

ДОПЛЕРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДНО-ДЕЙТЕРИЕВОГО ПУЧКА

© 2021 г. П. П. Дейчули^{a,*}, А. В. Бруль^a, В. И. Давыденко^a,
А. А. Иванов^a, Д. Осин^b, Р. Магги^c

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^b Tokamak Energy Ltd., Abingdon, United Kingdom

^c Tri Alpha Energy Ltd, Foothill Ranch, CA, USA

*e-mail: P.P.Deichuli@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

После доработки 12.03.2021 г.

Принята к публикации 14.03.2021 г.

Получение атомарных пучков смеси изотопов водорода представляет интерес для диагностических целей, позволяя изучить процесс релаксации быстрых захваченных ионов в плазме с помощью нейтронных диагностик. Кроме того, инжекция смешанных пучков дейтерия и трития для нагрева и поддержания плазмы могла бы позволить сильно упростить дорогостоящую систему разделения изотопов в термоядерном реакторе. В данной работе методом доплеровской спектроскопии экспериментально определено относительное содержание ионов с различной массой в пучке ионного источника, работающего на смеси изотопов водорода (водород–дейтерий). Полученный опыт в дальнейшем предполагается развить и использовать для оптимизации условий генерации плазмы в источнике ионов с целью получения смешанного пучка ионов с характеристиками, требуемыми для различных приложений.

Ключевые слова: инжекторы пучков быстрых атомов, источники ионов изотопов водорода, доплеровская спектроскопия атомов водорода и дейтерия

DOI: 10.31857/S0367292121070064

ВВЕДЕНИЕ

Инжекция мощных атомарных пучков изотопов водорода широко используется в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу для нагрева плазмы и поддержания тока. В большинстве приложений для этих целей используются либо пучки атомов дейтерия, либо водорода. В некоторых случаях представляет большой интерес инжекция пучков из смеси дейтерия и водорода. Например, если в эксперименте для нагрева плазмы и генерации тока используется мощный пучок атомов водорода, то небольшая добавка дейтерия позволяет задействовать диагностики на основе регистрации термоядерных нейтронов *DD*-реакций в плазме или в поглощающих стенках ловушки. С помощью этих нейтронных диагностик могут быть получены данные о динамике движения захваченных ионов дейтерия, времени их жизни в плазме, области движения и зоне потерь.

Однако самое важное, на наш взгляд, из возможных применений смешанных пучков изотопов водорода — это инжекция пучка из смеси дейтерия и трития в термоядерном реакторе, работа-

ющем на дейтерий-третиевой плазме. В этом случае, как обратил внимание авторов Д.Д. Рютов, отпадает необходимость в дорогостоящей и сложной системе разделения изотопов. Тогда для расчета глубины проникновения пучка в плазму и оценки величины нейтронного выхода требуется знание начального молекулярного состава пучка в ионном источнике. Для получения атомарного пучка ионный пучок из источника должен пройти через газовую мишень-нейтрализатор, в которой молекулярные ионы диссоциируют и затем перезаряжаются в атомы, энергия которых определяется структурой первичного молекулярного иона. Молекулярный состав пучка в источнике ионов может достаточно сильно меняться в зависимости от условий разряда, генерирующего плазму. Меняя эти условия, можно обеспечивать в каждом случае нужный молекулярный состав пучка из смеси изотопов водорода.

Прямое измерение содержания каждого изотопа в смешанном атомарном пучке является достаточно сложной задачей. Поэтому очень заманчиво выглядит измерение содержания изотопов достаточно простым бесконтактным методом до-

плеровской спектроскопии пучка. Результаты соответствующих экспериментов с мощным водородно-дейтериевым пучком обсуждаются в данной работе.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ СМЕШАННОГО ПУЧКА

В пучке ионного источника, работающего на смеси изотопов, наряду с ионами водорода H^+ , H_2^+ , H_3^+ , H_2O^+ и дейтерия D^+ , D_2^+ , D_3^+ , D_2O^+ , возможно наличие гибридных ионов HD^+ , H_2D^+ , HD_2^+ и HDO^+ . После нейтрализации и диссоциации молекулярных ионов в газовой мишени инжектора в излучении пучка представлен набор доплеровски сдвинутых линий H_α -частиц, двигающихся с разными скоростями. Кроме того, линии дейтерия имеют дополнительный изотопный сдвиг, который для пары H_α - D_α составляет около 1.72 Å. Излучение быстрых атомов водорода и дейтерия связано со столкновениями с молекулами остаточного газа в тракте транспортировки пучка. Информация о сдвиге линий $\Delta\lambda(\text{Å})$ излучения атомов, возникших после полной диссоциации и нейтрализации молекулярных ионов, что, как правило, имеет место в практике использования атомарных пучков для целей УТС, приведена в табл. 1 для энергии 15.3 кэВ, что соответствует условиям экспериментов. При определении положения линий излучения дейтерия учтен изотопный сдвиг.

