

04;10;12

## Влияние массового разрешения многоканального атомного анализатора на определение изотопного состава водородной плазмы

© В.И. Афанасьев, А.Б. Извозчиков, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 1995г.)

Одним из методов определения изотопного состава ионного компонента плазмы является анализ потоков атомов перезарядки, выходящих из плазмы, которые регистрируются с помощью анализаторов атомных частиц. По причине конечного массового разрешения атомных анализаторов часто возникают сложности при определении концентрации малой добавки на фоне основного компонента плазмы. Представлен метод, позволяющий оценить величину фонового сигнала и ввести коррекцию при проведении подобных измерений.

### Введение

Для изучения потоков атомов перезарядки, выходящих из плазмы, применяются многоканальные атомные анализаторы [1,2]. Атомы, покидающие плазму, ионизируются в этих приборах, а полученные вторичные ионы разделяются по массе и анализируются по энергии.

В последнее время в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы методом нейтральной инжекции и на частоте ионного циклотронного резонанса часто используется неоднородная по своему составу водородная или гелиевая плазма, в которой один из компонентов является малой добавкой. В связи с этим становится актуальной задача определения концентрации малой добавки на фоне основного компонента плазмы.

Атомные анализаторы, применяющиеся для регистрации атомов перезаряда, обладают конечным массовым разрешением (для пятиканального и десятиканального анализатора  $A/\Delta A \sim 3$ ). В результате при настройке прибора на регистрацию атомов одной массы появляется фон, связанный с атомами другой массы. Причем в случае регистрации атомов малой добавки фоновый сигнал может быть сравним по величине и даже превышать основной сигнал, тогда учет фона особенно важен.

### 1. Причины появления фона

Рассмотрим причины появления фонового сигнала в атомных анализаторах.

На рис. 1, *a* схематически показано устройство многоканального анализатора атомных частиц, элементами которого являются камера обдирки  $G$ , диспергирующая система, состоящая из электромагнита  $M$  и канальных цилиндрических конденсаторов  $C_1 - C_n$ , и набор детекторов  $D_1 - D_n$ .

Пусть в анализатор поступает поток атомов двух масс  $A_1$  и  $A_2$ , которые имеют непрерывный спектр по энергии (такая ситуация обычно реализуется на практике). Попадая в камеру обдирки, наполненную газом, часть атомов ионизируется и поступает в диспергирующую систему

прибора. Для того чтобы направить вторичные ионы с массой  $A_1$  и энергией  $E_1$  в детектор  $D_i$ , необходимо установить величины тока  $\mathcal{I}$  в обмотках электромагнита и напряжения  $\mathcal{U}$  на пластинах конденсатора  $C_i$  в соответствии с зависимостями

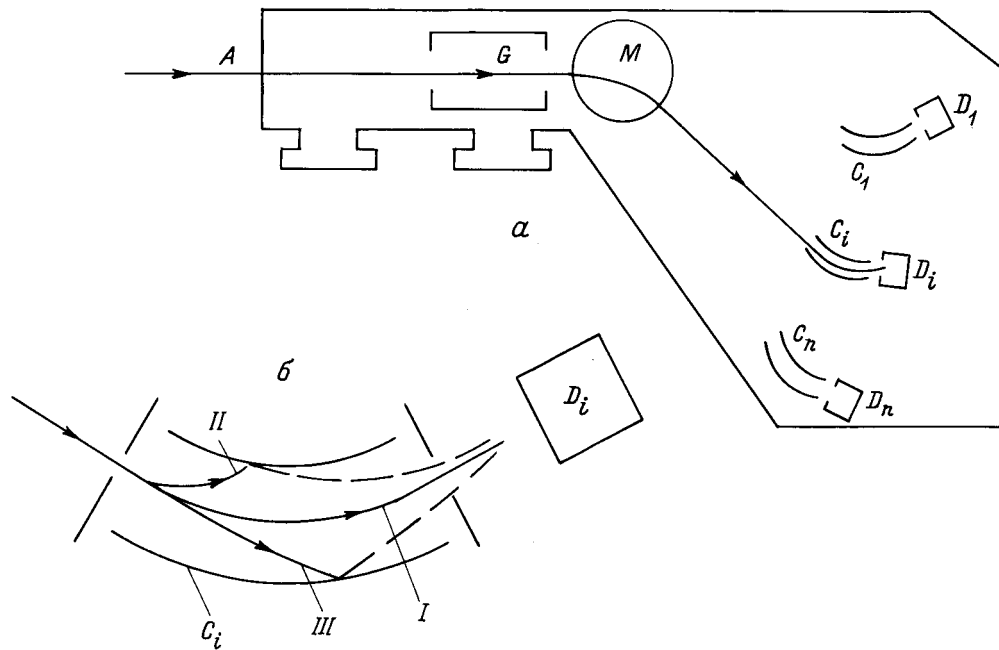
$$\mathcal{I}_1 = B_i \sqrt{A_1 \cdot E_1 / Z}, \quad (1)$$

$$\mathcal{U}_1 = K_i \cdot E_1, \quad (2)$$

где  $B_i, K_i$  — коэффициенты, полученные при калибровке анализатора;  $Z$  — заряд вторичных ионов (в случае, когда вторичными ионами являются изотопы водорода  $Z = 1$ ).

