

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНОГО АНАЛИЗАТОРА ПОТОКОВ АТОМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

© 2019 г. А. Д. Мельник<sup>a,\*</sup>, Л. Г. Аскинази<sup>a</sup>, В. И. Афанасьев<sup>a</sup>,  
В. А. Корнев<sup>a</sup>, С. В. Лебедев<sup>a</sup>, М. И. Миронов<sup>a</sup>, В. Г. Несеневич<sup>a</sup>,  
С. Я. Петров<sup>a</sup>, А. С. Тукачинский<sup>a</sup>, Ф. В. Чернышев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

\*e-mail: amelnik@npd.ioffe.ru

Поступила в редакцию 19.09.2018 г.

После доработки 04.12.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Описан компактный анализатор потоков атомов, модифицированный под задачу исследования тепловых и надтепловых ионов в режимах с нагревом плазмы методом нейтральной инжекции. Представлены результаты калибровки прибора на атомарном пучке. Опробована возможность изменения энергий, регистрируемых каналами анализатора, при помощи вариации напряжения на ускорительном модуле прибора. Приведены результаты измерений ионной температуры и спектров надтепловых ионов в разрядах с нейтральной инжекцией на токамаке ТУМАН-3М.

DOI: 10.1134/S0032816219030248

### ВВЕДЕНИЕ

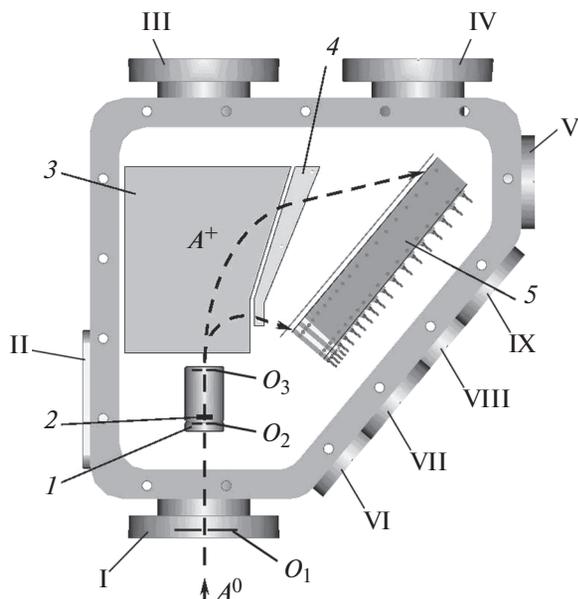
Нейтральная инжекция будет применяться в токамаках-реакторах будущего для дополнительного нагрева плазмы до температур поджига самоподдерживающейся термоядерной реакции. Нейтральную инжекцию предполагается также использовать в так называемых термоядерных источниках нейтронов [1], где она будет создавать популяцию быстрых ионов, непосредственно участвующих в реакциях синтеза. Эти обстоятельства обуславливают необходимость исследований взаимодействия мощного атомарного пучка с плазмой.

Особый интерес в этих исследованиях представляют данные об энергетическом распределении быстрых ионов, образовавшихся в результате ионизации атомов пучка. По особенностям этих распределений часто удается сделать выводы о наличии или отсутствии потерь быстрых частиц, а также установить каналы этих потерь [2]. В исследованиях, направленных на изучение нагрева основной плазмы, помимо области высоких энергий, важной является также тепловая область энергий ионов, по которой, например, можно определить такой параметр, как ионная температура.

Исследовать как тепловую, так и надтепловую составляющие ионного компонента позволяет корпускулярная диагностика — метод, основанный на анализе потоков атомов, вылетающих из

плазмы. Для измерения потоков атомов разработаны и используются разнообразные модели анализаторов атомарных частиц. Устройство и принцип действия всех этих приборов во многом схожи. Анализаторы представляют собой многоканальные энерго-масс-спектрометры входящих в них потоков атомов. Измерения потоков проводятся в нескольких точках по энергии соответствующими каналами анализатора. Если в анализаторе используется перестраиваемая диспергирующая система, то энергии каналов анализатора можно менять, перестраивая энергетический диапазон прибора.

