

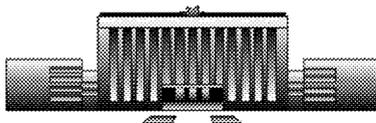


Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИЯФ СО РАН)

С.В. Полосаткин, В.В. Белых, А.Ф. Ровенских

**АНАЛИЗАТОР НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ  
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ST40**

ИЯФ 2025-01



НОВОСИБИРСК 2025

## **Анализатор нейтралов перезарядки для диагностики плазмы на токамаке ST40**

С.В. Полосаткин,<sup>a,b,c</sup> В.В. Белых<sup>a</sup>, А.Ф. Ровенских<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ИЯФ СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 11, Новосибирск

<sup>b</sup> НГТУ, пр. К. Маркса, 20, Новосибирск

<sup>c</sup> НГУ, ул. Пирогова, 1, Новосибирск

В работе представлено подробное описание анализатора нейтралов перезарядки (Neutral Particle Analyzer, NPA), разработанного и изготовленного для диагностики плазмы на сферическом токамаке ST40. Основной задачей диагностики на основе анализа нейтралов перезарядки на токамаке ST40 является измерение температуры основной массы ионов в диапазоне от 0,5 до 10 кэВ, а также измерение функции распределения быстрых ионов, возникающих в плазме вследствие инжекции нейтрального пучка, в диапазоне энергий до 40 кэВ. Отличительной особенностью анализатора является возможность разделения изотопов водорода (протия и дейтерия) и анализа функции распределения ионов выбранного изотопа.

E-mail: [S.V.Polosatkin@inp.nsk.su](mailto:S.V.Polosatkin@inp.nsk.su)

## Введение

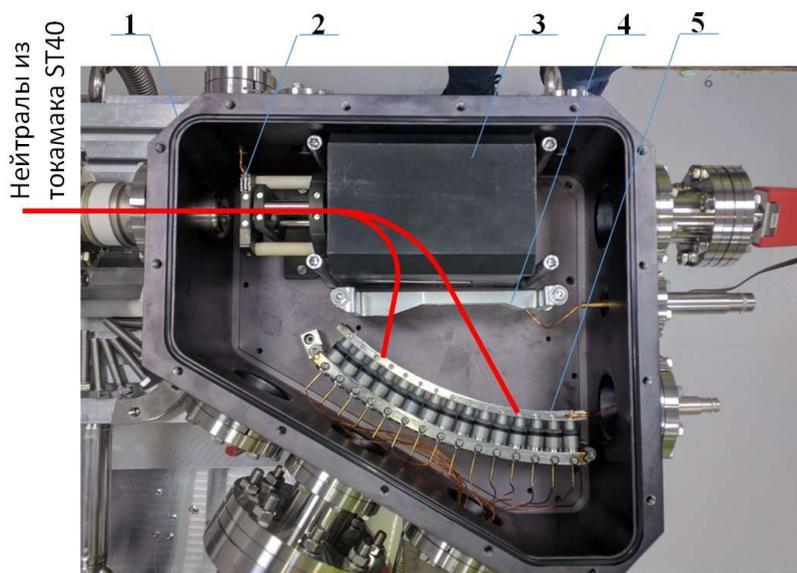
Анализ энергетического распределения нейтралов перезарядки является информативным средством для диагностики термоядерной плазмы. Как пассивные, так и активные (с использованием пучков быстрых атомов) методы диагностики нейтралов перезарядки широко используются на большинстве исследовательских установок с термоядерной плазмой. Для анализа функции распределения покидающих плазмы нейтралов разработаны различные типы анализаторов (NPA), использующих электрические или магнитные поля для разделения частиц [1-3].

В настоящей работе приводится подробное описание анализатора нейтралов перезарядки, разработанного и изготовленного для диагностики плазмы на сферическом токамаке ST40 [4]. Основной задачей диагностики на основе анализа нейтралов перезарядки на токамаке ST40 является измерение температуры основной массы ионов в диапазоне от 0,5 до 10 кэВ, а также измерение функции распределения быстрых ионов, возникающих в плазме вследствие инъекции нейтрального пучка, в диапазоне энергий до 40 кэВ. При проектировании анализатора нейтралов были поставлены следующие требования:

- Возможность измерения функции распределения энергии либо атомов водорода, либо атомов дейтерия, покидающих плазму.
- Легкая смена переключения между регистрацией водорода и дейтерия.
- Диапазон энергии: 0–40 кэВ для атомов водорода и 0–20 кэВ для атомов дейтерия.
- Энергетическое разрешение: 10%.
- Временное разрешение: 1 мс.
- Минимальная измеряемая температура: 500 эВ.
- Возможность последующей модернизации для увеличения диапазона энергии регистрируемых атомов водорода

## 1. Общая схема анализатора

Общая схема анализатора повторяет схемы анализаторов, ранее разработанных для установок MST и С-2 [5] (см. рис. 1). Нейтралы, покидающие плазму, ионизируются в тонкой углеродной фольге, ускоряются приложенным к фольге напряжением, после чего последовательно проходят через магнит-анализатор и электростатический дефлектор и регистрируются набором детекторов, смещенных по вертикали относительно центральной плоскости анализатора. Корпус анализатора, изготовленный из магнитной стали, обеспечивает экранирование внутреннего объема анализатора от рассеянного магнитного поля токамака. Анализатор оснащен ионным источником типа Байарда-Альперта для калибровки аппаратных функций каналов и проверки состояния фольги.



**Рисунок 1.** Конструкция анализатора; 1 – корпус, 2 – узел обдирочной фольги, 3 – магнит-анализатор, 4 – электростатические дефлекторные пластины, 5 – детекторный узел.

## 1.1 Узел обдирочной фольги

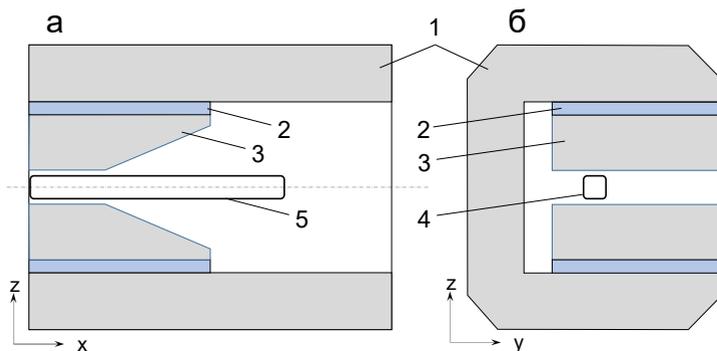
В анализаторе используется сверхтонкая (10 нм) твердая углеродная фольга для конверсии выходящих из плазмы нейтралов в ионы, которые затем могут быть разделены в магнитных и электрических полях. Использование твердой мишени вместо газовой снижает газовую нагрузку и упрощает конструкцию и эксплуатацию анализатора. В частности, подача положительного напряжения на фольгу позволяет регулировать диапазон регистрируемых энергий анализатора и согласовать дисперсию анализатора с геометрическими размерами детекторов. Недостатком этой схемы является повышенное рассеяние частиц в фольге (особенно значительное для низкоэнергетических нейтралов), что влияет на эффективность регистрации и энергетическое разрешение анализатора.

## 1.2 Магнит-анализатор и электростатический дефлектор

Конструкция магнита-анализатора показана на рис. 2. Магнитное поле создается двумя наборами постоянных NdFeB магнитов толщиной 4,5 мм (тип N38SH). Полюса магнита создают магнитное поле, спадающее вдоль оси  $x$ , совпадающей с направлением движения потока нейтралов. Распределение магнитного поля вдоль оси  $x$  показано на рис.3а. Такое распределение магнитного поля увеличивает дисперсию по энергиям для высокоэнергетических частиц, обеспечивая необходимое энергетическое разрешение. Зависимость точки пересечения ионом детекторной поверхности от энергии иона показана на рис.3б. Линейная дисперсия для ионов водорода изменяется от 0,15 кэВ/мм при низких энергиях до 0,35 кэВ/мм при высоких энергиях.

Особенностью разработанного анализатора является возможность выбора определенного изотопа, для которого измеряется энергетический спектр. Для реализации этой возможности в анализаторе используется параллельное магнитное и электрическое поле, обеспечивающее одновременную сепарацию ионов по энергиям и массам (схема

Томсона [6]). Специально рассчитанная форма дефлекторных пластин обеспечивает постоянное вертикальное смещение ионов с заданной массой, но различной энергией, на поверхности детектора.



**Рис. 2.** Магнит-анализатор. а – вид сбоку (со стороны детекторов), б – вид спереди (со стороны токамака); 1 – ярмо магнита, 2 – постоянные магниты, 3 – полюса магнита, 4 – отверстие входной апертуры, 5 – отверстие выходной апертуры (корпуса входной и выходной апертур не показаны).

Траектория иона в магните-анализаторе зависит от произведения его массы и энергии.

