

УДК 533.9.07, 533.9.08

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСТАНОВКЕ ТРТ

© 2024 г. В. И. Афанасьев<sup>a</sup>, А. Д. Мельник<sup>a</sup>, М. И. Миронов<sup>a,\*</sup>, А. С. Наволоцкий<sup>a</sup>, В. Г. Несеневич<sup>a</sup>, М. П. Петров<sup>a</sup>, С. Я. Петров<sup>a</sup>, Ф. В. Чернышев<sup>a</sup>, Р. Ю. Шмитов<sup>a</sup>

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

\* *maxim@npd.ioffe.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После доработки 26.02.2024 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.

Рассмотрены возможности применения активной корпускулярной диагностики для измерения локальных значений ионной температуры и изотопного соотношения дейтерий-тритиевой плазмы на токамаке с реакторными технологиями. Представлены варианты размещения анализатора атомов относительно диагностического инжектора. Проведено моделирование потоков атомов дейтерия и трития из плазмы для широкого диапазона значений плотности и температуры плазмы. Показано, что активная корпускулярная диагностика позволит измерять указанные параметры плазмы с пространственным разрешением  $\sim 14$  см и временным разрешением  $\sim 0.01$ – $0.1$  с.

*Ключевые слова:* диагностика по потокам атомов, анализатор атомов перезарядки, инжекция нейтральных пучков, ТРТ

**DOI:** 10.31857/S0367292124040104, **EDN:** QCXXZH

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется активная разработка российского токамака с реакторными технологиями (ТРТ), ключевыми особенностями которого являются сильное магнитное поле, использование инновационной жидкометаллической первой стенки и дивертора, а также применение передовых систем дополнительного нагрева плазмы [1]. Управление столь сложной установкой невозможно без наличия полноценного набора диагностических систем, позволяющих проводить измерения необходимых физических параметров. Важную роль при этом будут выполнять диагностики, занимающиеся изучением ионного компонента плазмы, в том числе диагностика по потокам атомов (корпускулярная диагностика), концептуальный проект которой в пассивном варианте был проанализирован для ТРТ ранее [2]. В целях расширения диапазона решаемых диагностикой задач, в данной работе рассматривается возможность применения на ТРТ активной корпускулярной диагностики (АКД), т.е. с использованием диагностического пучка нейтральных атомов, когда в плазме создается компактная нейтронизирующая мишень, которая позволяет проводить локальные измерения плазменных параметров.

В данной работе рассмотрены различные варианты расположения анализатора нейтральных атомов

относительно диагностического инжектора. С помощью программного кода [3] проведено численное моделирование проникновения диагностического пучка в плазму ТРТ, сделан анализ процессов нейтрализации ионов плазмы, получены оценки потоков атомов дейтерия и трития и соответствующих скоростей счета в детекторных каналах анализатора в тепловом и надтепловом диапазонах энергий. Сделана оценка пространственного и временного разрешения при проведении локальных измерений.

### 2. РАЗМЕЩЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА ТРТ

При поиске оптимального взаимного размещения диагностического инжектора и анализирующей аппаратуры необходимо учитывать многие факторы, в частности эффективность проникновения атомов пучка в плазму, размер зоны пересечения инжектируемого пучка и области плазмы, которую “видит” анализатор, ослабление потока вылетающих атомов, а также техническую осуществимость.

В частности, анализ конструктивных особенностей пространства для размещения оборудования на ТРТ показал, что расположение диагностического инжектора атомов на вертикальных патрубках установки является трудноосуществимым. Поэтому при