Для изотопно-чистых пучков в спектре излучения представлены линии, порожденные ионами H^+ , H_2^+ и H_3^+ , H_2O^+ и аналогичными ионами в дейтериевом пучке. Для водородного пучка это линии H_α -атомов с энергиями E_0 , $E_0/2$, $E_0/3$ и $E_0/18$. Для пучков с энергией выше 10 кэВ они достаточно хорошо разнесены по спектру и могут быть хорошо разрешены даже на фоне имеющегося доплеровского уширения линий, связанного с угловым и энергетическим разбросом частиц пучка. В изотопно-чистых пучках это позволяет определить содержание молекулярных фракций в исходном пучке ионов [1]. Сечение возбуждения атомов изотопов водорода при столкновениях с молекулами водорода в тракте транспортировки хорошо известно. В предположении, что в зависимости от плотности остаточного газа излучение атомов происходит либо из-за повторных столкновений (столкновительная модель), либо в результате спонтанного высвечивания (модель коронального равновесия), можно связать плотность соответствующей компоненты пучка с интенсивностью линии. Чаще всего, плотность остаточного газа в тракте пучка мала, и интенсивность излучения определяется корональной моделью. Данная диагностика очень удобна и широ-

Таблица 1. Спектральные линии пучка смеси водорода и дейтерия

№	Масса иона, а.е.м.	Исходный ион	Излучающий атом	$\Delta\lambda(\text{Å})$ при $E = 15.3$ кэВ и угле наблюдения 27°
1	1	H^+	H	33.4
2	2	H_2^+	H	23.6
3	2	D^+	D	21.9
4	3	H_3^+	H	19.27
5	3	HD^+	H D	19.27 17.55
6	4	H_2D^+	H D	16.7 15.0
7	4	D_2^+	D	15.0
8	5	HD_2^+	H D	14.93 13.21
9	6	D_3^+	D	11.9
10	18	H_2O^+	H	7.87
11	19	HDO^+	H D	7.66 5.94
12	20	D_2O^+	D	5.75

ко используется на практике в случае как мощных нейтральных пучков, используемых для нагрева плазмы, так и диагностических пучков небольшой мощности, см., например, [2–4].

Заметим, что получающиеся после развала гибридных ионов атомы водорода и дейтерия имеют одинаковое доплеровское смещение. Однако, как уже указывалось выше, благодаря изотопному сдвигу их линии, в принципе, могут быть разрешены.

Измеряя интенсивности смещенных в результате эффекта Доплера линий изотопов в нейтральном пучке, можно определить доли токов ионов водорода и дейтерия в начальном пучке в каждой из фракций. Эта задача всегда стоит при разработке ионного источника. Для приложений в УТС, где используются атомарные пучки, эта информация является особенно актуальной.

В соответствии с данными, приведенными в табл. 1, в первичном ионном пучке присутствуют 12 сортов ионов, которым в наблюдаемой области спектра соответствуют 16 линий излучения. Некоторые из них совпадают по длине волны, поскольку излучающие атомы, возникшие при диссоциации различных первичных молекулярных ионов, имеют одинаковые скорости. Это линии атомов водорода, образовавшихся при диссоциации ионов H_3^+ и HD^+ , и дейтерия при диссоциа-

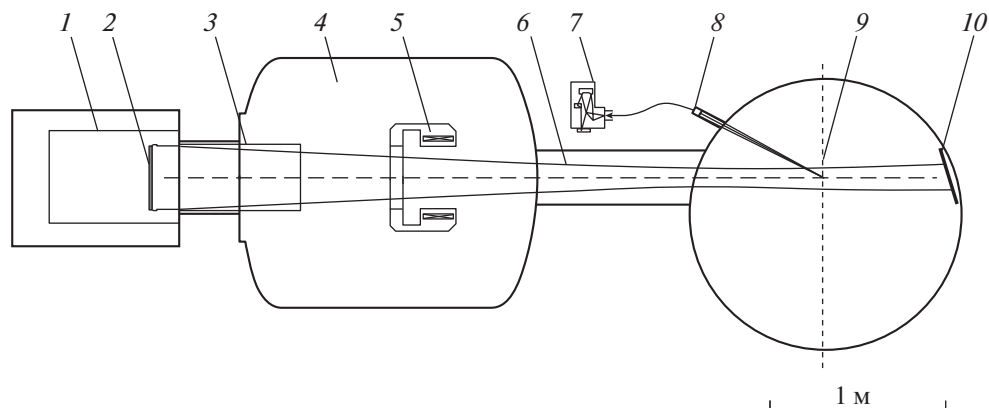


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ионный источник; 2 – ионно-оптическая система; 3 – нейтрализатор пучка; 4 – вакуумный объем инжектора; 5 – отклоняющий магнит; 6 – огибающая пучка; 7 – спектрометр; 8 – зона наблюдения; 9 – центральная плоскость установки С-2U; 10 – приемник пучка.

ции ионов H_2D^+ и D_2^+ . В случае полного разрешения всех 16 линий спектра атомов водорода и дейтерия в смешанном пучке можно определить относительное содержание всех 12 сортов ионов в первичном ионном пучке инжектора.