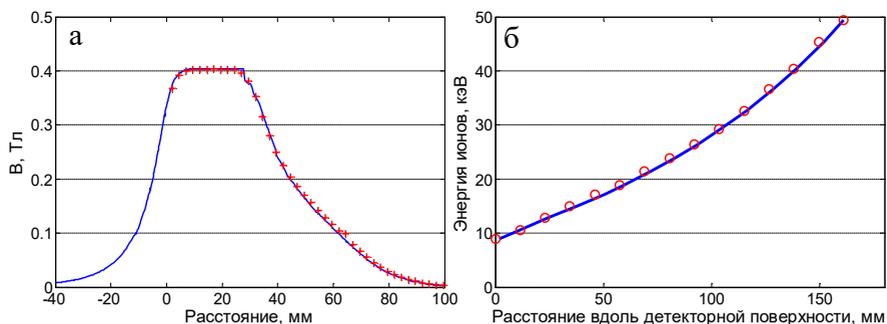
$$\vec{r} = f\left(\frac{mE}{q^2}\right),$$

в то время как отклонение иона в электростатическом поле в вертикальной плоскости (xz) обратно пропорционально энергии иона

$$\varphi \sim \frac{q}{E}$$

Здесь  $E$  – энергия иона в магните-анализаторе (обратим внимание, что эта энергия отличается от энергии первичного нейтрала из-за потерь энергии при прохождении фольги и ускорения приложенным к фольге напряжением),  $m$  и  $q$  – масса и заряд иона. Энергии ионов водорода и дейтерия, движущихся в магните по одинаковым траекториям, отличаются в два раза, и,

следовательно, угол наклона траектории в дефлекторе ( $\frac{mE}{q^2} = const$ ) пропорционален массе изотопа. Поэтому выбор измеряемого изотопа осуществляется синхронным изменением напряжения на дефлекторных пластинах (-8 кВ для Н и -4 кВ для D) и напряжения на фольге (+8 кВ для Н и +4 кВ для D).



**Рис. 3.** а – магнитное поле вдоль центральной оси анализатора, линия – расчеты, кресты – измерения; б – координаты пересечения ионами водорода различной энергии детекторной поверхности, линия – расчеты, кружки – измерения.

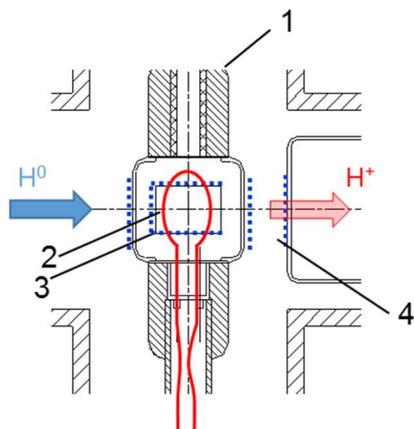
### 1.3 Детекторный узел

Для регистрации ионов в анализаторе использованы каналные электронные умножители (каналотроны) Photonis MAGNUM 5900 [7]. Преимуществом этих детекторов является большой выходной ток, позволяющий увеличить динамический диапазон анализатора. Пятнадцать детекторов, используемых для регистрации, расположены в виде радиального массива для уменьшения расстояния между детекторами. Апертуры детекторов лежат на цилиндрической поверхности с радиусом 220 мм; расстояние между апертурами составляет 11,5 мм. Поскольку ионы с низкой энергией при прохождении фольги приобретают большой угловой разброс, низкоэнергетичная сторона детекторной сборки расположена вблизи магнита-анализатора, в то время как высокоэнергетичная часть удалена от магнита для увеличения линейной дисперсии.

## 1.4 Калибровочный ионный источник

Для интерпретации сигналов анализатора и определения ионной температуры необходима информация об аппаратных функциях каналов анализатора. Разработанный анализатор оборудован специальным слаботочным источником ионов для измерения аппаратных функций и проверки целостности обдирочной фольги. Общая схема источника повторяет схему вакууметрических ламп с горячим катодом (вакууметры Байярда-Альперта). Отличительной особенностью конструкции источника является то, что он установлен непосредственно на оси пучка и сделан прозрачным для быстрых атомов, вылетающих из плазмы.

Схема источника ионов представлена на рис. 4. Источник ионов состоит из нитевидного накаливаемого катода и цилиндрической сетки, установленной внутри корпуса источника ионов. Катод и сетка смещены соответственно на +50 В и +200 В относительно корпуса. Электроны, испускаемые катодом, ускоряются напряжением сетки и колеблются в электростатической потенциальной яме, образованной сеткой, производя ионы. Эти ионы извлекаются и ускоряются высоким напряжением (до -25 кВ), приложенным к корпусу источника. Расположенные на оси части источника ионов выполнены из мелкой сетки для обеспечения прозрачности для нейтралов при сохранении равномерности электрического поля в ускоряющем зазоре. Рабочий диапазон давлений источника ионов составляет от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  Па. Хотя поток ионов  $H^+$ , образующихся из остаточного газа при давлении  $10^{-5}$  Па, достаточен для калибровки анализатора, при необходимости внутрь высоковольтного корпуса может подаваться дополнительный поток газа.

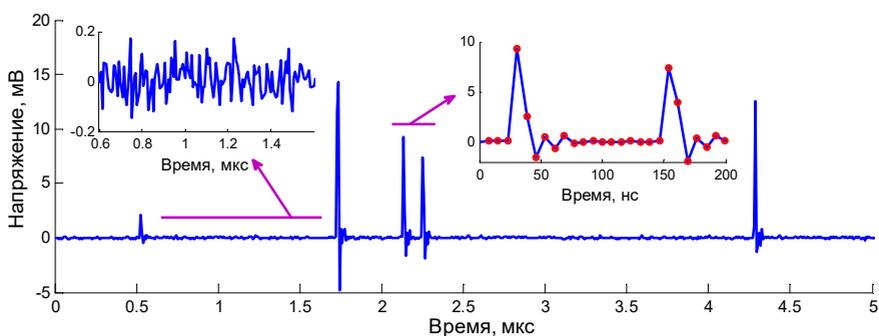


**Рис. 4.** Калибровочный ионный источник. 1 – высоковольтный корпус, 2 – нить накаливаемого катода, 3 – сетка ионного источника, 4 – ускоряющий зазор.

## 2. Регистрация потоков ионов

Использованные для регистрации ионов каналные электронные умножители MAGNUM 5900 позволяют регистрировать сигналы как в токовом режиме, так и в режиме счета отдельных частиц. В анализаторе в качестве основного был выбран режим счета частиц в связи с высокой чувствительностью и отсутствием проблем с нелинейностью отклика и различием в коэффициентах усиления умножителей. Поскольку длительность импульса токамака ST40 не превосходит нескольких секунд, мы решили использовать режим прямого осциллографирования с последующей офлайн-обработкой для подсчета импульсов. Для регистрации сигналов использовался 16-канальный аналогово-цифровой преобразователь SPECTRUM DN6.441-16 с частотой дискретизации 130 МГц и разрешением 16 бит. Отметим, что использование этого преобразователя оставляет возможность измерений в токовом режиме с временным разрешением несколько сот микросекунд, а также позволяет реализовывать алгоритмы онлайн счета импульсов во встроенной программируемой матрице преобразователя.

На рис.5 показан участок типичной осциллограммы сигнала детектора одного из каналов анализатора, записанной в ходе стандартного выстрела токамака ST40. Среднеквадратичное значение шума базовой линии сигнала составляет 70 мкВ, в то время как амплитуда импульсов достигает нескольких милливольт. Длительность импульсов составляет около десяти наносекунд. Амплитудные распределения импульсов для каналов анализатора представлены на рис. 6. Наблюдаемые амплитудные распределения импульсов могут быть аппроксимированы логнормальной функцией, как показано красными линиями на рис. 6.



**Рис 5.** Участок осциллограммы одного из каналов анализатора в выстреле токамака ST40 (сигнал инвертирован для наглядности). Напряжение каналотрона 2 кВ, полный диапазон регистрации АЦП 400 мВ. Уровень шума и форма импульса показаны на врезках.

### 3. Определение аппаратных функций анализатора

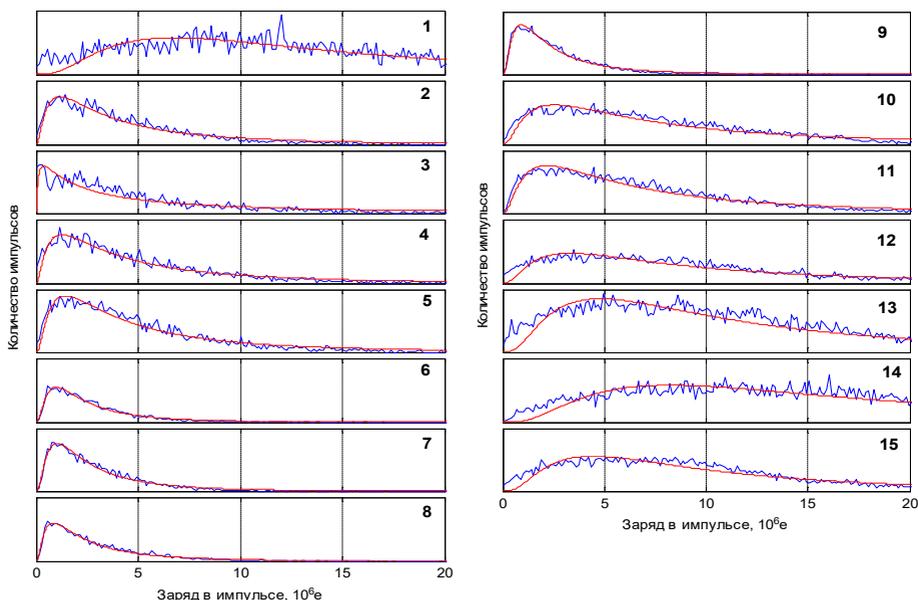
#### 3.1 Измерение аппаратных функций низкоэнергетических каналов