На токамаке ТУМАН-3М (большой радиус  $R = 0.53$  м, малый радиус  $a = 0.23$  м, ток по плазме  $I_p < 180$  кА, тороидальное магнитное поле  $B_t < 1$  Тл) [3] после запуска инжектора атомов (мощность пучка  $W_{NB} < 0.6$  МВт, энергия атомов  $E_{NB} < 25$  кэВ) возникла задача исследования тепловых и надтепловых ионов. От корпускулярной диагностики требовалась регистрация спектров ионов в диапазоне от тепловых энергий ( $\approx 0.5$  кэВ) до энергий, несколько превышающих энергию инжекции ( $\approx 30$  кэВ). Использование имеющегося на установке анализатора АКОРД-12 [4] для решения поставленной задачи было не совсем удобным. Этот прибор обладал недостаточным числом каналов (6 каналов на один изотоп водорода) и относительно малым динамическим диапазо-



**Рис. 1.** Схема компактного анализатора CNPA-07. 1 – обдирочный модуль, 2 – углеродная обдирочная пленка толщиной 50 Å, 3 – система анализирующего магнита, 4 – электростатический дефлектор, 5 – детекторный модуль; диафрагмы:  $O_1$  – Ø3.7 мм,  $O_2$  и  $O_3$  – Ø5 мм; I – входной фланец CNPA, II – фланец ускорительного модуля, III – фланец прямого канала, IV – фланец дополнительной откачки, V – фланец высоковольтных вводов для анализирующего электростатического дефлектора и блока детекторов, VI–IX – фланцы сигнальных разъемов;  $A^0$  – входящие в анализатор атомы,  $A^+$  – вторичные ионы.

ном по энергии (отношение максимальной и минимальной энергий частиц, регистрируемых одновременно, составляло ~7). Все это приводило к тому, что для регистрации спектра ионов в требуемом диапазоне энергий было необходимо заметное число идентичных плазменных разрядов (около 5).

Решить данную проблему можно было двумя способами. Первый из них состоял в модернизации детекторного модуля имеющегося анализатора, с тем чтобы увеличить число энергетических каналов. Однако это полностью не решило бы указанную проблему, так как динамический диапазон модернизированного таким образом прибора остался бы практически неизменным. Второй способ решения проблемы заключался в создании нового прибора, обладающего достаточно большим числом каналов и широким энергетическим диапазоном. Этот путь и был выбран авторами статьи.

Для выполнения поставленной задачи было решено использовать уже опробованный на других плазменных установках так называемый “компактный анализатор” [5]. Этот прибор был модифицирован для исследования поведения

ионов в условиях нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М, что позволяло получать подробный спектр за один плазменный разряд в энергетическом диапазоне от тепловых энергий до энергии инжекции.

### КОМПАКТНЫЙ АНАЛИЗАТОР CNPA-07

Принцип работы компактных анализаторов потоков атомов CNPA (Compact Neutral Particle Analyzer) основан на ионизации входящего потока атомов и последующем анализе вторичных ионов по массе и энергии в параллельных электрическом и магнитном полях. Схема прибора приведена на рис. 1.

Поток атомов  $A^0$  поступает в прибор через входную диафрагму  $O_1$ . Ионизация происходит в тонкой алмазоподобной углеродной пленке 2 толщиной 50 Å, которая находится в ускорительном модуле I. Доускорение необходимо, чтобы уменьшить разброс вторичных ионов по углу после прохождения обдирочной мишени и тем самым увеличить эффективность регистрации прибора.

Образовавшиеся ионы  $A^+$  отклоняются магнитом 3 в плоскости рисунка по углам в зависимости от импульса ионов, а конденсатором 4 – в перпендикулярной плоскости в зависимости от их массы. Регистрация ионов осуществляется с использованием набора детекторов 5. В данных анализаторах в качестве детекторов используются каналные электронные умножители. Подробное описание устройства, принципов действия и характеристик анализаторов CNPA содержится в [5].

Для решения задачи, поставленной на токамаке ТУМАН-3М, была изготовлена модифицированная версия анализатора, получившая наименование CNPA-07. Модификация не затронула основные узлы прибора, принцип его работы остался также прежним. Схема анализатора полностью соответствует приведенной на рис. 1. Изменения конструкции затронули в основном детекторный модуль.