Содержание молекулярных ионов H^+ , H_2^+ , D^+ и D_2^+ вычисляется из интенсивности излучения линий атомов $\text{H}(E)$, $\text{H}(E/2)$, $\text{D}(E)$, и $\text{D}(E/2)$ (в скобках указана величина энергии атома, E – начальная энергия иона). Атом $\text{H}(E/3)$ образуется в результате диссоциации и нейтрализации как молекулярного иона H_3^+ , так и иона HD^+ . В этом случае содержание молекулярных ионов HD^+ в ионном пучке следует определять по интенсивности линии $\text{D}(2/3)$. Затем необходимо рассчитать интенсивность линии $\text{H}(E/3)$ от молекулярных ионов HD^+ и определить содержание молекулярных ионов H_3^+ из разности интенсивности линии $\text{H}(E/3)$ и расчетной интенсивности $\text{H}(E/3)$ от молекулярных ионов HD^+ . Аналогичную процедуру для линий $\text{H}(E/4)$ и $\text{D}(E/2)$ следует использовать для определения содержания молекулярных ионов D_2^+ и H_2D^+ , поскольку линия $\text{D}(E/2)$ возникает в результате диссоциации и нейтрализации обоих молекулярных ионов. Содержание молекулярных ионов HD_2^+ в первичном ионном пучке может быть найдено как по интенсивности линии $\text{H}(E/5)$, так и по интенсивности линии $\text{D}(2E/5)$. Содержание молекулярных ионов D_3^+ , H_2O^+ и D_2O^+ определяется по интенсивностям линий $\text{D}(E/3)$, $\text{H}(E/18)$ и $\text{D}(E/10)$. Содержание молекулярных ионов HDO^+ может быть вычислено как по интенсивности линии $\text{H}(E/19)$, так и по интенсивности линии $\text{D}(2E/19)$.

Некоторые спектральные линии, показанные в табл. 1, очень близки между собой и практически сливаются при наблюдении. Так, например, расстояние между линией $\text{H}(E/18)$ от молекулярного иона H_2O^+ и линией $\text{H}(E/19)$ от молекулярного иона HDO^+ составляет всего 0.2 \AA , поэтому в эксперименте их невозможно разрешить. Наличие линий ионов, в составе которых присутствует кислород, свидетельствует о наличии течей в вакуумной системе инжектора. Доля этих ионов в пучке обычно пренебрежимо мала. Поэтому для оценки их содержания линии $\text{H}(E/18)$ и $\text{H}(E/19)$, а также линии $\text{D}(2E/20)$ и $\text{D}(2E/19)$ можно не разделять.

Полученные в эксперименте спектры изотопов в смешанном пучке и их интерпретация приведены ниже.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов представлена на рис. 1. Экспериментальные исследования проводились на пучке мощного атомарного инжектора [5]. Сфокусированный ионный пучок формировался многощелевой трехэлектродной ионно-оптической системой с эмиссионным диаметром 34 см. Баллистическая фокусировка пучка обеспечивалась сферической формой электродов. При этом фокусное расстояние составляло 370 см. Начальный ток ионного пучка до нейтрализации в мишени составлял около 150 А. Особенностью инжектора является возможность в течение импульса менять энергию пучка от 15 до 40 кэВ без изменения тока. Измерения состава пучка проводились при энергии 15.3 кэВ. Инжектор оборудован магнитом для отклонения остаточных ионов после нейтрализатора. Свечение пучка быстрых атомов наблюдалось спектрометром через окно, расположенное в вакуумной камере установки С-

2U [6]. Одновременно со спектрометром, измерявшим спектр излучения пучка, в эксперименте использовался также нейтронный детектор. Он измерял поток нейтронов из приемника пучка. Нейтроны в приемнике пучка образовывались в результате реакции $D + D \rightarrow He^3 + n(2.45 \text{ МэВ})$ при столкновении быстрых атомов дейтерия с атомами дейтерия, поглощенными в поверхностном слое приемника пучка [7]. Данные нейтронного детектора качественно соответствовали измерениям спектра излучения пучка при изменении смеси в ионном источнике, когда в последовательных импульсах происходило замещение одного изотопа другим.

В данных экспериментах использовался водородно-дейтериевый пучок, в котором соотношение водород/дейтерий можно было изменять от 0 до 100%. Режим работы инжектора переводился с одного изотопа на другой, либо на смесь изотопов, регулировкой подачи рабочих газов в источник плазмы. В экспериментах использовалось два способа подачи газа в ионный источник и нейтрализатор. В одном случае приготавливался заранее баллон со смесью газов водорода и дейтерия заданной концентрации. В другом — задавался определенный поток каждого типа газов при их независимом напуске в источник плазмы инжектора. Заметного отличия спектроскопических данных о пучке из смеси изотопов, полученного этими способами, не наблюдалось.

На рис. 2 показан сигнал нейтронного детектора, нормированный на величину тока пучка. Сначала была проведена серия импульсов с подачей дейтерия в ионный источник и нейтрализатор. При этом наблюдался спектр пучка атомов дейтерия и соответствующий сигнал нейтронного детектора был практически постоянен (рис. 2). Затем происходило переключение на водород, что приводило к постепенному падению нейтронного выхода. При этом полностью исчезали чисто линии атомов дейтерия в серии спектров, снятых в процессе очищения источника плазмы. Выход нейтронов DD-реакции спадал экспоненциально с числом импульсов инжектора на водороде, что соответствовало наблюдаемому падению интенсивности линии $D(E)$ (см. рис. 2).