Результаты калибровки для первых восьми каналов анализатора показаны на рис. 7. Ионы получались из остаточного вакуума при рабочем давлении  $10^{-5}$  Па, напряжение на обдирочной фольге и отклоняющее напряжение дефлектора были установлены равными  $U_{\text{foil}} = +8$  кВ и  $U_{\text{def}} = -8$  кВ соответственно. Два основных типа ионов, производимых источником ионов, — это  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2^+$ . Последние полностью диссоциируют в обдирочной фольге

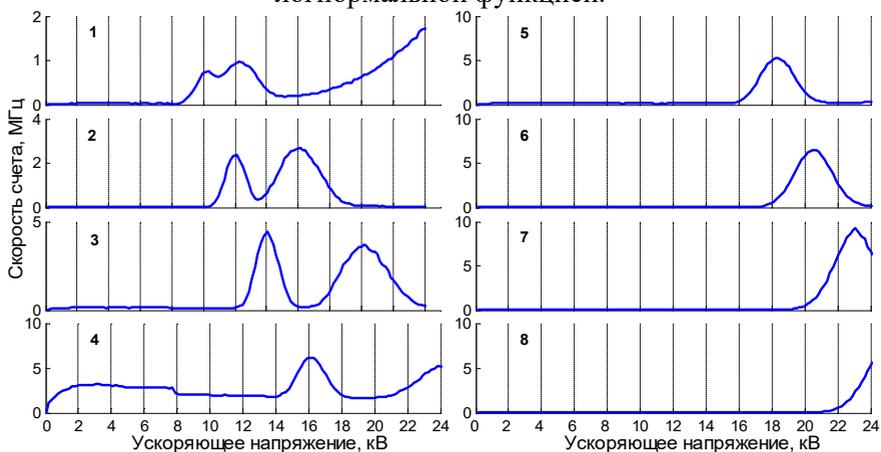
анализатора, создавая протоны с половинной энергией. Различные типы частиц требуют различной начальной энергии для попадания в одну и ту же точку на детекторной поверхности. Быстрые атомы из плазмы достигают обдирочной фольги без изменения энергии, теряют часть своей энергии ( $\Delta E_{\text{loss}}$ ) в фольге, ионизируются, а затем ускоряются благодаря напряжению смещения фольги ( $U_{\text{foil}}$ ). Напротив, ионы  $\text{H}^+$ , генерируемые источником ионов, сначала замедляются в зазоре между входом анализатора и обдирочной фольгой, а затем снова ускоряются после прохождения через фольгу. Для ионов  $\text{H}_2^+$  энергия, полученная в электрическом поле перед диссоциацией, равномерно распределяется между двумя протонами, составляющими молекулу. После прохождения через фольгу и диссоциации оба протона ускоряются до полного напряжения фольги. Поэтому существует следующее соотношение между начальными энергиями различных сортов частиц, попадающих в одно и то же место на детекторной поверхности:

$$E_{\text{H}^0} = E_{\text{H}^+} - eU_{\text{foil}} = 0.5 * (E_{\text{H}_2^+} - eU_{\text{foil}})$$

Два пика, соответствующие ионам  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2^+$ , перекрываются в первом канале НРА, где эквивалентная энергия нейтрала близка к напряжению фольги, и разделяются в последующих каналах с более высокой энергией. Интенсивность пиков  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2^+$  сопоставима, когда источник ионов работает с остаточным вакуумом, в отличие от случая измерений с дополнительным напуском водорода, при котором пик  $\text{H}_2^+$  превышает пик  $\text{H}^+$  более чем в десять раз. Фоновый сигнал в канале 1 связан с ионами  $\text{H}_2\text{O}^+$  и другими молекулярными водородосодержащими ионами, которые диссоциируют в фольге, а фоновый сигнал в канале 4 связан с низкоэнергетическими ионами  $\text{H}^-$ , которые в фольге превращаются в протоны и, таким образом, испытывают двойное ускорение за счет напряжения фольги.



**Рис. 6.** Амплитудные распределения каналов регистрации анализатора (выстрел ST40 #6141). Красные кривые – аппроксимация логнормальной функцией.



**Рис. 7.** Сигналы каналов 1-8 анализатора в зависимости от ускоряющего напряжения калибровочного источника ионов. Напряжение на обдирочной фольге +8 кВ, напряжение дефлекторных пластин -8 кВ, ионный источник работал на остаточном вакууме  $10^{-5}$  Па.

Аппаратные функции каналов анализатора достаточно хорошо аппроксимируются гауссовскими функциями. Средняя эквивалентная энергия атомов, ширина на полувысоте и относительная амплитуда для измеренных аппаратных функций каналов 1-8 представлены в таблице 1:

Таблица 1:

Канал	Измерения Н <sup>0</sup>			Расчеты Н <sup>0</sup>			Расчеты D <sup>0</sup>		
	Эквивалентная энергия атомов Н <sub>0</sub> , кэВ	Ширина на полувысоте, кэВ	Пиковая эффективность регистрации	Эквивалентная энергия атомов Н <sub>0</sub> , кэВ	Ширина на полувысоте, кэВ	Пиковая эффективность регистрации	Эквивалентная энергия атомов D <sub>0</sub> , кэВ	Ширина на полувысоте, кэВ	Пиковая эффективность регистрации
1	2	1.4	2.5e-3	1.93	1.1	1.9e-3	1.1	0.85	3.6e-4
2	4	1.4	9.8e-3	4	1.1	6e-3	2	0.79	7.6e-4
3	6	1.7	1.8e-2	6.06	1.4	1.1e-2	3.1	1	1.3e-3
4	8.1	1.7	1.8e-2	8.13	1.66	1.8e-2	4.2	1.1	2e-3
5	10.3	2.2	2.1e-2	10.2	1.9	2.6e-2	5.2	1.2	3.6e-3
6	12.6	2.5	2.6e-2	12.6	2.2	3.1e-2	6.4	1.6	3.6e-3
7	15	2.7	3.8e-2	14.9	2.4	3.8e-2	7.6	1.7	4.3e-3
8	17.5	3.2	4.1e-2	17.6	2.6	4.2e-2	8.9	2.2	4.7e-3
9				20.6	2.9	4.5e-2	10.3	2.2	5.2e-3
10				23.7	3.1	5.3e-2	12.1	2.5	7.4e-3
11				27.1	3.4	6.1e-2	13.7	2.9	8.8e-3
12				30.7	3.6	6.5e-2	15.6	3.1	1.1e-2
13				35.1	3.7	7.1e-2	18	3.4	1.1e-2
14				39.8	4.2	7.5e-2	20.3	3.8	1.4e-2
15				44.9	4.4	8.9e-2	23.1	4.1	1.5e-2

### 3.2 Оценка толщины обдирочной фольги

Максимальное рабочее напряжение калибровочного источника недостаточно для прямой калибровки высоковольтных каналов с использованием ионов водорода. Предполагалось, что эти каналы будут откалиброваны с

помощью ионов дейтерия, но во время калибровки анализатора работа с дейтерием на площадке ST40 была запрещена по соображениям безопасности. Поэтому для оценки аппаратных функций высоковольтных каналов использовались расчеты траекторий частиц в анализаторе.

Расчеты проводятся в три этапа:

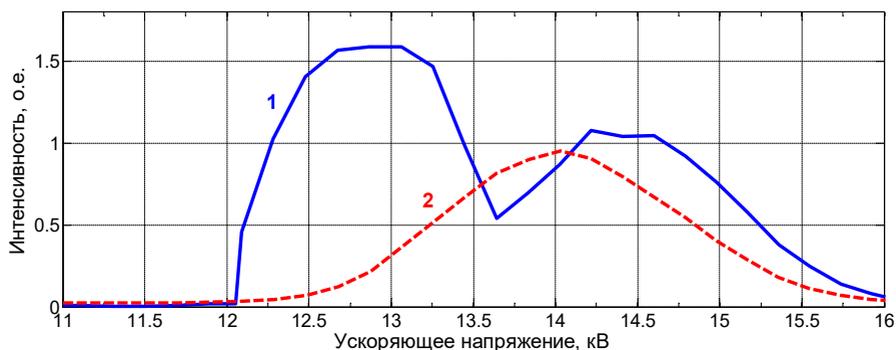
- Расчет прохождения частиц через обдирочную фольгу
- Расчет траекторий частиц в магнитных и электрических полях анализатора
- Постобработка данных о траекториях и определение вероятности регистрации входящих частиц с определенной энергией каналами анализатора

На первом этапе с помощью кода Монте-Карло SRIM [8] вычислялось прохождение ионов с заданной начальной энергией через обдирочную фольгу. Выходные данные расчета SRIM (энергии и углы рассеяния тестовых частиц, прошедших через фольгу,) использовались в качестве входных параметров для последующих этапов моделирования.