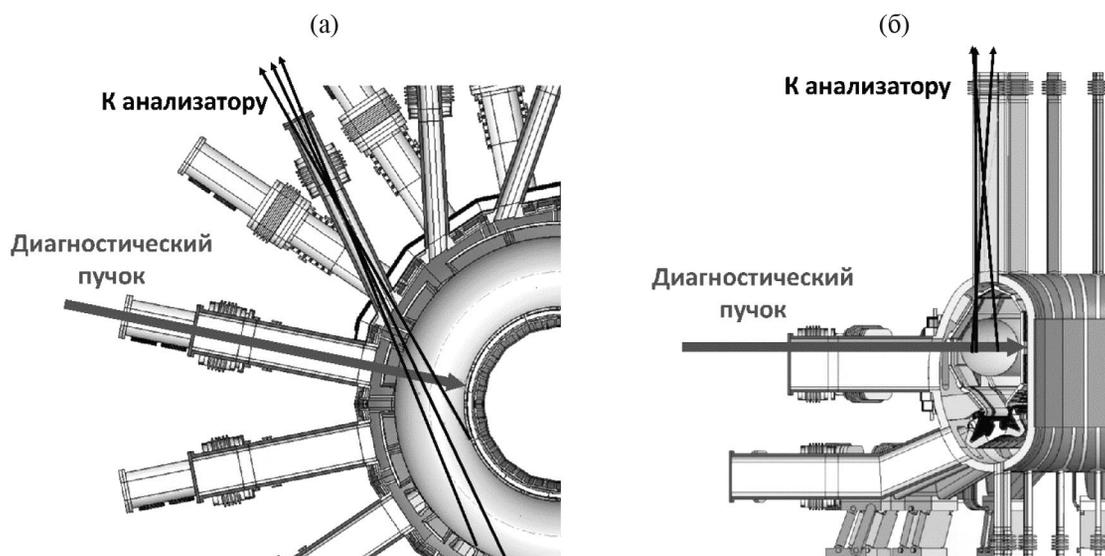


Рис. 1. Варианты взаимного расположения линии наблюдения анализатора атомов перезарядки и линии инжекции диагностического пучка на установке ТРТ: в экваториальной плоскости (а); в вертикальной плоскости (б).

дальнейшей оптимизации геометрии эксперимента было принято, что диагностический инжектор, как и в первоначальном проекте ТРТ, расположен на экваториальном патрубке установки и пучок атомов инжектируется в плазму в экваториальном направлении. В этом случае анализатор атомов можно установить либо на соседний тангенциальный патрубок, либо на вертикальный патрубок, находящийся в том же сечении установки. Оба варианта показаны на рис. 1. В обоих вариантах линии инжекции пучка и наблюдения анализатора пересекаются в центральной зоне плазмы. Угол их пересечения при наблюдении из тангенциального патрубка составляет  $\sim 54^\circ$ . Внутренние размеры патрубков, через которые осуществляется наблюдение, позволяют организовать сканирование плазмы по радиусу. При тангенциальном наблюдении измерения можно производить для  $r/a$  от  $-0.25$  до  $0.65$ , где  $a$  — малый радиус плазмы. Отрицательные значения  $r/a$  относятся к наблюдению во внутренней области плазмы. Для вертикальной схемы этот диапазон составляет от  $-0.4$  до  $0.76r/a$ . Следует отметить, что тангенциальное наблюдение предпочтительнее проводить в направлении инжекции нагревных пучков, для того чтобы избежать сильного искажения спектра тепловых ионов плазмы из-за появления в нем тормозящихся ионов пучка.

### 3. ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА

При проведении расчетов, представленных в данной работе, использовался базовый DT-сценарий установки ТРТ со следующими параметрами: средняя плотность плазмы  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , изотопный