#### Детекторный модуль

Детекторный модуль анализаторов атомов представляет собой набор детекторных линеек. Каждая линейка регистрирует потоки изотопов водорода определенной массы. В первых компактных анализаторах [5] использовались две детекторные линейки (по 13–14 детекторов в каждой) для одновременного измерения потоков водорода и дейтерия соответствующим числом энергетических каналов. Одновременное измерение потоков атомов различной массы важно при решении задач, связанных с определением изотопного состава плазмы. Подобные задачи возни-

кают, например, в экспериментах по высокочастотному нагреву плазмы.

В экспериментах по нейтральной инжекции, как правило, не возникает необходимости определять изотопный состав плазмы в каждом разряде, и поэтому отсутствует потребность иметь в анализаторе две линейки. Следует отметить, что и сами детекторы, и регистрирующая электроника, которой снабжен каждый детектор, являются дорогостоящими изделиями, что не позволяет без особой необходимости иметь в приборе большое количество энергетических каналов.

При нейтральной инжекции интерес представляет получение подробного энергетического спектра изотопа определенной массы (как правило, той массы, атомы которой инжектируются в плазму). По этим причинам при разработке CNPA-07 было решено отказаться от двух линеек детекторов и при этом установить большее число каналов в одну линейку, с тем чтобы увеличить количество измеряемых точек на энергетическом спектре.

В итоге детекторный модуль CNPA-07 имеет 20 каналов, расположенных в одной линейке (рис. 2). Поперечный размер детекторов первых пяти каналов составляет 3 мм, с 6-го по 12-й канал – 5 мм, с 13-го по 20-й – 10 мм. Узкие детекторы были установлены в первые каналы для того, чтобы по возможности снизить их энергетическую ширину и уместить как можно больше каналов в тепловом диапазоне энергий (0.6–3 кэВ).

Следует отметить, что отсутствие второй линейки детекторов не исключает возможности регистрации прибором различных изотопов водорода. Массу изотопа водорода, попадающего в детекторную линейку, определяет напряжение на отклоняющем конденсаторе. Изменяя это напряжение от разряда к разряду, можно получать спектры как водорода, так и дейтерия.

#### *Диспергирующая система*

Диспергирующая система прибора состоит из магнита и конденсатора. В анализаторах CNPA используется постоянное магнитное поле, которое создается двумя редкоземельными магнитами, помещенными в ярмо магнитопровода. Напряженность поля в зазоре ярма определяет энергетический диапазон прибора и задается толщиной постоянных магнитов и немагнитных прокладок, устанавливаемых между элементами магнитопровода. В данном приборе магнитное поле в зазоре ярма составляет около 0.7 Тл. Такое поле обеспечивает регистрацию прибором потоков дейтерия с энергиями до  $\approx 31$  кэВ и водорода с энергиями до  $\approx 62$  кэВ.

Важным фактом для задачи регистрации быстрых частиц является то, что при использовании постоянного магнитного поля ион определенной энергии всегда попадает в определенный канал

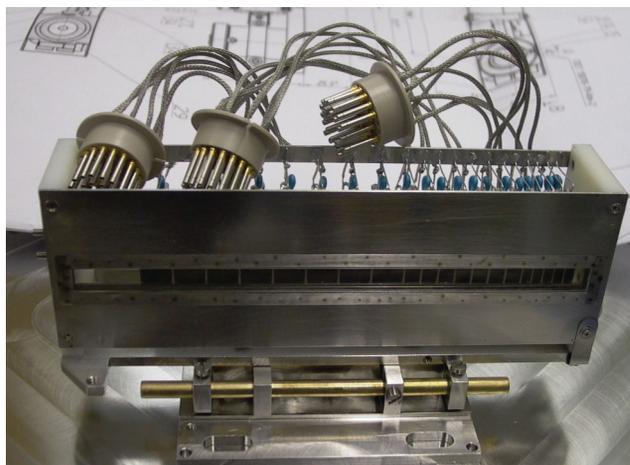


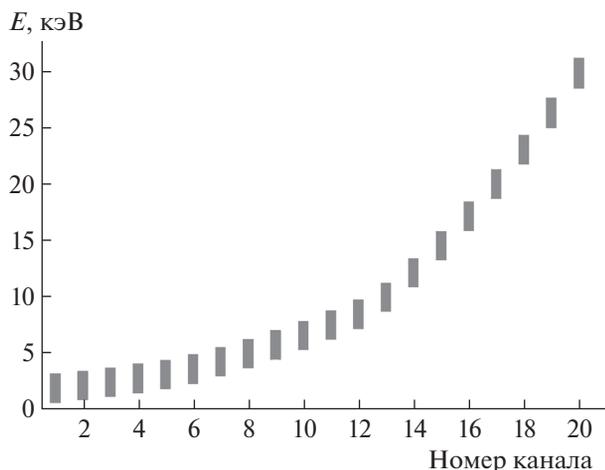
Рис. 2. Детекторный модуль анализатора CNPA-07.