Рассмотрим факторы, определяющие возможность разрешения линий водорода и дейтерия в смешанном пучке, имеющих некоторую ширину. Уширение линий атомов пучка связано как с поперечным, так и с продольным разбросом скоростей атомов. Рассмотрим вначале уширение линий за счет поперечного движения атомов в вертикальном направлении, совпадающем с направлением вдоль щелей ионно-оптической системы источника. Локальная угловая расходимость пучка ионов вдоль щелей на выходе из ионно-оптической системы определяется темпе-

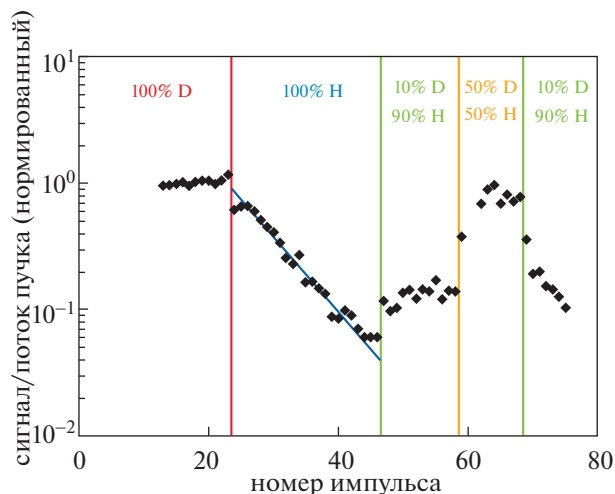


Рис. 2. (Цветной онлайн) Сигнал нейтронного детектора в сериях с различным составом газа в баллоне в зависимости от номера выстрела.

ратурой ионов плазменного эмиттера $\sim 1.8 \text{ эВ}$, и составляет ~ 11 мрад при энергии ионов 15 кэВ . Другим фактором, определяющим поперечную расходимость пучка быстрых атомов, является баллистическая фокусировка пучка. При начальном диаметре пучка 34 см и фокусном расстоянии 370 см среднеквадратичная угловая расходимость, связанная с фокусировкой, имеет величину ~ 23 мрад. Полная среднеквадратичная расходимость пучка атомов за счет рассмотренных факторов в вертикальном направлении составляет ~ 25 мрад.

В уширение линии также вносит вклад конечное разрешение спектрометра, составляющее 0.4 \AA . Шумы сигналов со спектрометра тоже дают вклад в уширение линий. Учитывалось также уширение линий из-за конечного телесного угла наблюдения, определяемого оптической системой [8]. Для данной конфигурации эксперимента это уширение составляло 11 мрад, что незначительно увеличивает полное уширение с 25 до 28 мрад.

Разброс скоростей атомов в вертикальном направлении выражается как $\delta v_y \approx v \delta \alpha$, где v — продольная скорость атома. Уширение линий, связанное с разбросом поперечных скоростей, имеет величину $\delta \lambda_y \approx \delta v_y \lambda / c$, где λ — длина волны линии H. Для атома водорода с энергией 15 кэВ $\delta \lambda_y \approx 0.93 \text{ \AA}$, для атома дейтерия $\delta \lambda_y \approx 0.65 \text{ \AA}$.

Продольный разброс скоростей атомов в пучке связан с несколькими факторами. Разброс энергии ионов, связанный с нестабильностью ускоряющего напряжения ионного источника, имеет величину $\sim \pm 100 \text{ эВ}$. Кроме того, при прохождении газовой мишени нейтрализатора атомы теряют энергию $\sim 50 \text{ эВ}$ и получают разброс энер-

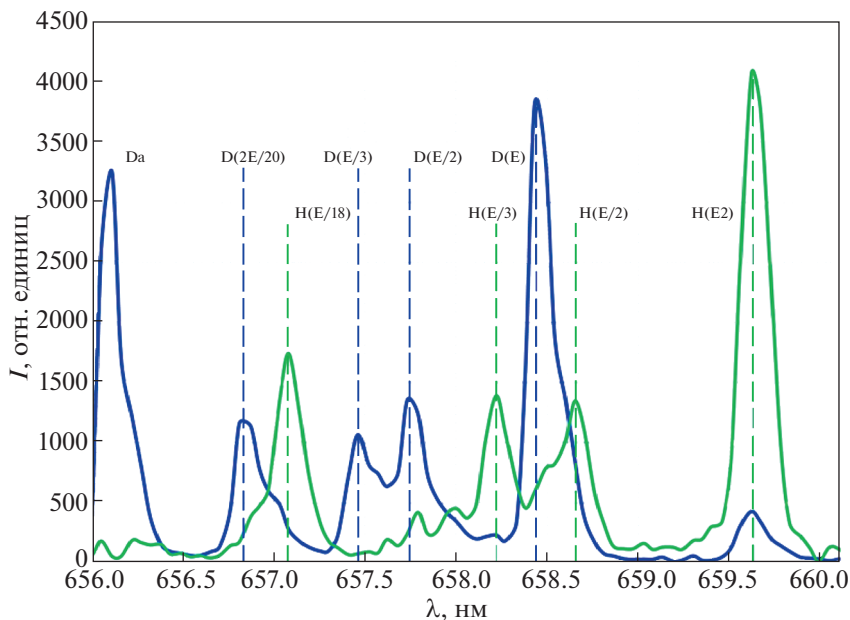


Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектр излучения пучка с различным изотопным составом: синяя кривая — спектр исходного пучка дейтерия, зеленая кривая — в конечном состоянии при переходе на водород.

гии $\sim \pm 50$ эВ вследствие нескольких ионизаций в достаточно толстой перезарядной мишени. Суммарный среднеквадратичный разброс продольной энергии атомов оценивается величиной $\delta E_l \approx \approx 110$ эВ. Поскольку продольная скорость атома $v = (2E)/M^{1/2}$, то продольный разброс скоростей атомов пучка оценивается как $\delta v_l \approx v \delta E_l / (2E)$ и соответствующее уширение линий равно $\delta \lambda_l \approx \approx \delta v_l \lambda / c$. Для атомов водорода с энергией 15 кэВ продольное уширение линии $\delta \lambda_l \approx 0.62$ Å, для атомов дейтерия той же энергии $\delta \lambda_l \approx 0.45$ Å.