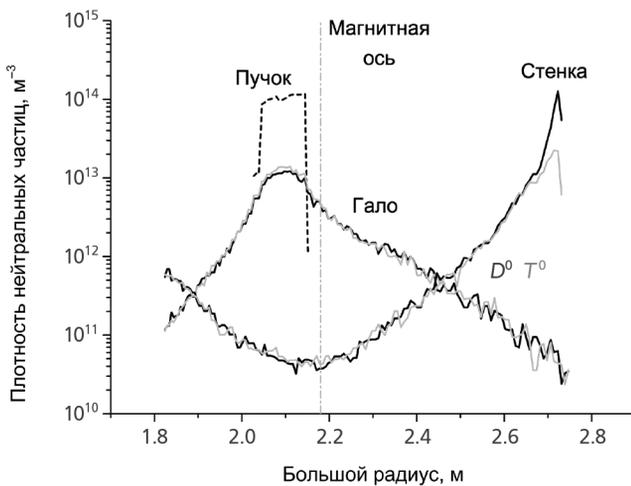
состав  $n_D/n_T = 1$ , температура электронов и ионов в центре плазмы  $T_e(0) = 20 \text{ кэВ}$  и  $T_i(0) = 23 \text{ кэВ}$  соответственно, большой радиус плазмы  $R = 2.15 \text{ м}$ , малый радиус  $a = 0.57 \text{ м}$ , вытянутость плазмы  $k = 1.8$ , нейтральная инжекция — три дейтериевых пучка с энергией  $0.5 \text{ МэВ}$  и полной мощностью  $25 \text{ МВт}$  [4]. Для оценки возможностей диагностического метода были также проанализированы два сценария, когда плазма имеет уменьшенные по сравнению с базовым сценарием параметры плазмы, и соответственно меньший выход термоядерной энергии. В первом варианте температура ионов и электронов была искусственно снижена до  $5 \text{ кэВ}$ . Во втором — в дополнение к уменьшенной температуре, плотность плазмы была снижена до значения  $\langle n_e \rangle = 0.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Размеры, форма и прочие параметры плазмы были оставлены теми же, что и в базовом сценарии.

Для диагностического пучка использовались следующие параметры: тип частиц — атомы водорода, энергия инжекции —  $60 \text{ кэВ}$ , эквивалентный ток пучка —  $4.5 \text{ А}$ , токовое соотношение энергетических ( $E_0; E_0/2; E_0/3$ ) фракций пучка  $0.85:0.1:0.05$ , диаметр пучка в центре плазмы —  $13 \text{ см}$  [5].

### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА АТОМОВ И СКОРОСТЕЙ СЧЕТА В АНАЛИЗАТОРЕ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ

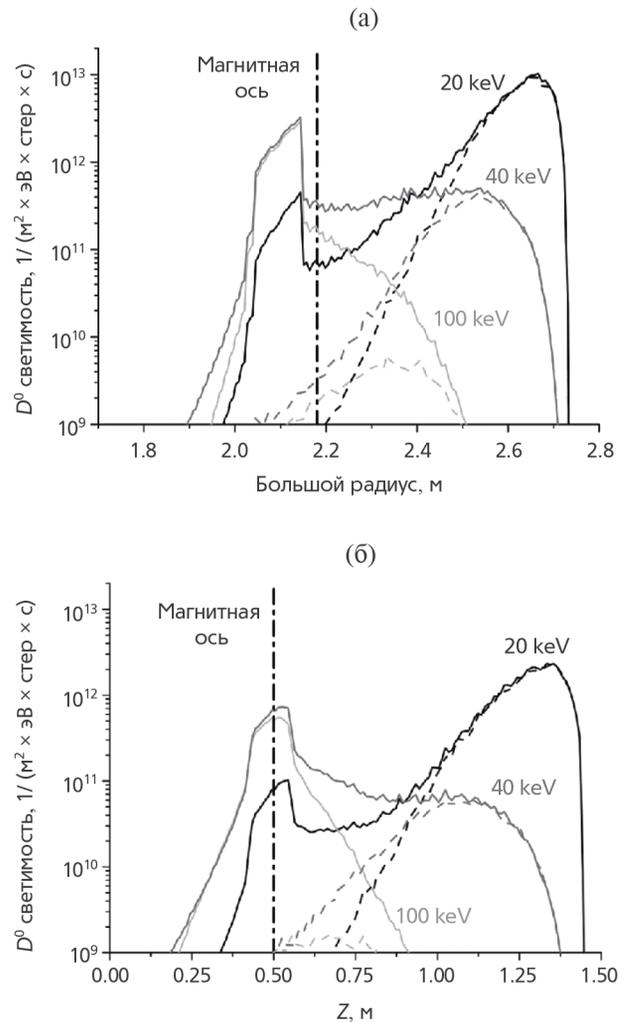
Моделирование процессов нейтрализации ионов и расчеты потоков выходящих атомов проводились с помощью плазмозического кода DOUBLE-MC [3]. На первом этапе моделирования был сделан расчет пространственного распределения атомов-