Важным аспектом этих расчетов являлось обеспечение точности моделирования взаимодействия ионов с материалом фольги. В анализаторе для обдирки используется фольга из углерода толщиной 10 нм ( $2 \text{ мкг/см}^2$ ), поддерживаемая никелевой сеткой, производства компании Lebow [9]. Хотя толщина фольги контролируется и гарантируется поставщиками с точностью 10%, она может изменяться во время хранения и работы. Кроме того, расчеты SRIM включают множество параметров взаимодействия ионов с веществом фольги, которые могут отличаться для ультратонких пленок по сравнению с массивным углеродом. Поэтому мы установили «эффективную» толщину фольги путем сравнения потерь энергии в фольге, наблюдаемых экспериментально во время калибровки анализатора, с расчетами для различной толщины фольги.

Потери энергии были найдены из измерений отклика детекторов анализатора при сканировании ускоряющего напряжения калибровочного источника ионов. Результаты такой

калибровки для канала анализатора № 3 показаны на рисунке 8. Кривая 1 на этом рисунке была получена, когда в анализатор была установлена частично поврежденная фольга с отверстиями. В этих измерениях напряжение смещения фольги устанавливалось равным нулю, что означало, что энергия протона на входе в фольгу равна ускоряющему напряжению источника ионов. Два отчетливых пика на графике представляют собой ионы, прошедшие через отверстия фольги (без потери энергии), и те, которые прошли через фольгу, потеряв часть своей первоначальной энергии. Наблюдаемые потери энергии - около 1,6 кэВ - значительно превышают ожидания, основанные на значении тормозной способности для протонов с энергией 14 кэВ ( $0,46 \text{ кэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$ ) [10] и номинальной линейной плотности фольги  $2 \text{ мкг}/\text{см}^2$ , и соответствуют эффективной толщине фольги 17 нм.



**Рис. 8.** Отклик канала № 3 анализатора при сканировании ускоряющего напряжения источник ионов. **1** – частично поврежденная фольга (с отверстиями), ионы  $\text{H}^+$ , нулевое напряжение на фольге; **2** – неповрежденная фольга, ионы  $\text{H}^+$ , напряжение на фольге +8 кВ.

Существует вероятность того, что повреждение фольги увеличило толщину неповрежденных участков. Чтобы проверить эту гипотезу, мы провели дополнительные измерения с использованием свежей, неповрежденной фольги (кривая 2 на рисунке 8). Во время этого измерения напряжение смещения фольги составляло +8 кВ, что означает, что для ускоряющего

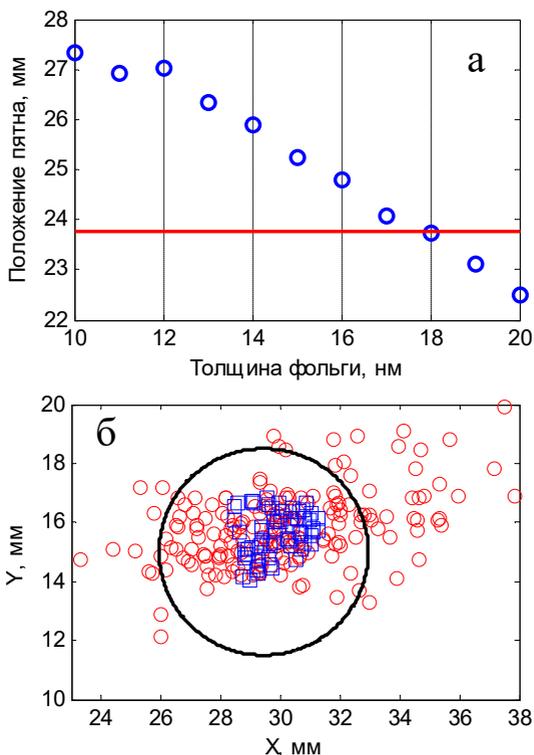
напряжения источника ионов 14 кВ энергия протона на входе в фольгу составляла 6 кэВ. Потеря энергии в фольге для этого измерения составила 1,1 кВ. Поскольку тормозная способность протонов с энергией 6 кэВ составляет 0,33 кэВ/(г/см<sup>2</sup>), это дает такую же эффективную толщину фольги 17 нм.

База данных NIST содержит средние значения тормозной способности ионов. В анализаторе в детекторы преимущественно попадают ионы с малыми углами рассеяния, и этот эффект потенциально может влиять на наблюдаемые потери энергии в фольге. Для изучения влияния этого эффекта мы выполнили расчет траекторий частиц для разной толщины фольги для условий калибровки анализатора с частично поврежденной фольгой, обсуждавшейся ранее (ионы Н<sup>+</sup>, начальная энергия ионов 14,5 кэВ, нулевое напряжение смещения фольги).

Зависимость положения пятна частиц от толщины фольги показана на рис. 9а. Толщина 18 нм соответствует наилучшему попаданию частиц в апертуру канала №3 анализатора, и в дальнейшем мы будем использовать это значение в качестве "эффективной" толщины фольги. На рис. 9б показаны точки попадания на поверхность детектора для двух сортов частиц, соответствующих двум пикам на кривой 1 рисунка 8, а именно протоны с начальной энергией 12,9 кэВ, прошедшие без взаимодействия с фольгой (синие квадраты), и протоны с начальной энергией 14,5 кэВ, прошедшие через обдирочную фольгу толщиной 18 нм (красные круги).

### 3.3 Вычисление траекторий частиц

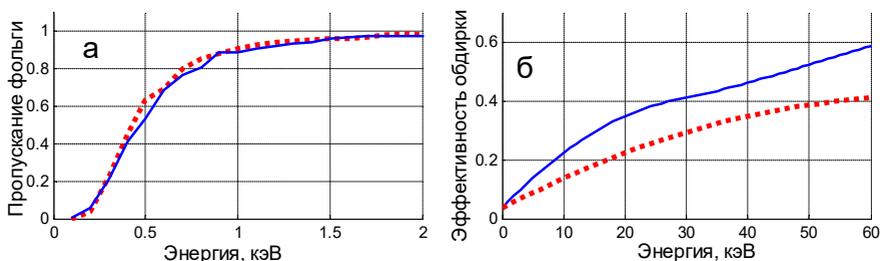
Рассчитанная вероятность того, что частица с определенной начальной энергией пройдет через углеродную фольгу толщиной 18 нм, показана на рис. 10а. Эта вероятность, а также вероятности обдирки и регистрации ионов детектором, обсуждаемые ниже, используется на третьем этапе расчетов для оценки общей вероятности регистрации входящей частицы.



**Рис. 9.** Расчеты траекторий частиц в анализаторе при различных толщинах обдирочной фольги. **а** – зависимость положения пятна от толщины фольги ( $H^+$ , начальная энергия 14.5 кэВ, нулевое напряжение на фольге), горизонтальная линия соответствует экспериментально наблюдаемому значению; **б** – точки пересечения частицами детекторной поверхности, синие квадраты – без фольги, начальная энергия ионов  $H^+$  12.9 кэВ, красные круги – толщина фольги 18 нм, начальная энергия ионов 14.5 кэВ, черный круг – апертура детектора.

Нужно отметить, что код SRIM не может предсказать зарядовое состояние покидающих фольгу частиц, поэтому вероятность обдирки оценивается на основе литературных данных. Считается, что достигается равновесное распределение зарядов, то есть эта вероятность определяется материалом мишени и скоростью частицы на выходе из мишени и не зависит

от первоначального заряда частицы и толщины мишени. Эффективность обдирки нейтральных водородных и дейтериевых атомов по опубликованным данным [11], [12] показана на рис. 10б. Вероятность регистрации ионов детектором принимается равной 0,5 для всех энергий и масс ионов [13], [14].



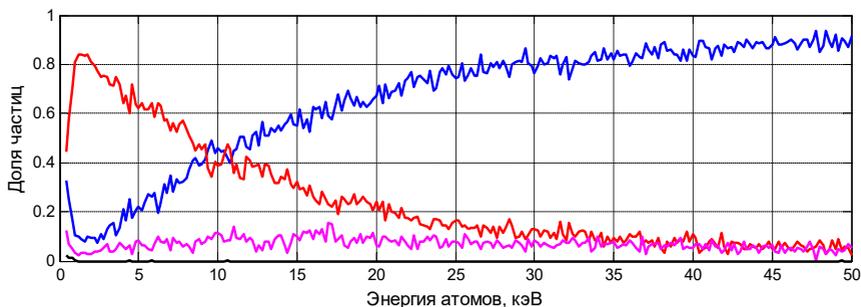
**Рис. 10.** а – вероятность прохождения иона через углеродную фольгу толщиной 18 нм (расчеты SRIM), б – доля положительных ионов ( $H^+$ ,  $D^+$ ) на выходе из фольги (интерполяция литературных данных [11],[12]). Синяя непрерывная линия – водород, красный пунктир – дейтерий.

Для расчета траекторий частиц на втором этапе используется программное обеспечение COMSOL Multiphysics® [15]. Начальной точкой рассчитываемых траекторий является поверхность обдирочной фольги, а энергии и углы для каждой частицы берутся из выходных данных SRIM.