При наблюдении под углом θ к направлению движения пучка уширение линий связано с уширением линий в поперечном и продольном направлении и может быть оценено как $\delta \lambda \approx \approx ((\delta \lambda_l \sin \theta)^2 + (\delta \lambda_l \cos \theta)^2)^{1/2}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволили определить состав первичного ионного пучка из смеси изотопов при различных соотношениях их напуска в источник ионов. При этом полный ток пучка поддерживался в диапазоне 130–150 А. По мере изменения состава рабочего газа инжектора интенсивности характерных водородных и дейтериевых линий монотонно изменялись от максимума до практически полного исчезновения (см. рис. 3).

Синяя кривая на рис. 3 соответствует стартовому режиму при работе на чистом дейтерии. Хо-

рошо видны 4 пика (не считая несмещенной линии $D\alpha$), типичных для моноизотопных пучков. По мере снижения подачи дейтерия и увеличения подачи водорода в разряд пучок и спектр постепенно трансформируются к чисто водородному (зеленая кривая на рис. 3).

В экспериментах обнаружено, что при резком переходе от одного изотопа другому, состав пучка изменяется с заметной задержкой. В первых импульсах после смены газа состав пучка по спектроскопическим данным почти не изменялся. Для полной очистки разрядной камеры и электродов инжектора требовалось несколько десятков импульсов с длительностью разряда до 30 мс после изменения состава газа, что было видно по интенсивностям линий в спектре пучка, так и по величине нейтронного выхода (рис. 2).

Примеры спектров смешанного пучка показаны на рис. 4–6. Доплеровский сдвиг для всех фракций пучка заранее известен и дополнительно калибруется по величине максимального сдвига для атомов водорода полной энергии — линии $H(E)$, который учитывает и эффективное значение энергии пучка и угла наблюдения. При работе на одном изотопе можно также определить ширину линий в спектре пучка, которая обусловлена главным образом доплеровским уширением из-за конечного углового разброса в пучке. Это облегчало определение интенсивности близко-расположенных линий в спектре.

В экспериментах использовался инжектор с током пучка 150 А при относительно небольшой энергии (15.3 кэВ). Это затруднило выделение ли-

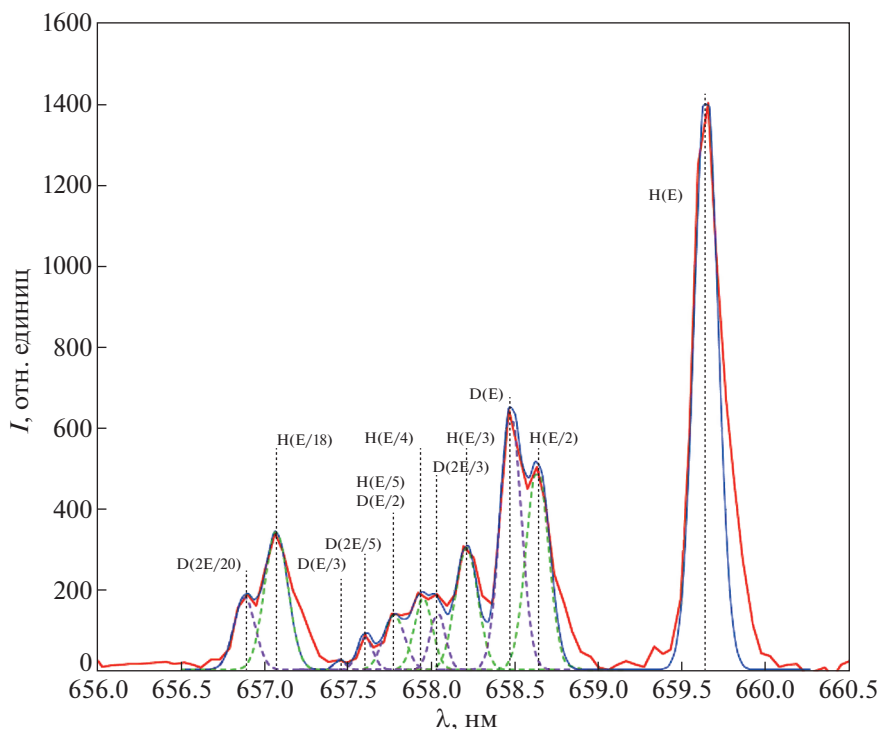


Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектр смешанного пучка: красная линия — измеренный спектр, синяя линия — его аппроксимация набором гауссовских пиков, зеленые штриховые пики — линии водорода, сиреневая штриховая линия — линии дейтерия.

ний фракций с малой концентрацией, а в одном случае — для линий $D(E/2)$ и $H(E/5)$ их положения в спектре случайно почти совпали и разрешить эти пики в описываемых экспериментах оказалось невозможно. Заметим, что для пучков с энергией ≥ 40 кэВ эти пики уже достаточно разнесены и должны быть легко разрешимы.

Варьируя соотношение H и D компонент в пучке можно облегчить выявление линий небольших фракций, прежде всего появляющихся линий доплеровского спектра при изменении изотопного состава пучка. На рис. 5 показаны два спектра смешанного пучка: сверху — спектр при заметном преобладании дейтерия, внизу — при преобладании водорода.