доноров, на которых может происходить нейтрализация ионов плазмы. В качестве примера, на рис. 2 приведено распределение атомов-доноров вдоль центральной линии наблюдения анализатора для случая тангенциальной схемы наблюдения, где указаны основные составляющие, дающие вклад в нейтрализацию ионов тепловых энергий (до 200 кэВ). В первую очередь это атомы, проникающие в плазму из пристеночной области. Они характеризуются высокой плотностью на краю плазмы и быстрым «прогоранием» к ее центру. Также, при инжекции, в плазме будут присутствовать атомы самого пучка. Кроме того, пучок будет генерировать вокруг себя так называемое гало. Это вторичные атомы, образовавшиеся в результате перезарядки ионов плазмы на атомах пучка. Из результатов, представленных на рис. 2, видно, что в центральной зоне плотность атомов самого пучка и его гало (активный сигнал) на порядки выше «естественной» плотности атомов, проникающих в плазму со стенки установки (пассивный сигнал). Поэтому можно предположить, что перезарядка на дополнительных атомах-донорах от пучка и его гало, должны дать заметный вклад в поток атомов из центральной зоны плазмы. При этом следует учитывать, что хотя плотность гало на порядок ниже плотности пучка, нейтрализация ионов на нем может быть сопоставима с нейтрализацией на атомах самого пучка благодаря большей величине сечения перезарядки в области тепловых энергий.



**Рис. 2.** Пространственное распределение атомов-доноров вдоль центральной линии наблюдения анализатора для случая тангенциальной схемы наблюдения. Пучок — плотность атомов диагностического пучка; Гало — плотность атомов, вторично образованных на пучке; Стенка — плотность атомов, поступающих со стенки. Пунктирной линией обозначено положение магнитной оси плазмы.

Для анализа относительного вклада перечисленных выше процессов в нейтрализацию ионов были рассчитаны функции светимости вылетающих из плазмы атомов. Функция светимости отражает вероятность вылета из плазмы атомов вдоль линии наблюдения анализатора. Для атомов определенной энергии она является произведением локальных значений плотности исходных ионов на скорость их нейтрализации и на коэффициент ослабления атомов при вылете из плазмы. Результаты расчета представлены на рис. 3 для обеих схем наблюдения и для различных энергий вылетающих атомов. Здесь и далее для каждой схемы в пределах доступной области сканирования выбрана хорда с минимальным ожидаемым уровнем сигнала. Для тангенциальной



**Рис. 3.** Пространственные профили функций светимости вылетающих из плазмы атомов вдоль центральной линии наблюдения анализатора: тангенциальная схема наблюдения (а); вертикальная схема наблюдения (б). Штриховыми линиями обозначены профили при отсутствии пучка.

схемы это хорда, «смотрящая» на радиус  $-0.25r/a$ , для вертикальной — на  $-0.4r/a$ .