Всего мы произвели расчеты траекторий 200 частиц для каждой энергии до 50 кэВ для водорода и до 25 кэВ для дейтерия с шагом по энергии 0,4 кэВ. Аппаратные функции каналов анализатора определяются как относительное количество траекторий, попавших в определенную апертуру детектора, умноженное на вероятность прохождения через обдирочную фольгу и вероятность обдирки (то есть выхода из фольги в виде положительного иона).

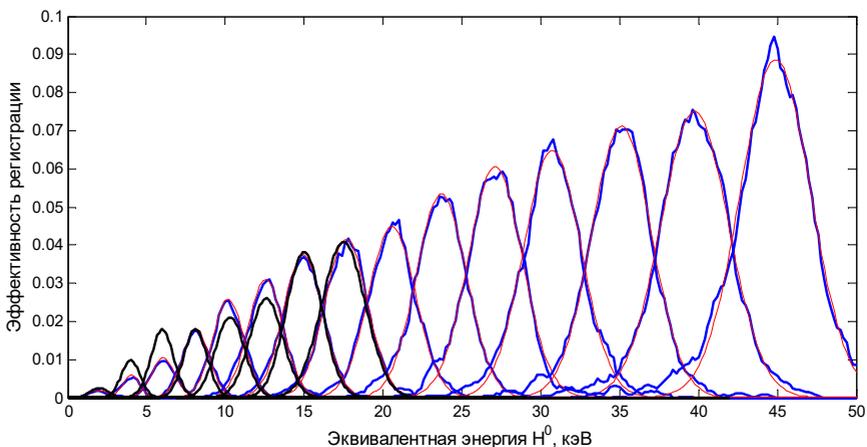
Прохождение ионов через фольгу вызывает угловое рассеяние частиц, особенно существенное для частиц с низкой энергией. В анализаторе частицы с большими углами отсекаются

с помощью диафрагм на входе и выходе магнита. Соотношение частиц, прошедших через анализатор и достигших поверхности детектора, а также потерянных на входной и выходной диафрагмах и дефлекторных пластинах, показано на рис. 11.

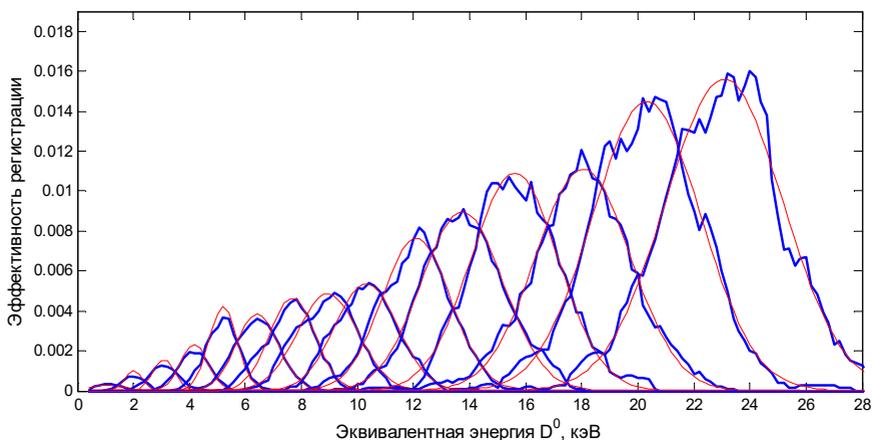


**Рис. 11.** Прохождение частиц в анализаторе, синий — доля частиц, достигших детекторной поверхности, красный — доля частиц, попавших во входную диафрагму, пурпурный — доля частиц, попадавших на выходную диафрагму магнита, черный — доля частиц, попавших на дефлекторные пластины.

Рассчитанные аппаратные функции для каналов 1-15 вместе с измеренными функциями для низкоэнергетических каналов для атомов водорода ( $H^0$ ) показаны на рис. 12, а для атомов дейтерия ( $D^0$ ) — на рис. 13. Абсолютные значения экспериментальных аппаратных функций были скорректированы для наилучшего соответствия расчетам. Энергии каналов, пиковая эффективность и ширина на полувывсоте приведены в таблице 1. Наблюдаемые различия между рассчитанными и измеренными значениями можно объяснить индивидуальной чувствительностью каналов. Основываясь на сравнении расчетов с калибровкой, мы оценили среднеквадратичные ошибки в 35% для эффективности канала и 70 эВ для положения каналов.



**Рис. 12** Аппаратные функции анализатора для атомов водорода  $H^0$ .  
 Напряжение на обдирочной фольге +8 кВ, напряжение на  
 deflectорных пластинах -8 кВ. Синие линии – расчет, красные –  
 аппроксимация гауссовской функцией, черные – измерения (данные  
 калибровки, описанной в разделе 2.1).



**Рис. 13.** Аппаратные функции анализатора для атомов дейтерия  $D^0$ .  
 Напряжение на обдирочной фольге +4 кВ, напряжение на  
 deflectорных пластинах -4 кВ. Синие линии – расчет, красные –  
 аппроксимация гауссовской функцией.

### 3.4 Разделение по массам в анализаторе

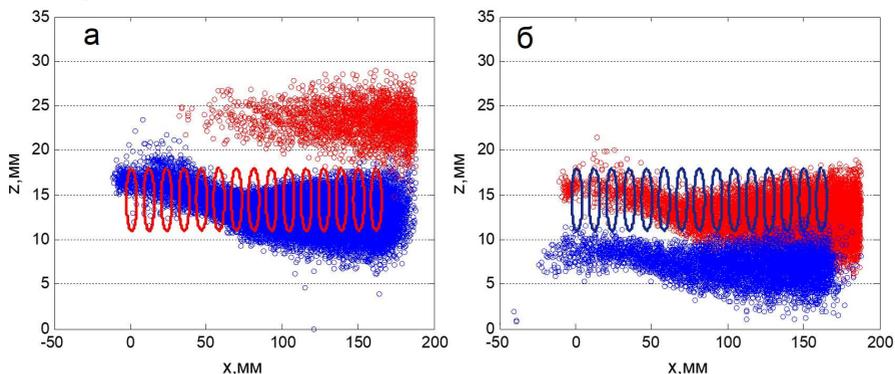
Особенностью разработанного анализатора является его способность разделять частицы по массе и различать атомы водорода и дейтерия. Эта функция реализована посредством сдвига траекторий ионов в анализаторе электростатическим полем, создаваемым дефлекторными пластинами. Чтобы изучить способность анализатора различать изотопы водорода, были рассчитаны траектории частиц как для водорода, так и для дейтерия в двух режимах работы анализатора: регистрация энергетического распределения атомов водорода H (напряжение обдирочной фольги +8 кВ, напряжение дефлекторных пластин -8 кВ) и регистрация энергетического распределения атомов дейтерия D (напряжение обдирочной фольги +4 кВ, напряжение дефлекторных пластин -4 кВ). Результаты этих расчетов показаны на рис. 14. Кружки на рисунке указывают точки на детекторной поверхности, в которые попадают тестовые частицы (синий – H, красный – D) с различными энергиями. Как видно из рисунка, отклонение эффективно разделяет частицы, и лишь несколько случайных частиц, не соответствующих регистрируемому изотопу, достигают апертуры детектора.

Эффективность разделения по массе проверялась во время калибровок с частично поврежденной обдирочной фольгой. Было проведено несколько сканирований по ускоряющему напряжению источника ионов с разными напряжениями на отклоняющих пластинах в диапазоне от 2 до 10 кВ и нулевым напряжением обдирочной фольги.

Сигналы каналов анализатора при различных напряжениях источника ионов и дефлекторных пластин представлены на рис. 15. Источник ионов генерирует ионы  $H^+$  и  $H_2^+$ , которые ускоряются высоким напряжением, приложенным к источнику ионов. В этом режиме работы регистрируются четыре типа частиц:

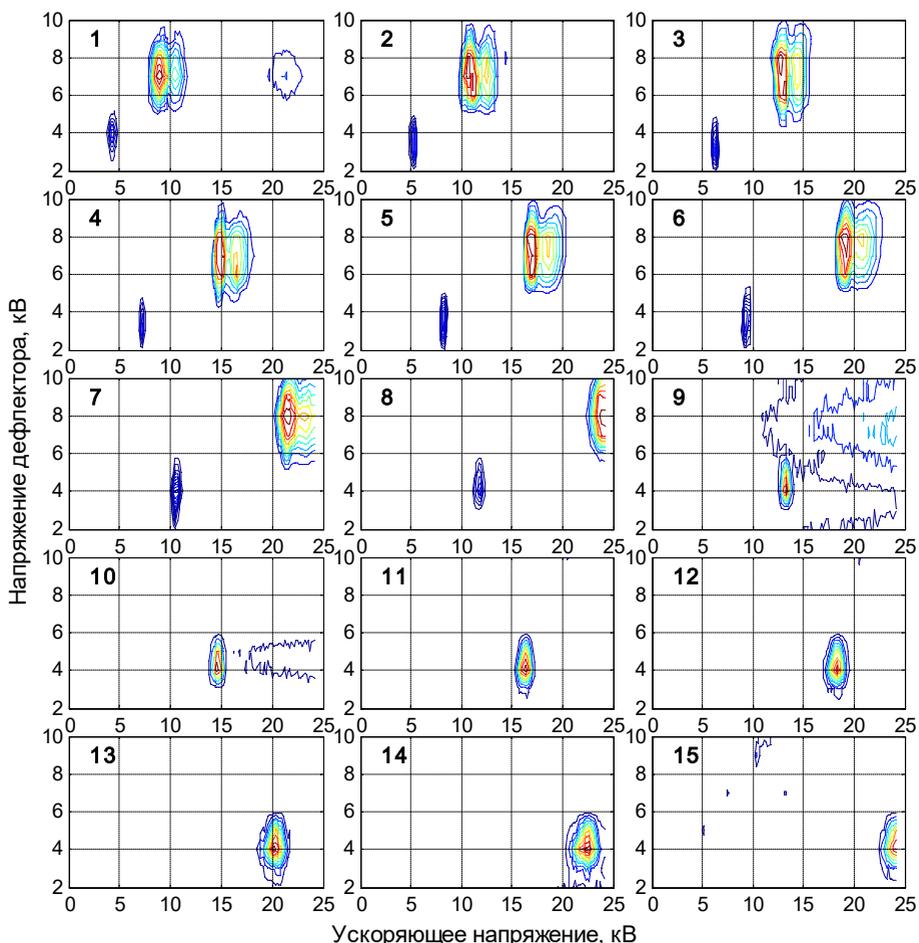
- Ионы  $H^+$ , которые проходят через отверстия в фольге, не теряя никакой энергии. Энергия этих ионов равна ускоряющему напряжению источника ионов.