В импульсе с преобладанием дейтерия над водородом (рис. 5, сверху) дейтериевые линии $D(2E/5)$ и $D(2E/3)$ более выражены и легче идентифицируются. Это новые линии, которых нет в моноизотопных D - и H -пучках, и которые возникают при диссоциации гибридных ионов HD_2^+ и HD^+ . Такая линия $H(E/5)$ для энергии пучка 15 кэВ сливается с линией $D(E/2)$ (доплеровский сдвиг между энергиями $E/5$ и $E/4$ при $E = 15$ кэВ случайно совпал с изотопным сдвигом).

Спектр при преобладании водорода показан на рис. 5 внизу. В этом режиме видно, что сильно выражена линия $H(E/3)$ и становится слабо заме-

тен пик от новой линии $H(E/4)$. Статистическое усреднение нескольких спектров и численное моделирование позволяют идентифицировать пики мелких фракций в спектре — штриховые кривые на рис. 5. Черная линия — экспериментальный измеренный спектр пучка. Для наглядности мелких фракций спектры на рис. 5 растянуты по вертикали, так что главные линии полной энергии $H(E)$ и $D(E)$ не показаны полностью.

Из-за высокой интенсивности пучка его спектр легко регистрируется даже при высоком вакууме в камере наблюдения. Несмещенная линия H_α в спектре при этом не видна. В этом случае условия наблюдения не соответствуют модели [1], которая предполагает высвечивание линий при столкновениях с молекулами водорода в пучковом тракте. Требовался дополнительный напуск водорода (дейтерия) в камеру для создания фона, тогда в спектре наблюдалась несмещенная линия $H_\alpha(D_\alpha)$. Данных о величине погрешности измерений состава при возбуждении линий излучения при столкновениях с молекулами других газов, кроме водорода и дейтерия, нет. Для оценки ошибки измерения состава при недостаточном или полностью отсутствующем водороде (дейтерии) в фоновом газе были получены спектры излучения дейтериевого пучка при различном напуске дейтерия в камеру. При этом реализовались

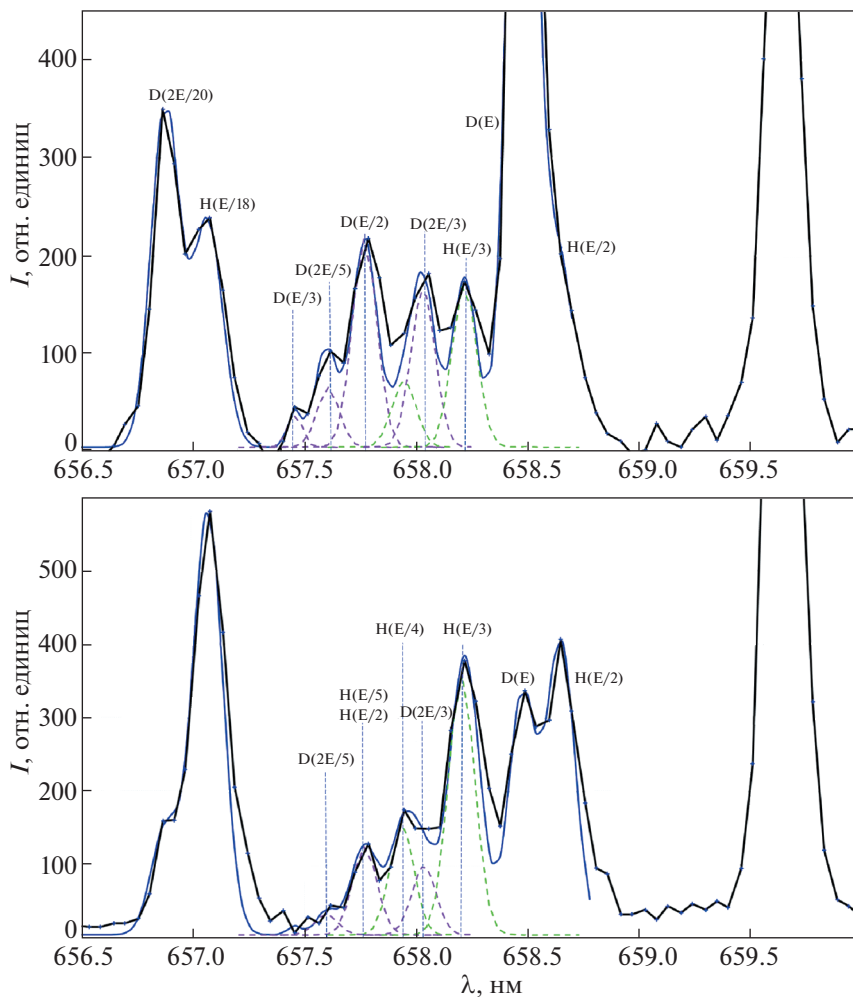


Рис. 5. (Цветной онлайн) Участок спектра излучения пучка с линиями гибридных ионов при различных соотношениях напуска водорода и дейтерия.