анализатора, т.е. перестройка энергий каналов прибора за счет изменения магнитного поля, как это делается в других анализаторах атомов, невозможно. При этом энергетическое распределение быстрых частиц, которое требуется измерять, может иметь достаточно сложную форму [6]. В этих условиях вероятна ситуация, когда какая-либо важная особенность спектра будет находиться в области энергий, расположенной в промежутке между соседними каналами. Поэтому в анализаторе CNPA-07 была опробована другая возможность перестройки энергии каналов – за счет изменения ускоряющего напряжения на ускорительном модуле.

Принцип перестройки энергий каналов следующий. Пусть в рассматриваемый канал анализатора попадают ионы, имеющие энергию  $E^+$  (энергия  $E^+$  фиксированна для определенного канала). Эти ионы образуются при ионизации атомов, поступающих в анализатор, в потенциале  $U_{acc}$  ускоряющего модуля. Ускорение приводит к тому, что энергия ионов связана с энергией атомов  $E^0$  как  $E^+ = E^0 + eU_{acc}$ . Изменение ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  приводит к изменению добавки  $eU_{acc}$  к энергии атома. При фиксированной энергии канала  $E^+$  это означает, что энергия поступающего в анализатор атома  $E^0$ , который будет зарегистрирован как ион рассматриваемым каналом, зависит от  $U_{acc}$  как  $E^0 = E^+ - eU_{acc}$ . Таким образом, изменяя напряжение на ускорительном модуле, можно перестраивать энергии каналов анализатора, т.е. энергии тех первичных атомов, которые будут зарегистрированы прибором.

#### *Калибровочные данные*

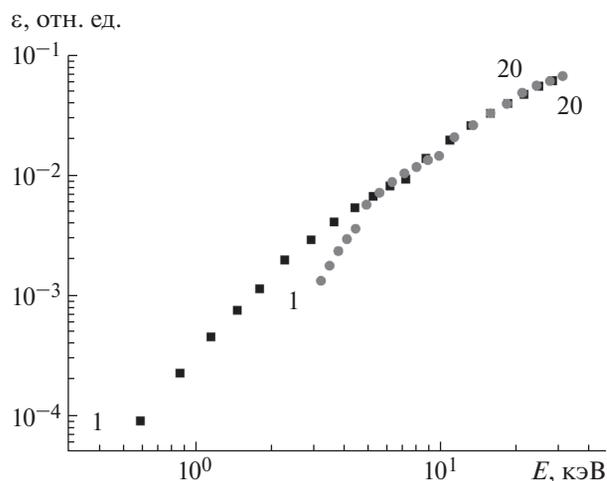
Для определения основных характеристик (распределение каналов по энергии, эффектив-



**Рис. 3.** Калибровочные данные. Распределение каналов анализатора CNPA-07 по энергии при регистрации атомов дейтерия.

ность регистрации, энергетические ширины каналов) прибор был откалиброван на атомарном пучке. Процесс калибровки подробно описан в [7]. Данная операция была проведена на водородном и дейтериевом атомарных пучках (далее будут представлены преимущественно результаты с дейтерием). Для каждого изотопа прибор калибровался при двух значениях ускоряющего напряжения  $U_{acc}$ . Первое значение  $U_{acc}$  подбиралось таким образом, чтобы энергия атомов, регистрируемых первым каналом, составляла 0.6 кэВ (тепловой диапазон энергий). Для дейтерия значение  $U_{acc}$  составило 2.454 кВ, для водорода – 5.445 кВ. Второе значение  $U_{acc}$ , при котором калибровался прибор, выбиралось равным нулю. Полученное при калибровке распределение каналов по энергии в случае регистрации атомов дейтерия показано на рис. 3. На графике для каждого канала представлен диапазон энергий. Нижний предел соответствует настройке прибора при  $U_{acc} = 2.454$  кВ, верхний – при  $U_{acc} = 0$  кВ. Варьируя  $U_{acc}$  между этими двумя значениями, можно настроить детекторный канал на требуемую энергию из полученного диапазона.