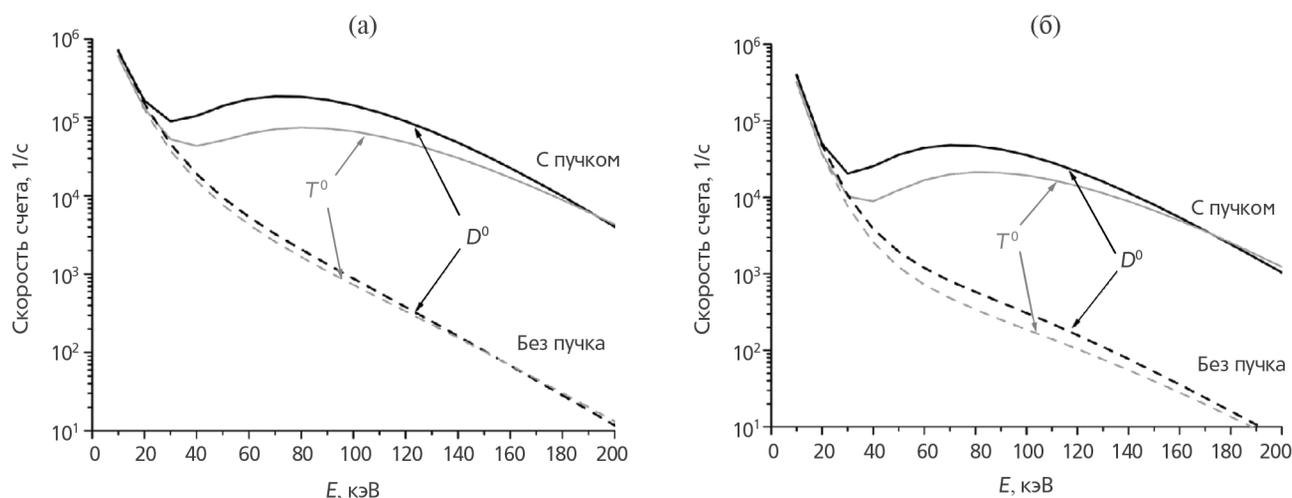
Из представленных на рисунке данных видно, что пространственный профиль функции светимости меняется с изменением энергии вылетающих атомов. Для небольших энергий  $\sim 20$  кэВ относительный вклад пучка в формирование потока нейтрализованных ионов плазмы незначителен. Это связано с двумя факторами. Во-первых, частицы таких энергий сильнее поглощаются при вылете из центральных областей плазмы, где происходит нейтрализация на пучке. Во-вторых, из-за достаточно высокой ионной температуры, на краю плазмы присутствует значительное количество тепловых ионов, перезарядка которых на атомах-донорах, поступающих со стенки, маскирует активный сигнал из центра. С ростом энергии влияние указанных факторов снижается и для энергий выше 40 кэВ перезарядка на пучке становится определяющей. Для обеих схем наблюдения, начиная с этой энергии, источник частиц достаточно хорошо локализован, позволяя проводить локальные измерения с пространственным разрешением  $\sim 14$  см.

Для оценки временного разрешения АКД был проведен расчет скоростей счета атомов дейтерия и трития. Расчет проводился для анализатора атомов, имеющего следующие характеристики: эффективность регистрации — 30%, энергетическая ширина детекторного канала — 5%, телесный угол сбора —  $3 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>·стер. Для обеих схем наблюдения, на рис. 4 приведены результаты, полученные для «теплого» (до  $\sim 10T_i^{\max}$ ) энергетического диапазона, который обычно используется при измерении ионной температуры методом корпускулярной диагностики.

Сплошными линиями на рисунке обозначены скорости счета при инжекции пучка (активный сигнал),

штриховыми линиями — при отсутствии пучка (пассивный сигнал). Как и ожидалось из анализа функций светимости, начиная с энергии 40 кэВ, активный сигнал оказывается значительно выше пассивного. Это позволяет легко отделить активную составляющую сигнала и упрощает последующий анализ данных. Следует отметить, что форма энергетической зависимости активного сигнала заметно отличается от квазимаксвелловской прямой линии, по наклону которой можно было бы напрямую судить о температуре ионов плазмы. Это происходит из-за существенного ослабления атомарных потоков при их выходе из центральной области плазмы. Частицы с большей энергией испытывают меньшее ослабление, поэтому, как видно из рис. 4, ближе к 200 кэВ энергетическая зависимость сигнала становится линейной. Чтобы использовать весь доступный энергетический диапазон для определения ионной температуры, а также изотопного соотношения плазмы, необходимо проводить численное моделирование активного сигнала. Это можно сделать, например, с помощью упомянутого выше кода DOUBLE-MS. В этом случае параметры плазмы определяются путем подгонки расчетного сигнала к измеренному, в результате варьирования ионной температуры и изотопного соотношения.

Таким образом, диапазон энергий от 40 до 200 кэВ, свободный от пассивного сигнала, может быть использован для локальных измерений ионной температуры и изотопного соотношения плазмы. При этом следует учитывать следующее обстоятельство. В работе [2] было показано, что инжекция дейтериевых нагревных пучков создает в плазме значительную популяцию быстрых ионов дейтерия, которая приводит к искажению теплового энергетического спектра ионов дейтерия при энергии выше 50 кэВ. Поэтому,



**Рис. 4.** Скорость счета атомов дейтерия и трития в детекторных каналах анализатора для базового сценария разряда ТРТ: тангенциальная схема наблюдения (а); вертикальная схема наблюдения (б).