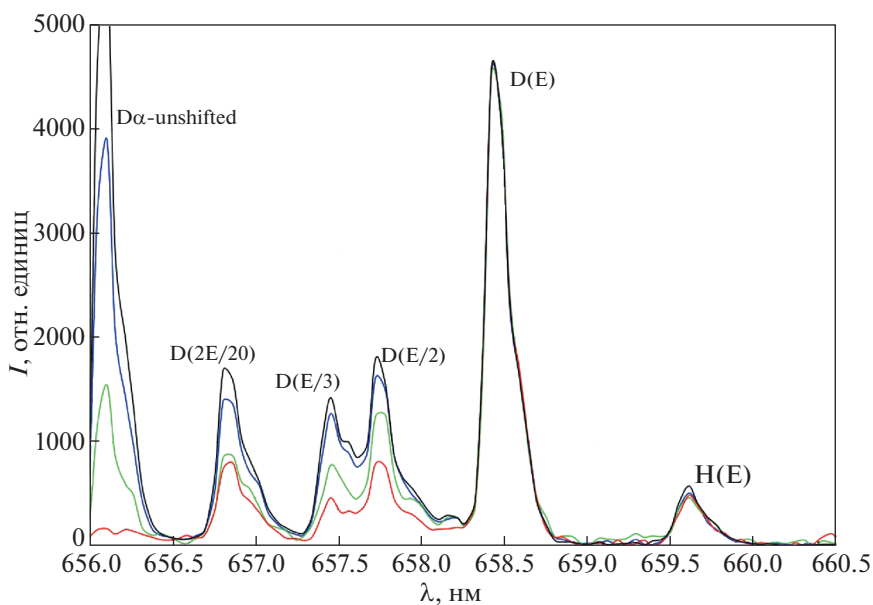


Рис. 6. (Цветной онлайн) Спектр дейтериевого пучка при различной плотности фонового дейтерия в камере наблюдения.

Таблица 2. Ток различных ионов в смешанном пучке (в относительных единицах)

Сорт ионов	H ⁺	D ⁺	H ₂ ⁺	HD ⁺	H ₂ D ⁺	H ₃ ⁺	D ₂ ⁺	HD ₂ ⁺	D ₃ ⁺
Доля от полного тока пучка	54%	27%	10%	4%	2.6%	1.3%	0.6%	0.7%	~0

режимы, когда присутствовала или отсутствовала яркая несмещенная линия D_α. Интенсивность спектральных линий была нормирована на интенсивность линии дейтерия полной энергии. Примеры соответствующих спектров показаны на рис. 6.

Видно, что при измерении спектров на остаточном газе (N₂, O₂ и вода) относительная скорость возбуждения для фракций пучка с энергиями с меньшими E₀ уменьшается по сравнению с дейтерием примерно вдвое.

Эти измерения показывают, что несоблюдение условий наблюдения спектра при полном отсутствии водородсодержащего фонового газа, может заметно (в полтора-два раза) снизить содержание фракций с половинными и меньшими энергиями, зависив соответственно содержание фракции с полной энергией.

В экспериментах с чисто водородным и чисто дейтериевым пучком положение пиков фракций пучка в спектре с хорошей точностью соответствовало ожидаемым для массовых чисел 1; 2; 3; 18 для водородных линий и 2; 4; 6; 20 для дейтериевых линий.

Линия водородной компоненты с полной энергией при измерениях со смешанным пучком служит удобным маркером для измерения смещения Δλ_{max}, между линией водорода, излучаемой частицами с полной энергией и покоящимся газом. Эта величина определяется значением ускоряющего напряжения и углом наблюдения. Относительно этого маркера определялись положение всех остальных линий.

Для определения интенсивности близкорасположенных линий смешанного пучка использовалась аппроксимация наблюдаемого спектра суммированием 16 гауссовских профилей с одинаковой шириной и разными амплитудами, см., например, [9, 10]. Положение центра каждого профиля задавалось по рассчитанной длине волны для соответствующей компоненты пучка. Подбор высоты и ширины каждого профиля, аппроксимирующего линию излучения пучка, осуществлялся по методу наименьших квадратов с помощью численной аппроксимации в среде Python.

На рис. 3 приведен пример спектра при использовании рабочей смеси газов 10%D₂ и 90%N₂. Линии излучения D(E)–H(E/2) на длинах волн 658.45 и 658.65 нм достаточно хорошо различимы. Ток дейтериевой компоненты тока пучка с

полной энергией в этом эксперименте оценивается как ~8%. Соответствующие оценки по величине нейтронного выхода дают ~14%, по составу газа в баллоне – 10%.

Типичный состав чисто водородного пучка в экспериментах был 88.2–8.3–3.1–0.4% от извлеченного ионного тока пучка для компонент. Состав дейтериевого пучка в эксперименте – 86–10–3.5–0.8% для, соответственно, D⁺, D₂⁺, D₃⁺ и D₂O⁺.

В использованном инжекторе с дуговым источником плазмы доля частиц с полной энергией составляет ~90%, доля частиц половинной энергией около 10%. Эта особенность приводит к тому, что даже при небольшом содержании дейтерия в пучке (~10%) линии D(E) и H(E/2) легко разрешимы. Однако по этой же причине при содержании дейтерия заметно больше 60–70%, выделить линию H(E/2) для измерений соотношения изотопов на фоне яркой линии D(E) становится невозможным на фоне шумов. В других типах инжекторов (например, с ВЧ-разрядным источниках плазмы [7]) содержание молекулярной фракции H(E/2), как правило, в 2–3 раза выше, что должно позволить избежать эту трудность.

На рис. 4 приведен пример спектра, измеренного в процессе перехода от одного состава смеси к другому (от 50%/50% к 10% D₂/90% H₂). Судя по сигналу нейтронного детектора, содержание дейтерия в рабочей смеси при этом было около 20%. Здесь дублет D(E) и H(E/2) разрешим с помощью процедуры аппроксимации контуров этих линий [9, 10]. При этом изотопный дублет от тяжелой и легкой воды около пика 657 нм разрешим достаточно легко. Относительное содержание ионов (по току) в первичном ионном пучке для этого спектра приведено в табл. 2. Наличие ионов тяжелых примесей, в составе которых есть кислород, ввиду их малой величины (десятые доли процента) мы не учитываем.