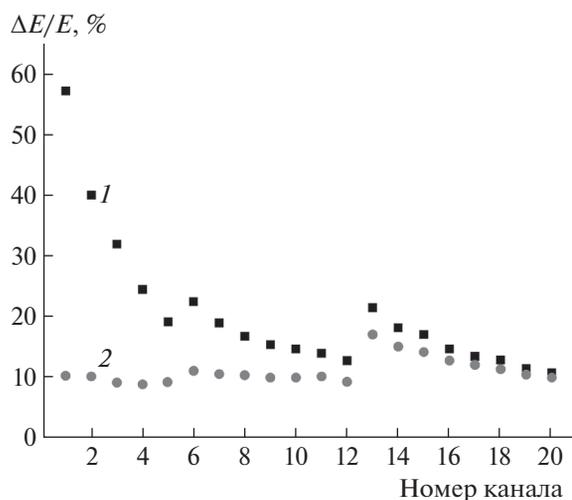
Также при калибровке для каждого изотопа и каждого значения  $U_{acc}$  были получены эффективность прибора (рис. 4) и энергетическая ширина каналов (рис. 5). В эксперименте значения эффективности и ширины канала для промежуточных значений  $U_{acc}$  могут быть получены интерполяцией калибровочных данных (в первом приближении использовалась линейная интерполяция).



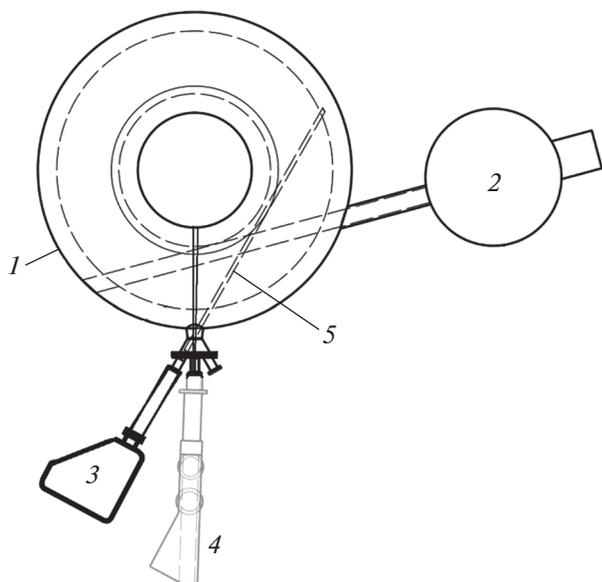
**Рис. 4.** Калибровочные данные. Эффективность регистрации  $\epsilon$  атомов дейтерия анализатором CNPA-07. Черные точки –  $U_{acc} = 2.454$  кВ, серые точки –  $U_{acc} = 0$  кВ. Цифры рядом с точками – номера каналов.

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

После калибровки анализатор CNPA-07 был установлен на токамак ТУМАН-3М. Схема расположения оборудования приведена на рис. 6. Линия видимости анализатора проходила тангенциально по отношению к плазменному витку. Прицельный параметр примерно соответствовал прицельному параметру центрального луча инжекционного пучка. Такое направление было выбрано, чтобы анализатор мог регистрировать



**Рис. 5.** Калибровочные данные. Энергетическая ширина каналов анализатора CNPA-07 при регистрации атомов дейтерия. 1 –  $U_{acc} = 2.454$  кВ, 2 –  $U_{acc} = 0$  кВ.



**Рис. 6.** Токамак ТУМАН-3М (вид сверху). 1 – камера токамака, 2 – инжектор атомов, 3 – анализатор CNPA-07, 4 – анализатор АКОРД-12, 5 – линия видимости анализатора CNPA-07.

быстрые частицы, появляющиеся во время включения нейтральной инжекции.