прямое измерение температуры ионов дейтерия в таких условиях будет затруднительно. Тем не менее благодаря быстрому теплообмену, температуры ионов дейтерия и трития будут практически одинаковыми, и в большинстве случаев для определения ионной температуры плазмы будет достаточно ограничиться измерением ионной температуры трития, спектр атомов которого не искажается при инъекции в плазму атомов нагретых дейтериевых пучков.

Те же ограничения возникнут при определении изотопного соотношения плазмы. Измерение этого параметра будет ограничено диапазоном 40–50 кэВ, поскольку энергетический спектр атомов дейтерия выше энергии 50 кэВ будет искажен частицами нагретого пучка.

Для того чтобы оценить временное разрешение, которое могут обеспечить измерения с помощью метода АКД, использовался следующий подход. Предполагалось, что единственным источником ошибки измеряемого параметра является статистический разброс уровня сигнала в отдельном временном окне. Тогда, используя полученную скорость счета, можно определить минимальное временное окно необходимое для обеспечения требуемой точности измерений.

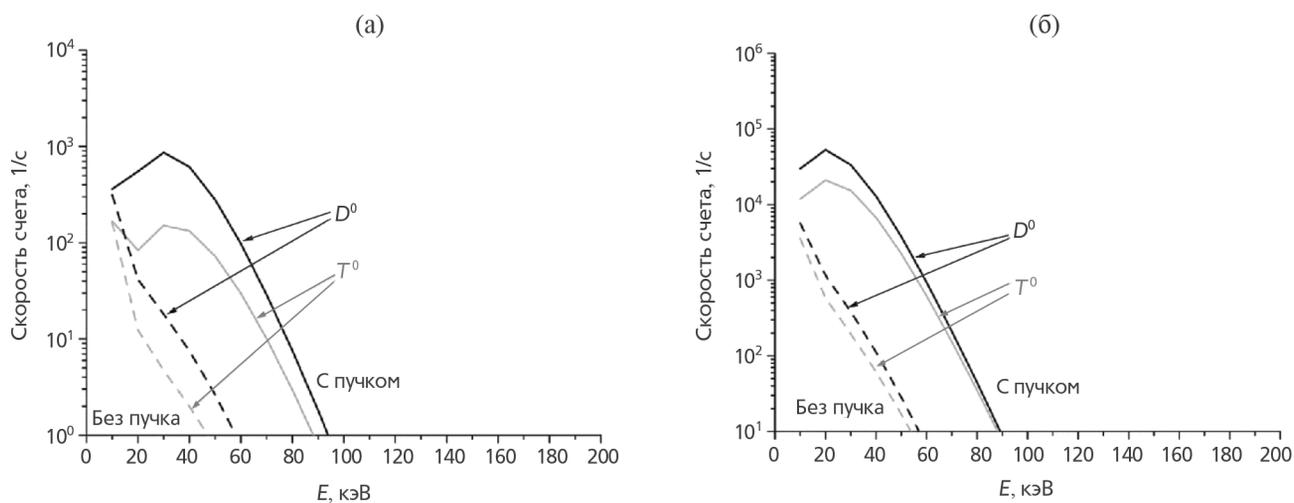
Временное разрешение оценивалось для вертикальной схемы, как случая с меньшим уровнем сигнала, и потому удобным для оценки минимальных возможностей АКД. Анализ показал, что при скорости счета  $\sim 10$  кГц и требуемой точности измерений 10%, временное разрешение АКД будет не хуже 0.01 с.

Для оценки возможностей АКД по измерению параметров плазмы в других режимах работы токамака ТРТ, базовый сценарий разряда был модифицирован. Сначала температура плазмы была понижена до 5 кэВ с сохранением высокой плотности частиц.