- Ионы  $H^+$ , которые проходят через фольгу и теряют часть своей первоначальной энергии (примерно 2 кэВ).
- Ионы  $H^+$ , полученные в результате диссоциации ионов  $H_2^+$  в обдирочной фольге.
- Ионы  $H_2^+$ , которые проходят через отверстия в обдирочной фольге.



**Рис. 14.** Диаграмма точек пересечения частицами детекторной поверхности; ось абсцисс – расстояние вдоль детекторной поверхности, ось ординат – вертикальная координата точек пересечения, синие точки –  $H^0$  (диапазон энергий 1-50 кэВ), красные точки –  $D^0$  (диапазон энергий 1-30 кэВ), эллипсы – апертуры детекторов; **а** - регистрация атомов водорода (напряжение на обдирочной фольге +8 кВ, напряжение на дефлекторных пластинах -8 кВ), **б** - регистрация атомов дейтерия (напряжение на обдирочной фольге +4 кВ, напряжение на дефлекторных пластинах -4 кВ).

Для первого канала первый тип наблюдается при напряжении источника ионов около 9 кВ и напряжении на дефлекторных пластинах 7 кВ, второй тип при напряжениях 10,5/8 кВ, третий при напряжениях 21/7 кВ, четвертый при напряжениях 4,5/4 кВ. Как видно из рис. 15, отклоняющее напряжение 4 кВ эффективно отсекает ионы с  $m = 1$ , оставляя в сигнале только ионы с  $m = 2$  ( $H_2^+$ ). Аналогично, отклоняющее напряжение 8 кВ отсекает ионы с  $m = 2$  и сохраняет только ионы с  $m = 1$ .

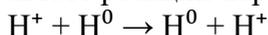


**Рис. 15** Калибровочное сканирование по напряжениям источника ионов и дефлекторных пластин с частично поврежденной обдирочной фольгой и  $U_{\text{foil}} = 0$ . Каждый график соответствует отклику конкретного канала анализатора (указан номером в левом верхнем углу графика). Сигналы от частиц с массой  $m = 1$  наблюдаются при отклоняющем напряжении около 7 кВ, в то время как сигналы от частиц с массой  $m = 2$  наблюдаются при отклоняющем напряжении около 4 кВ.

#### 4. Определение ионной температуры

Анализатор предназначен для измерения энергетического распределения быстрых атомов водорода (или дейтерия), возникающих из ионов плазмы в реакциях перезарядки, включающих столкновения либо с медленными, либо с быстрыми атомами водорода. Из этих измерений можно определить температуру ионов плазмы и распределение быстрых надтепловых ионов в плазме.

Нейтралы, регистрируемые анализатором, возникают в результате реакций перезарядки в плазме:



Существуют два источника атомов в плазме:

- а. "Пассивная мишень":** Медленные атомы водорода, возникающие в плазме из-за напуска газа для подпитки плазмы, при рекомбинации ионов на находящихся в контакте с плазмой элементах, или из-за десорбции водорода со стенок вакуумной камеры. Энергия этих атомов определяется процессом диссоциации молекулы водорода и составляет несколько эВ. Попадая в плазму, атомы водорода ионизируются при столкновениях с электронами плазмы в реакции



Скорость этой реакции в диапазоне температур от 25 до 2500 эВ приблизительно равна  $\langle \sigma_{\text{ion}} v \rangle \approx 2 \times 10^{-8} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что определяет характерную глубину проникновения этих атомов в плазму 3 см для концентрации плазмы  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

- б. "Активная мишень":** быстрые атомы водорода, вводимые в плазму с помощью нагревных или диагностических инжекторов (инжектируемый пучок быстрых атомов должен пересекать линию зрения анализатора).

Скорость образования нейтралов, регистрируемых анализатором, равна:

$$\frac{dn_{a'}}{dt \cdot dE_{a'}} = \frac{dn_i}{dE_i \cdot d\Omega} n_a \sigma_{cx}(v_{rel}) \cdot v_{rel} \cdot \Delta\Omega$$

$$\frac{dn_i}{dE_i \cdot d\Omega} = f_i \cdot n_i$$

где  $E$  - энергия первичного иона в плазме,  $n_a$ ,  $n_i$ ,  $n_a'$  - концентрации атомов, ионов и вторичных нейтралов,  $\sigma_{cx}$  - сечение перезарядки [16],[17],  $v_{rel} = |\vec{v}_i - \vec{v}_a|$  - относительная скорость сталкивающихся частиц (иона и атома),  $\Delta\Omega$  - телесный угол регистрации вылетающих нейтралов,  $f_i$  функция распределения ионов в плазме в телесном угле регистрации анализатора.

Здесь мы предполагаем, что при процессе перезарядки не происходит передачи импульса; следовательно, энергия и направление нейтральных частиц, возникающих в результате перезарядки, совпадают с энергией и направлением исходного иона. Действительно, угол рассеяния для таких столкновений не превышает нескольких градусов (см., например, [18], [19]).

В случае пассивной мишени скоростью первичного атома можно пренебречь, поэтому относительная скорость равна начальной скорости иона:

$$v_{rel} = \sqrt{\frac{2E_i}{m_i}}$$

Для случая активной мишени

$$v_{rel} = \left( \frac{2E_i}{m_i} + \frac{2E_b}{m_b} - 4 \sqrt{\frac{E_i E_b}{m_i m_b}} \cos\theta \right)^{1/2}$$

где  $E_b$  и  $m_b$  - энергия и масса частиц инжектируемого пучка быстрых атомов,  $\theta$  - угол между направлением движения пучка и линией зрения анализатора.

Отклик (скорость счета) определенного канала анализатора может быть записан в виде::

$$R_k = \int (dV \int (dE_i \cdot f_i \cdot n_i n_a \sigma_{cx}(v_{rel}) \cdot v_{rel} \cdot (1 - P_{loss}) \cdot \Delta\Omega \cdot I_k(E_i))) \quad (1)$$

где  $V$  - объем плазмы, из которого анализатор принимает частицы,  $P_{loss}$  - вероятность того, что вторичный нейтрал

ионизируется в плазме,  $I_k$  – аппаратная функция канала  $k$ . В дальнейшем для краткости множитель  $(1 - P_{loss})$  в формулах опущен, хотя он может быть существенным при концентрации плазмы выше  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Наиболее точный метод оценки параметров плазмы по данным анализатора быстрых атомов заключается в сравнении измеренных откликов каналов анализатора с результатами моделирования, полученными с помощью сложных кодов, учитывающих изменения параметров плазмы и сложное поведение быстрых ионов в токамаке. Такие сравнения выходят за рамки данной статьи. Тем не менее также полезно идентифицировать и использовать параметры функции распределения ионов, усреднённые по наблюдаемому объёму плазмы, которые характеризуют состояние плазмы и могут быть непосредственно получены из данных анализатора. Предполагая постоянные параметры плазмы во всём наблюдаемом объёме, скорость счёта каналов анализатора может быть представлена как

$$R_k = V \cdot \Delta\Omega \overline{n_i n_a} \int dE_i \cdot f_i(\mathbf{P}, E_i) \cdot \sigma_{cx}(v_{rel}(E_i)) \cdot v_{rel}(E_i) \cdot I_k(E_i) \\ = \eta \cdot Y_k(\mathbf{P})$$

Здесь мы обозначили как  $\mathbf{P}$  набор параметров, определяющих функцию распределения ионов,  $\eta = \overline{n_i n_a}$  – общий для всех каналов коэффициент, зависящий от концентраций ионов и атомов в плазме. Функцию  $Y_k(\mathbf{P})$  мы будем называть функцией отклика канала анализатора. Параметры функции распределения  $\mathbf{P}$  и среднее произведение концентраций ионов и атомов  $\overline{n_i n_a}$  могут быть найдены минимизацией квадратов разностей измеренного и вычисленного значений скоростей счета каналов:

$$M = \sum_k w_k^2 \cdot (R_k^{meas} - \eta \cdot Y_k(\mathbf{P}))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $w_k$  присвоенный определенному каналу вес, который может быть использован для учета достоверности измерений в данном канале.