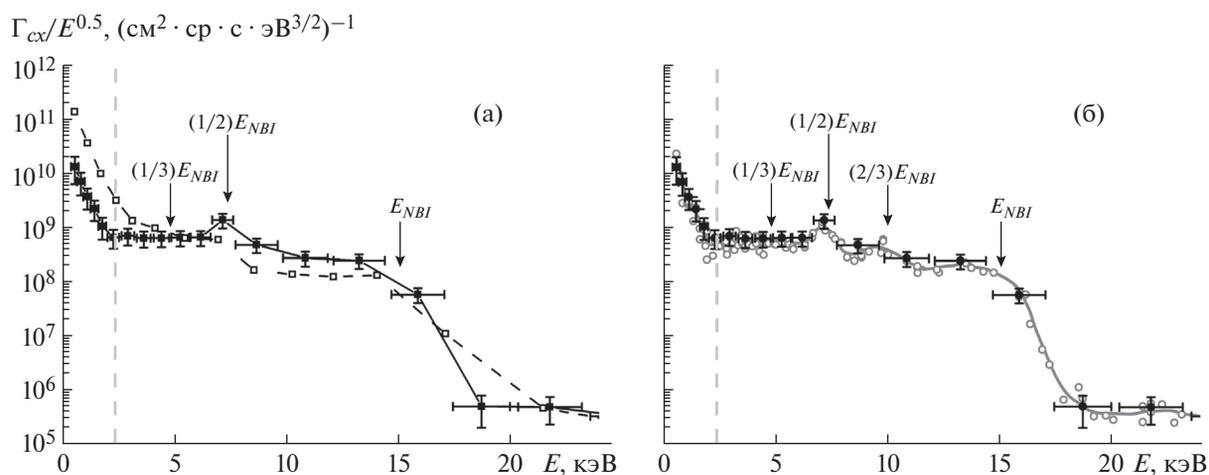
В экспериментах по нагреву плазмы методом нейтральной инжекции при помощи анализатора CNPA-07 были проведены измерения потоков атомов надтепловых энергий. Значения основных параметров плазменного разряда были следующие:  $B_t \approx 0.7$  Тл,  $I_p \approx 150$  кА, средняя концентрация элек-

тронов  $\langle n_e \rangle \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . В первых экспериментах в водородную плазму инжектировался дейтериевый пучок с начальной мощностью  $W_{NBI} = 250$  кВт при энергии атомов  $E_{NBI} = 16$  кэВ. Следует отметить, что за время импульса инжектора ( $\approx 20$  мс)  $W_{NBI}$  и  $E_{NBI}$  снижаются примерно на 20 и 10% соответственно.

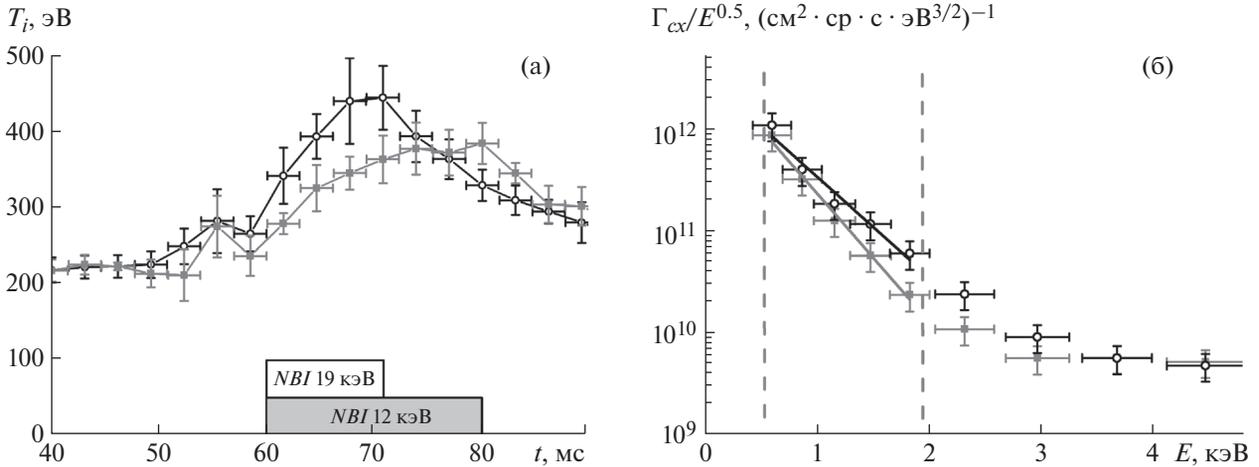
Спектры атомов, зарегистрированные в плазменных разрядах #17041007 (дейтериевый спектр) и #17041005 (водородный спектр) на 75 мс, представлены на рис. 7а. Как видно из рисунка, анализатор позволяет получить за один плазменный разряд достаточно подробный энергетический спектр как в тепловой, так и в надтепловой области энергий.