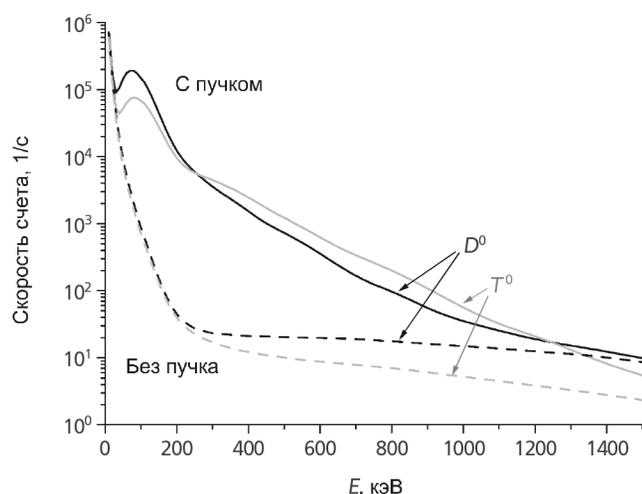
Затем, в дополнение к сниженной температуре, в два раза была понижена плотность плазмы. Результаты расчетов зависимости скоростей счета атомов от энергии для вертикальной схемы в этих двух сценариях представлены на рис. 5.

Анализ полученных данных показывает, что и в таких режимах плазмы АКД позволяет проводить измерения ионной температуры и изотопного соотношения плазмы при условии правильной коррекции границ энергетического диапазона, внутри которого будут проводиться измерения. При этом из-за уменьшения ионной температуры диапазон измерений смещается в сторону меньших энергий. Также с уменьшением температуры снижается интенсивность сигнала, что приводит к соответствующему снижению временного разрешения до уровня  $\sim 0.1$  с.

Отдельный интерес представляет возможность использования диагностического пучка для измерения потоков нейтрализованных knock-on ионов [6, 7]. Knock-on ионы появляются в результате лобовых столкновений тепловых ионов основной плазмы с термоядерными альфа-частицами, и могут только за одно столкновение приобрести энергию порядка 1 МэВ. Очевидно, что такие ионы рождаются в основном в центре плазмы, где максимальна плотность термоядерных альфа-частиц. Кроме того, если эти ионы в дальнейшем будут нейтрализованы, то высокая энергия позволит им покинуть плазму, не испытывая сильного ослабления. Таким образом, регистрация потоков нейтрализованных knock-on ионов дейтерия и трития позволяет получить информацию об изотопном составе в центре плазмы. В настоящее время на этом принципе основывается измерение изотопного соотношения плазмы в центре токамака-реактора ИТЭР [8, 9].



**Рис. 5.** Скорость счета атомов дейтерия и трития в детекторных каналах анализатора для вертикальной схемы наблюдения в разрядах ТРТ с уменьшенными параметрами:  $T_{e,i}(0) = 5$  кэВ,  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$  (а);  $T_{e,i}(0) = 5$  кэВ,  $\langle n_e \rangle = 0.5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$  (б).



**Рис. 6.** Скорость счета нейтрализованных кносок-он ионов в детекторных каналах анализатора для базового сценария разряда ТРТ. Схема наблюдения — тангенциальная.

На рис. 6 представлены результаты моделирования скоростей счета нейтрализованных кносок-он ионов дейтерия и трития в детекторных каналах анализатора для базового сценария разряда установки ТРТ. В данном случае, в качестве примера, была рассмотрена тангенциальная схема наблюдения. Видно, что в области энергий выше 0.5 МэВ, где нет влияния нагревных пучков на энергетический спектр регистрируемых атомов, уровень активного сигнала может достигать величины  $\sim 10^3$  Гц. Это обеспечит проведение измерений изотопного соотношения в центре плазмы ТРТ по потоку нейтрализованных кносок-он ионов с временным разрешением не хуже 0.1 с.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены варианты реализации активной корпускулярной диагностики на установке ТРТ. Учитывая существующие возможности по размещению аппаратуры, предложено две схемы наблюдения плазмы с помощью анализатора атомов перезарядки — тангенциальная и вертикальная.