Для плазмы без надтепловых электронов параметром, характеризующим функцию распределения ионов, является

ионная температура  $T_i$ . В тепловом равновесии функция распределения по энергиям для ионов, движущихся в определенном направлении, имеет вид:

$$f_M(T_i, E_i) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\pi k T_i} \right)^{3/2} \exp \left( -\frac{E_i}{k T_i} \right) \sqrt{E_i}$$

Функции отклика каналов анализатора для равновесной (максвелловской) плазмы и пассивной мишени:

$$Y_k(\bar{T}_i) = V \cdot \Delta\Omega \cdot \eta \cdot \left( \frac{1}{\pi k \bar{T}_i} \right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2m_i}} \int dE_i \cdot E_i \cdot \exp \left( -\frac{E_i}{k \bar{T}_i} \right) \sigma_{cx}(E_i) \cdot I_k(E_i)$$

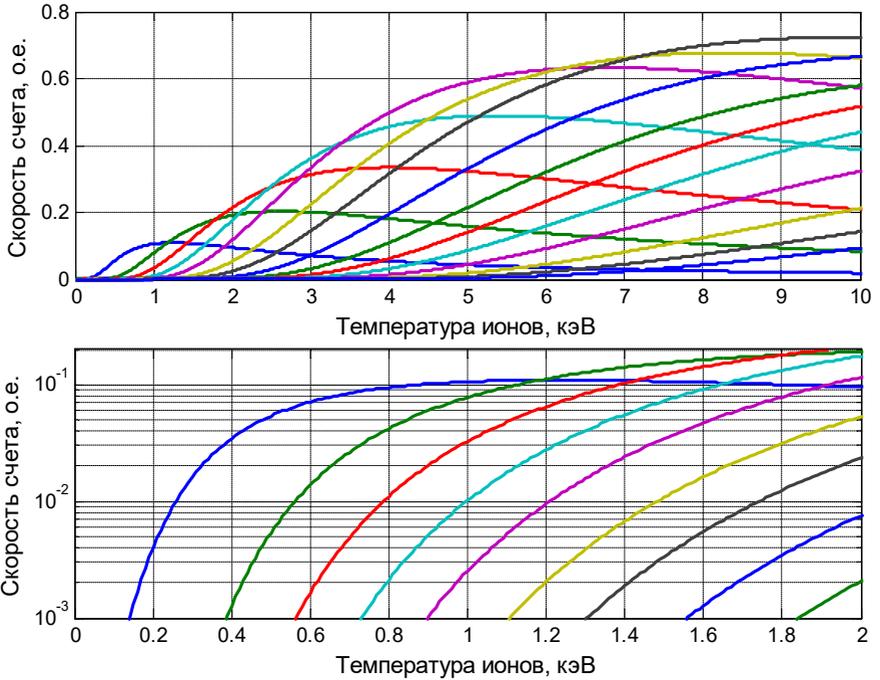
показаны на рис.16. Мы использовали знак усреднения над символом температуры ионов  $T_i$  чтобы подчеркнуть, определяемое с помощью этих функций отклика значение температуры зависит от распределения температур в наблюдаемом объеме плазмы.

Для определения ионной температуры необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \bar{T}_i} \left( \sum_k w_k^2 \cdot (R_k^{meas} - \eta \cdot Y_k(\bar{T}_i))^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \sum_k w_k^2 \cdot (R_k^{meas} - \eta \cdot Y_k(\bar{T}_i))^2 \right) = 0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \eta \sum_k w_k^2 \cdot Y_k \frac{\partial Y_k}{\partial \bar{T}_i} = \sum_k w_k^2 \cdot R_k^{meas} \cdot \frac{\partial Y_k}{\partial \bar{T}_i} \\ \eta \sum_k w_k^2 \cdot (Y_k)^2 = \sum_k w_k^2 \cdot R_k^{meas} \cdot Y_k \end{cases} \quad (3)$$



**Рис. 16.** Функции отклика каналов анализатора. Равновесная (максвелловская) водородная плазма, пассивная мишень,  $U_{\text{foil}}=+8$  kV. Одни и те же функции отклика приведены на верхнем и нижнем рисунке в различных масштабах.

После исключения переменной  $\eta$  мы получим уравнение:

$$dM = \frac{\sum_k w_k^2 \cdot Y_k \frac{\partial Y_k}{\partial T_i}}{\sum_k w_k^2 \cdot (Y_k)^2} \cdot \sum_k w_k^2 \cdot R_k^{\text{meas}} \cdot Y_k - \sum_k w_k^2 \cdot R_k^{\text{meas}} \cdot \frac{\partial Y_k}{\partial T_i} = 0 \quad (4)$$

Корнем этого уравнения является оцененная ионная температура  $T_i^{\text{eval}}$ . Вторая неизвестная переменная,  $\eta^{\text{eval}}$ , может быть найдена подстановкой оцененного значения температуры в систему (3).

После нахождения неизвестных параметров  $T_i^{\text{eval}}$  и  $\eta^{\text{eval}}$  мы можем оценить погрешность нахождения этих значений из оценки погрешности отклика каналов анализатора:

$$(\Delta T_i)^2 = \left( \frac{\partial(dM)}{\partial T_i} \right)^{-2} \sum_k (\Delta R_k^{meas})^2 \left( \frac{\partial(dM)}{\partial R_k^{meas}} \right)^2 \quad (5)$$

Фундаментальным источником погрешности  $\Delta R_k^{meas}$  является случайная природа появления нейтралов и конечное число регистрируемых частиц. В соответствии с центральной предельной теоремой, “статистическая” погрешность равна квадратному корню из количества зарегистрированных частиц:

$$\Delta R_k^{meas} = (R_k^{meas})^{0.5}$$

Другой способ оценки погрешности измерения температуры использует разброс отклонений измеренных и предсказанных значений откликов каналов, который характеризуется квадратичной формой M:

$$(\Delta T_i)^2 = M(T_i^{eval}, \eta^{eval}) \cdot \left( \frac{\partial(dM)}{\partial T_i} \right)^{-1} \quad T_i = T_i^{eval} \quad (6)$$

Оценка с помощью этого способа включает в себя как статистическую, так и систематическую ошибки.

Нужно отметить, что описанная процедура позволяет найти два параметра плазмы – среднюю ионную температуру  $\bar{T}_i$  и среднее произведение концентраций ионов и атомов  $\bar{n}_i \bar{n}_a$ . При этом, однако, абсолютная калибровка анализатора не проводилась, а моделирование отклика анализатора содержит значительные погрешности, связанные с неопределенностью литературных данных (таких, как вероятность регистрации иона детектором). Поэтому по измерениям с помощью анализатора может быть определена только относительная динамика параметра  $\bar{n}_i \bar{n}_a$ , а не его абсолютное значение.

Достаточно специфической задачей для анализатора является измерение низкой температуры ионов (ниже 1 кэВ). В этом случае сигналы присутствуют лишь в нескольких каналах с низкой энергией, а положение этих каналов на шкале энергии может существенно влиять на точность измерений. Шкала энергий каналов может быть смещена путем изменения напряжения на обдирочной фольге, доускоряющего ионы в

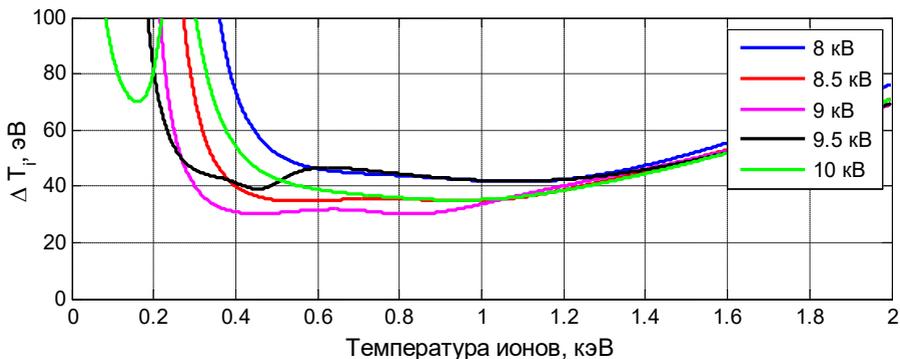
анализаторе. Величина этого напряжения может быть оптимизирована для увеличения точности измерений.