На рис. 5 (вверху) приведен пример спектра с содержанием дейтерия в рабочем газе 50%. На нем показано расчетное положение пиков спектра, перечисленных в табл. 1. Доля ионов дейтерия с полной энергией в токе пучка составляет 56% согласно спектральным измерениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Смешанные пучки атомов изотопов водорода, как указывалось выше, имеют важные применения. Особенно привлекательна возможность инжекции смешанного пучка трития и дейтерия в реакторы УТС, что позволяет существенно упростить и снизить стоимость тритиевой системы реактора. В данной работе впервые обсуждаются результаты первых практических экспериментов в этом направлении со смешанным пучком изотопов водорода, которые могут быть в дальнейшем использованы для контроля его состава. В экспериментах получен смешанный пучок быстрых атомов водорода и дейтерия путем параллельной подачи соответствующих газов в газоразрядную камеру источника плазмы. Изменяя потоки подаваемых газов, можно было получать нейтральный пучок с практически любым желаемым соотношением изотопов H и D с полной энергией.

Впервые с применением процедуры аппроксимации для близко расположенных линий идентифицированы практически все линии смешанного пучка, приведенные в табл. 1. В экспериментах было обнаружено, что соотношение компонент пучка существенно зависит от предыстории из-за достаточно длительного выделения накопленного газа стенками источника плазмы. В данном случае для полной очистки источника плазмы, когда использовался дуговой генератор плазмы, требовалось несколько десятков выстрелов с длительностью 30 мс.

По доплеровскому спектру смешанного пучка при некоторых предположениях можно определить его исходный состав, а также соотношение токов водорода и дейтерия в суммарном токе пучка. Полученный опыт в дальнейшем предполагается использовать для оптимизации условий генерации плазмы в источнике ионов для получения смешанного пучка ионов с характеристиками, требуемыми, в частности, для реакторных приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uhlemann R., Hemsworth R.S., Wang G., Euringer H.* // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64. P. 974. <https://doi.org/10.1063/1.1144100>
2. *Ivanov A.A., Deichuli P.P., Kreter A., Maximov V.V., Schweer B., Shikhovtsev I.V., Stupishin N.V., Usoltsev D.V., Podminogin A.A., Uhlemann R.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 1822. <https://doi.org/10.1063/1.1699508>
3. *Rowan W.L., Sampsel M.B.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 3487. <https://doi.org/10.1063/1.1144100>
4. *Sorokin A., Belov V., Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Podyminogin A., Shikhovtsev I., Shulzhenko G., Stupishin N., Tiunov M.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 02B108. <https://doi.org/10.1063/1.3266141>
5. *Бруль А.В., Абдрашитов А.Г., Амиров В.Х., Белов В.П., Вахрушев Р.В., Горбовский, А.И., Драничников А.Н., Давыденко В.И., Дейчули П.П., Дейчули Н.П., Донин А.С., Иванов А.А., Иванов И.А., Капитонов В.А., Колмогоров В.В., Корепанов С., Мишагин В.В., Ращенко В.В., Сорокин А.В., Ступишин Н.В.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 6. С. 499.
6. *Gota H., Binderbauer M.W., Tajima T., Putvinski S., Tuszewski M., Detrick S., Garate E., Korepanov S., Smirnov A., Thompson M.C., Trask E., Yang X., Schmitz L., Lin Z., Ivanov A.A., Asai T., Alfrey I., Andow R., Beall M., Bolte N., Bui D.Q., Cappello M., Ceccherini F., Clary R., Cheung A.H., Conroy K., Deng B.H., Douglass J., Dunaevsky A., Feng P., Fulton D., Galeotti L., Granstedt E., Griswold M., Gupta D., Gupta S., Hubbard K., Isakov I., Kinley J.S., Knapp K., Magee R., Matvienko V., Mendoza R., Mok Y., Necas A., Primavera S., Onofri M., Osin D., Rath N., Roche T., Romero J., Schindler T., Schroeder J.H., Sevier L., Sheftman D., Sibley A., Song Y., Steinhauer L.C., Valentine T., Van Drie A.D., Walters J.K., Waggoner W., Yushmanov P., Zhai K., and The TAE Team* // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 116021. <https://doi.org/10.1088/1741/aa7d7b>
7. *Polosatkin S.V., Davydenko V.I., Deichuli P.P., Ivanov A.A., Ivanova A.A., Karpushov A.N., Kolmogorov A.V., Puryga E.A., Shikhovtsev I.V., Sorokin A.V., Sorokina N.V., Shvyrev V.G.* // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. P. 090002. <https://doi.org/10.1063/1.4964244>
8. *Bonnal J.F., Bracco G., Breton C., Michelis C., Druaux J., Mattioli M., Oberson R., Ramette J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V.15. P. 805. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/15/5/011>
9. *Coenen J.W.* The Influence of the Dynamic Ergodic Divertor on the Radial Electric Field at the Tokamak TEXTOR. V. 39 of Schriften des Forschungszentrum Juelich. Forschungszentrum Juelich GmbH, 2009
10. *Mitosinkova K., Stockel J., Varju J., Weinzettl V.* // Nukleonika. 2016. V. 61. P. 419. <https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0069>