Несмотря на то что инжектировался дейтериевый пучок, в эксперименте было обнаружено наличие в плазме надтеплого водорода с энергетическим спектром, характерным для спектра инжектированных частиц. Это свидетельствовало о существенной доле водорода ( $\approx 30\%$ ) в инжекционном пучке. По всей видимости, водород эффективно проникал в инжектор из камеры токамака и подмешивался к рабочему газу (дейтерию) источника ионов.

Для исследования особенностей дейтериевого спектра в серии разрядов ##17041006–17041012 была проведена перестройка энергий каналов анализатора за счет изменения  $U_{acc}$ . Набор значений  $U_{acc} = 0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.454$  кВ позволил получить более детальный спектр (рис. 7б). Спектр был зарегистрирован настолько подробно, что нам удалось обнаружить в нем, помимо известных трех энергетических компонент ( $E_{NBI} \approx 15$  кэВ,  $(1/2)E_{NBI}$ ,  $(1/3)E_{NBI}$ ), ча-



**Рис. 7.** Спектры атомов перезарядки, зарегистрированные во время инжекции при помощи анализатора CNPA-07: а – дейтериевый спектр в разряде #17041007 с  $U_{acc} = 2.454$  (сплошная кривая), водородный спектр в разряде #17041005 с  $U_{acc} = 5.445$  кВ (штриховая кривая); б – дейтериевый спектр в единичном разряде # 17041007 (темные точки), дейтериевый спектр в серии идентичных разрядов ## 17041006-12 с  $U_{acc} = 2.454, 0, 1.2, 1.5, 2.0$  кВ (светлые точки). Вертикальная штриховая линия – условное деление спектра на тепловую (слева) и надтепловую (справа) области.



**Рис. 8.** а – зависимость температуры ионов от времени; б – спектры атомов перезарядки на 68 мс разряда (вертикальные штриховые линии ограничивают диапазон энергий для определения температуры). Черный цвет – инжекция мощностью 400 кВт с энергией 19 кэВ, серый – инжекция мощностью 170 кВт с энергией 12 кэВ.

стицы с энергией  $(2/3)E_{NBI}$ . Присутствие атомов дейтерия в пучке с этой энергией обусловлено распадом иона  $\text{HD}^+$  в нейтрализаторе инжектора. В условиях проникновения водорода в инжектор наличие таких частиц предполагалось, но до экспериментов с анализатором CNPA-07 в явном виде их обнаружено не было.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ионная температура определяется по тепловой части энергетического распределения ионов плазмы. Для измерения ионной температуры в методе корпускулярной диагностики используют диапазон энергий атомов перезарядки, лежащий в области от нескольких единиц до десятка ионных температур. В нашем случае для определения ионной температуры мы обычно используем диапазон  $(2-8)T_i$ . Для ионной температуры 0.3 кэВ (характерная величина для токамаков размера ТУМАН-3М) это соответствует диапазону 0.6–2.4 кэВ.

В первом приближении можно считать, что распределение атомов по энергии совпадает с распределением ионов, которое в свою очередь описывается распределением Максвелла. Функция Максвелла в используемых на графиках (рис. 7, рис. 8) координатах представляет собой прямую линию, наклон которой определяется температурой. В отличие от надтепловой распределения, распределение Максвелла (с типичными для токамака ТУМАН-3М температурами) резко спадает с энергией. На зарегистрированных энергетических спектрах (рис. 8) тепловая часть выделяется достаточно хорошо. Она ограничена сверху энергией около 2.5 кэВ, при которой количество

быстрых частиц становится сравнимым с количеством тепловых.