Мы провели расчеты аппаратных функций каналов анализатора и функций отклика для максвелловской плазмы в соответствии с вышеописанной процедурой для пяти значений напряжения обдирочной фольги (+8, +8.5, +9, +9.5 и +10 кВ) и оценили погрешность определения температуры ионов для заданных напряжений и диапазонов температур ионов от 0 до 2 кэВ (Рис. 17). Прогнозируемая погрешность измерения температуры ионов оценивается по формулам (2)-(5), предполагая только статистические ошибки измерений. Основываясь на этом предположении, мы приняли веса каналов регистрации пропорциональными квадратному корню сигнала канала:

$$w_k^2 = R_k^{meas}$$

И использовали следующую оценку погрешности отклика канала:

$$\Delta R_k^{meas} = (R_k^{meas})^{0.5} + 1$$



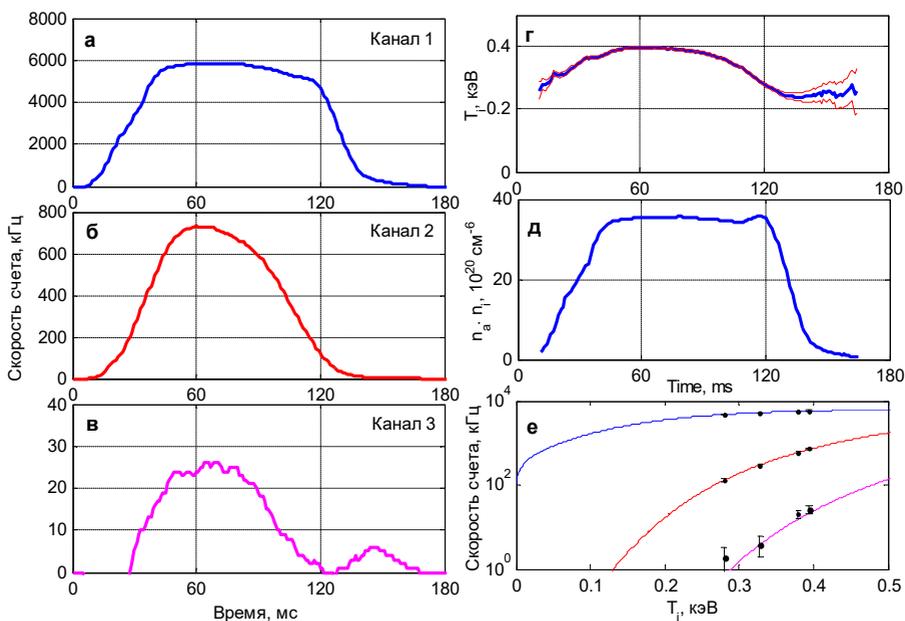
**Figure 17.** Оценка погрешности определения ионной температуры для различных напряжений обдирочной фольги (подробное описание в тексте).

В этой модели погрешность зависит от величины сигнала в канале (то есть количества зарегистрированных частиц), которая, в свою очередь, зависит от геометрии системы и величины  $\bar{n}_i n_a$ .

Приведенная на рис.17 погрешность вычислена для реальной геометрии эксперимента на ST40, значения параметра произведения концентраций  $\bar{n}_i \bar{n}_a = 10^{20} \text{см}^{-6}$  и длительности набора статистики 1 мс. Как видно из рис. 17, оптимальное напряжение на фольге для измерений низкой температуры равно +9 кВ. Отметим также, что в то время как уровень погрешности, показанный на рис.17, зависит от величины сигнала в каналах анализатора, форма приведенных кривых и, соответственно, оптимальное напряжение на фольге, слабо зависит от уровня сигнала и выбора модели источника погрешности.

Пример использования анализатора для измерения относительно низкой ионной температуры на токамаке ST40 показан на рис.18 (выстрел ST40 #6707). Напряжение на обдирочной фольге в этом выстреле было равно +9 кВ. Полезные сигналы наблюдались в первых трех каналах анализатора. Рисунки 18а-в показывают динамику скорости счета каналов анализатора. На рис.18г и 18д показаны восстановленная динамика ионной температуры и параметра  $\bar{n}_i \bar{n}_a$ . Тонкие красные линии на рис. 18г показывают доверительный интервал измерений. Еще раз подчеркнем, что из-за отсутствия абсолютной калибровки результаты измерения параметра произведения концентраций  $\bar{n}_i \bar{n}_a$  могут использоваться только для изучения относительной динамики концентрации плазмы.

На рис.18е показаны функции отклика анализатора (цветные линии) вместе с измеренными значениями скорости счета в каналах анализатора (черные точки с усами, определяемыми статистической погрешностью) для нескольких моментов времени с различной ионной температурой. Совпадение предсказанных и измеренных значений на уровне статистических ошибок указывает на отсутствие значительных систематических погрешностей.



**Рис. 18.** Выстрел ST40 #6707: измерения ионной температуры в низкотемпературной плазме. **а,б,в** – скорость счета первых трех каналов анализатора; **г,д** – найденная по измерениям ионная температура и среднее произведение концентраций атомов и ионов в плазме, тонкие красные линии показывают доверительный интервал измерений; **е** – функции отклика каналов анализатора (цветные линии) вместе с измеренными значениями скорости счета соответствующего канала (черные точки с усами, соответствующими статистической погрешности).

## Закключение

Анализатор нейтральных частиц, разработанный и установленный на токамаке ST40, позволяет измерять функции распределения энергии для ионов водорода (до 40 кэВ) и ионов дейтерия (до 20 кэВ), а также температуру ионов плазмы при температурах выше 300 эВ

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Иванову за инициирование работы и ее поддержку, В. Немытову, С. Bradley и другим сотрудникам компании Tokamak Energy за помощь в проведении калибровок и экспериментов на токамаке ST40, М. Грязневичу за интерес к работе и поддержку ее публикации.

## Литература

- [1] R. Bartiromo *et al.*, “Design and calibration of the JET neutral particle analyzer,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 58, no. 5, pp. 788–795, 1987, doi: 10.1063/1.1139634.
- [2] A. N. Karpushov, B. P. Duval, C. Schlatter, V. I. Afanasyev, and F. V. Chernyshev, “Neutral particle analyzer diagnostics on the TCV tokamak,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, no. 3, 2006, doi: 10.1063/1.2185151.
- [3] H. Kazuhisa, I. Kameo, T. Yuichiro, and K. Atsushi, “Observation of Mirror Trapped Ions and Development of a High Energy Neutral Particle Analyzer in GAMMA 10,” *Analyzer*, vol. 6, pp. 681–684, 2004.
- [4] M. Gryaznevich, “Faster fusion: ST40, engineering, commissioning, first results,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2179, 2019, doi: 10.1063/1.5135481.
- [5] S. Polosatkin *et al.*, “Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 720, pp. 42–44, 2013, doi: 10.1016/j.nima.2012.12.039.
- [6] J. J. Thomson, “LXXXIII. Rays of positive electricity ,” *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 20, no. 118, pp. 752–767, 1910, doi: 10.1080/14786441008636962.
- [7] “Photonis Magnum 5900.”  
<https://www.photonis.com/products/channeltron-electron-multipliers>.
- [8] J. F. Ziegler, “Srim-2003,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 219–220, no. 1–4, pp. 1027–1036, 2004, doi: 10.1016/j.nimb.2004.01.208.

- [9] “[https://lebowcompany.com/.](https://lebowcompany.com/)” [https://lebowcompany.com/.](https://lebowcompany.com/)
- [10] “NIST PSTAR.”  
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>.
- [11] H. O. Funsten III, “Ultrathin foils used for low-energy neutral atom imaging of the terrestrial magnetosphere,” *Opt. Eng.*, vol. 32, no. 12, p. 3090, 1993, doi: 10.1117/12.149187.
- [12] S. Kreussler and R. Sizmann, “Neutralization of 50-230-keV hydrogen ions which have penetrated Al, Au, C, and Cs films,” *Phys. Rev. B*, vol. 26, no. 2, pp. 520–529, Jul. 1982, doi: 10.1103/PhysRevB.26.520.
- [13] G. E. Iglesias and J. O. McGarity, “Channel electron multiplier efficiency for protons of 0.2-10 keV,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 42, no. 11, pp. 1728–1729, 1971, doi: 10.1063/1.1684989.
- [14] A. Egidi, R. Marconero, G. Pizzella, and F. Sperli, “Channeltron fatigue and efficiency for protons and electrons,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 40, no. 1, pp. 88–91, 1969, doi: 10.1063/1.1683757.
- [15] “COMSOL Multiphysics® v. 5.4. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden.” .
- [16] “AMDIS iaea ALADDIN database” <https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>.
- [17] C. F. Barnett, “ORNL—6086/V1 Collisions of H, H<sub>2</sub>, He and Li atoms and ions with atoms and molecules,” 1990. Page A-22 [Online]. Available: [https://amdis.iaea.org/media/db/ORNL/ORNL-Red\\_Book\\_-\\_1.pdf](https://amdis.iaea.org/media/db/ORNL/ORNL-Red_Book_-_1.pdf).
- [18] B. J. Killian, R. Cabrera-Trujillo, E. Deumens, and Y. Öhrn, “Resonant charge transfer between H<sup>+</sup> and H from 1 to 5000 eV,” *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 37, no. 24, pp. 4733–4747, Dec. 2004, doi: 10.1088/0953-4075/37/24/002.
- [19] Y. B. Band, “Charge exchange: Theory and application to proton-hydrogen-atom collisions,” *Phys. Rev. A*, vol. 8, no. 1, pp. 243–251, 1973, doi: 10.1103/PhysRevA.8.243.





С.В. Полосаткин, В.В. Белых, А.Ф. Ровенских

## **АНАЛИЗАТОР НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ST40**

**Препринт ИЯФ 2025-01**

Ответственный за выпуск М.В.Кузин  
Работа поступила 18.02.2025 г.

---

Сдано в набор 20.02.2025 г.

Подписано в печать 20.02.2025 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №1

---

Обработано на РС и отпечатано в ИЯФ СО РАН  
*Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 11.*