С помощью численного моделирования получены пространственные распределения атомов-доноров, на которых происходит нейтрализация ионов плазмы, функции светимости вылетающих из плазмы атомов и скорости счета в детекторных каналах анализатора атомов при инъекции в плазму диагностического пучка. Показано, что для обеих схем наблюдения возможно проведение измерений локальных значений ионной температуры и изотопного соотношения плазмы с пространственным разрешением  $\sim 14$  см. При этом для базового режима

горения термоядерной плазмы и для режимов с пониженной температурой и плотностью обеспечивается временное разрешение 0.01 с и 0.1 с соответственно. Кроме того, перспективным является измерение с помощью диагностического пучка потоков нейтрализованных “кносок-он” ионов дейтерия и трития. Показано, что для базового сценария разряда ТРТ это позволит измерять изотопное соотношение в центре плазмы с временным разрешением  $\sim 0.1$  с.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № FFUG-2024-0028 и частичной финансовой поддержке за счет средств государственного контракта от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А. В., Коновалов С. В., Бондарчук Э. Н., Мазуль И. В., Родин И. Ю., Минеев А. Б., Кузьмин Е. Г., Кавин А. А., Карпов Д. А., Леонов В. М., Хайрутдинов Р. Р., Кукушкин А. С., Портнов Д. В., Иванов А. А., Бельченко Ю. И., Денисов Г. Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 970. DOI: 10.31857/S0367292121110196.
2. Афанасьев В. И., Гончаров П. Р., Мельник А. Д., Миронов М. И., Наволоцкий А. С., Несеневич В. Г., Петров М. П., Петров С. Я., Чернышев Ф. В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 675. DOI: 10.31857/S0367292122100031.
3. Миронов М. И., Чернышев Ф. В., Афанасьев В. И., Мельник А. Д., Наволоцкий А. С., Несеневич В. Г., Петров М. П., Петров С. Я. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 29. DOI: 10.31857/S0367292121010108.
4. Леонов В. М., Коновалов С. В., Жоголев В. Е., Кавин А. А., Красильников А. В., Куянов А. Ю., Лукаш В. Э., Минеев А. Б., Хайрутдинов Р. Р. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 986. DOI: 10.31857/S0367292121120040.
5. Давыденко В. И., Иванов А. А., Ступишин Н. В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 694. DOI: 10.31857/S0367292122100080.
6. Ryutov D. // Phys. Scr. 1992. V. 45 P. 153.
7. Ballabio L., Gorini G., Kallne J. // Phys. Rev. E. 1997. V. 55 P. 3358.
8. Afanasyev V. I., Chernyshev F. V., Kislyakov A. I., Kozlovski S. S., Lyublin B. V., Mironov M. I., Melnik A. D., Nesenevich V. G., Petrov M. P., Petrov S. Ya. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2010. V. 621. P. 456. DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.201.
9. Петров С. Я., Афанасьев В. И., Мельник А. Д., Миронов М. И., Наволоцкий А. С., Несеневич В. Г., Петров М. П., Чернышев Ф. В., Кедров И. В., Кузьмин Е. Г., Люблин Б. В., Козловский С. С., Мокеев А. Н. // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 1. С. 68. DOI: 10.21517/0202-3822-2016-1-67-80.

## Possibilities of Using Active Neutral Particle Diagnostics at the TRT Facility

V. I. Afanasyev<sup>a,\*</sup>, A. D. Melnik<sup>a</sup>, M. I. Mironov<sup>a</sup>, A. S. Navolotsky<sup>a</sup>, V. G. Nesenevich<sup>a</sup>,  
M. P. Petrov<sup>a</sup>, S. Ya. Petrov<sup>a</sup>, F. V. Chernyshev<sup>a</sup>, R. Yu. Shmitova

<sup>a</sup> *Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia*

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

The possibilities of using active neutral particle diagnostics for measuring local ion temperatures and isotopic ratio of deuterium-tritium plasma at the tokamak with reactor technologies are considered. Options for positioning the neutral particle analyzer relative to the diagnostic injector are presented. The fluxes of deuterium and tritium atoms escaping out of plasma were simulated in a wide range of plasma densities and temperatures. It is shown that the neutral particle analyzer active diagnostics will make it possible to measure the plasma parameters mentioned with the spatial and time resolutions of ~14 cm and ~0.01–0.1 s, respectively.

**Keywords:** diagnostics of atomic fluxes, neutral particle analyzer, neutral beam injection, TRT