschy A., Bruhn C., Cavedon M., Frank A., den Harder N., Viezzer E., and ASDEX Upgrade Team* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad256>
25. [https://open.adas.ac.uk/detail/adf12/qef93\[\[he/qef93\]\]\[\[he_kvi\]\]\[h1.dat](https://open.adas.ac.uk/detail/adf12/qef93[[he/qef93]][[he_kvi]][h1.dat)
26. *Акентьев Р.Ю., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Шошин А.А.* // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 98.