В тепловой диапазон попадают первые 5–6 каналов анализатора в случае регистрации дейтерия при  $U_{acc} = 2.454$  кВ и 3–4 канала в случае регистрации водорода при  $U_{acc} = 5.445$  кВ. Для определения ионной температуры энергетическое распределение, построенное по этим каналам, аппроксимируется прямой, и температура рассчитывается как величина, обратная наклону этой прямой.

Возможности диагностики по определению температуры с помощью анализатора CNPA-07 можно продемонстрировать на примере экспериментов по инжекции дейтериевого пучка различной мощности в дейтериевую плазму. Эти эксперименты были проведены на токамаке ТУМАН-3М, чтобы исследовать особенности передачи мощности нейтрального пучка плазме после модернизации патрубка инжектора.

В плазму инжектировался дейтериевый пучок при двух значениях мощности:  $W_{NBI} \approx 170$  кВт с энергией  $E_{NBI} \approx 12$  кэВ (разряд #18041915) и  $W_{NBI} \approx 400$  кВт с  $E_{NBI} \approx 19$  кэВ (разряд #18041717). Температура определялась по наклону энергетического распределения атомов, построенного по первым пяти каналам (диапазон энергий 0.6–1.83 кэВ). Зависимость температуры от времени представлена на рис. 8а. Спектры атомов перезарядки в момент времени 68 мс показаны на рис. 8б. Диапазон энергий, приведенный на рисунке, намеренно превышает тепловой, чтобы продемонстрировать выделение максвелловского спектра из всего распределения.

Видно, что при увеличении мощности инжекции возрастает максимальная ионная температура, а также увеличивается скорость ее роста. Та-

кое поведение ионной температуры свидетельствует об увеличении мощности, поглощаемой плазмой, при увеличении мощности нагревного пучка. Этот экспериментальный факт является новым результатом (до замены патрубка ионная температура практически не зависела от мощности инжекции [8]) и будет в дальнейшем проанализирован вместе с другими результатами экспериментов по увеличению мощности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализатор потоков атомов из серии анализаторов CNPA был модифицирован для решения задач исследования ионного компонента плазмы в условиях ее нагрева методом нейтральной инжекции. Анализатор CNPA-07 спроектирован, изготовлен, откалиброван на атомарном пучке и опробован в экспериментах на токамаке ТУМАН-3М. Эксперименты показали, что прибор позволяет за один разряд регистрировать спектр атомов перезарядки в диапазоне от 0.6 до 31 кэВ для дейтерия и от 0.6 до 62 кэВ для водорода с точностью, достаточной для изучения основных особенностей поведения тепловых и надтепловых частиц. Реализована и опробована в эксперименте возможность смещения каналов анализатора по энергии за счет изменения напряжения ускорительного модуля анализатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cheng E., Martin Peng Y.K., Cerbone R., Fogarty P., Galambos J.D., Mogahed E.A., Nelson B., Simnad M., Sviatoslavsky I., Tillack M.* // Fusion Engineering and Design. 1998. V. 38. P. 219.
2. *Chernyshev F.V., Afanasyev V.I., Gusev V.K., Ivanov A.E., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Patrov M.I., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu.* // Plasma Physics Reports. 2011. V. 37. № 7. P. 553. doi 10.1134/S1063780X11060201
3. *Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Голант В.Е., Гусев В.К., Лебедев С.В., Леонов В.М., Минаев В.Б., Полевой А.Р., Тилинин Г.Н., Тукачинский А.С.* Препринт ФТИ № 1763. СПб., 2003.
4. *Извозчиков А.Б., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шустов И.В.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 157.
5. *Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Деч А.В., Кисляков А.И., Козловский С.С., Миронов М.И., Петров М.П., Петров С.Я., Kick M., Kreter A.* // ПТЭ. 2004. № 2. С. 87.
6. *Мельник А.Д., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Гончаров П.Р., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 8. С. 651. doi 10.7868/S036729211708008X
7. *Afrosimov V.V., Gladkovskii I.P., Gordeev Yu.S., Kalinkevich I.F., Fedorenko N.V.* // Sov. Phys. Tech. Phys. 1961. V. 5. P. 1378.
8. *Мельник А.Д., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А. Гончаров П.Р., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Миронов М.И., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В.* // В сб. "XLIII Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС". Звенигород, 2016. С. М-28.