При этом частицы массы  $A_1$  и энергии  $E_1$  отклонятся в поле электромагнита на определенный угол, такой что они попадут на вход соответствующего конденсатора  $C_i$ , пройдут через его центр и будут зарегистрированы детектором  $D_i$  (рис. 1, *b*). Частицы с массой  $A_2$  и энергией  $E_2 = A_1/A_2 \cdot E_1$  также попадут на вход конденсатора  $C_i$ , так как они имеют такой же импульс, как и частицы с массой  $A_1$  и энергией  $E_1$  и, следовательно, отклонятся в поле электромагнита на тот же угол. Но в электрическом поле конденсатора траектории частиц с массой  $A_2$  будут более пологими (если  $A_2 < A_1$ ) или более крутыми (если  $A_2 > A_1$ ). Тогда при значении параметра  $A\Delta A = (A_1 + A_2)/2|A_1 - A_2|$ , большем некоторой определенной величины (для пяти- и десятиканального анализатора  $\sim 3$ ), частицы с массой  $A_2$ , не дойдя до выхода из конденсатора, попадут на его пластину (рис. 1, *b*). Но, несмотря на то что прямой пролет таких частиц в детектор отсутствует, существует вероятность их отражения от пластины конденсатора в направлении детектора, где они могут быть зарегистрированы. По-видимому, это и является главным источником фона в анализаторах представленной конструкции.

Среди прочих причин наличия фона наиболее существенными представляются отражение частиц от других конструктивных элементов анализатора и рассеяние при ионизации в камере обдирки. Влияние рассеяния частиц при ионизации на величину фонового сигнала в данной работе не анализировалось. Отметим, однако, что учет



**Рис. 1.** Схемы многоканального анализатора атомов (а) и траекторий частиц в электрическом поле цилиндрического конденсатора (б). а: А — пучок атомов, G — камера обдирки, M — электромагнит,  $G_1 \dots G_i \dots G_n$  — набор цилиндрических канальных конденсаторов,  $D_1 \dots D_i \dots D_n$  — набор детекторов; б:  $G_i$  — конденсатор;  $D_i$  — детектор; I — траектория частиц с массой  $A_1$  и энергией  $E_1$ , на регистрацию которых настроена диспергирующая система анализатора; II, III — траектории частиц с массой  $A_2$  и энергией  $E_2 = E_1 \cdot A_1/A_2$  для случаев  $A_2/A_1, A_2 < A_1$  соответственно.

рассеяния может оказаться существенным при регистрации частиц с относительно низкими энергиями около 0.2–0.7 кэВ.

## 2. Оценка величины фонового сигнала

Для оценки величины фонового сигнала можно воспользоваться следующими соображениями. При калибровке анализатора на моноэнергетическом пучке ионов можно получить так называемые контуры каналов по току и напряжению. Контур по току — это зависимость числа ионов определенной энергии и массы, зарегистрированных в данном канале, от величины тока электромагнита  $\mathcal{I}_d$ , полученная при фиксированном напряжении на канальном конденсаторе  $\mathcal{U}_d$ .

$$I_i = I_i(\mathcal{I}_d/\mathcal{I}_0) \left| \begin{array}{l} \mathcal{U}_d = \mathcal{U}_0, \\ E_0 = \text{const}, \\ A_0 = \text{const}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Контур по напряжению представляет собой зависимость числа зарегистрированных частиц от напряжения на конденсаторе, полученную при фиксированном токе,

$$U_i = U_i(\mathcal{U}_d/\mathcal{U}_0) \left| \begin{array}{l} \mathcal{I}_d = \mathcal{I}_0, \\ E_0 = \text{const}, \\ A_0 = \text{const}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Здесь  $i$  — номер канала;  $E_0, A_0$  — энергия и масса ионов;  $\mathcal{I}_d, \mathcal{U}_d$  — величины тока и напряжения, устанавливаемые на элементах диспергирующей системы;  $\mathcal{I}_0, \mathcal{U}_0$  — оптимальные значения тока и напряжения, при которых число ионов, зарегистрированных в данном канале, максимально. На рис. 2 приведены контуры по току и напряжению одного из каналов пятиканального анализатора. Подставляя в (3), (4) зависимости (1), (2), можно написать

$$I_i = I_i(\mathcal{I}_d/B_i\sqrt{A_0 \cdot E_0}),$$

$$U_i = U_i(\mathcal{U}_d/K_i \cdot E_0).$$

Допустим теперь, что в анализатор поступает пучок атомов с массой  $A_1$  и распределением по энергии  $f(E)$ . Тогда число частиц, зарегистрированных в  $i$ -м канале, энергия которых лежит в диапазоне  $dE$ , будет равно

$$dN_i = I_i(\mathcal{I}_d/B_i\sqrt{A_1 \cdot E_1}) \times U_i(\mathcal{U}_d/K_i \cdot E_1)f(E)\alpha_1(E_1)dE_1,$$

где  $\alpha_1(E_1)$  — эффективность регистрации атомов анализатором;  $I_i$  и  $U_i$  — здесь и далее контуры по току и напряжению, нормированные на единицу.

Перейдем теперь, согласно (1), (2), от величин  $\mathcal{I}_d$  и  $\mathcal{U}_d$  к  $A_d$  и  $E_d$ . Это будет означать, что диспергирующая система анализатора настроена на регистрацию в  $i$ -м канале частиц с массой  $A_d$  и энергией  $E_d$ , а в анализатор поступают частицы соответственно с массой  $A_1$  и

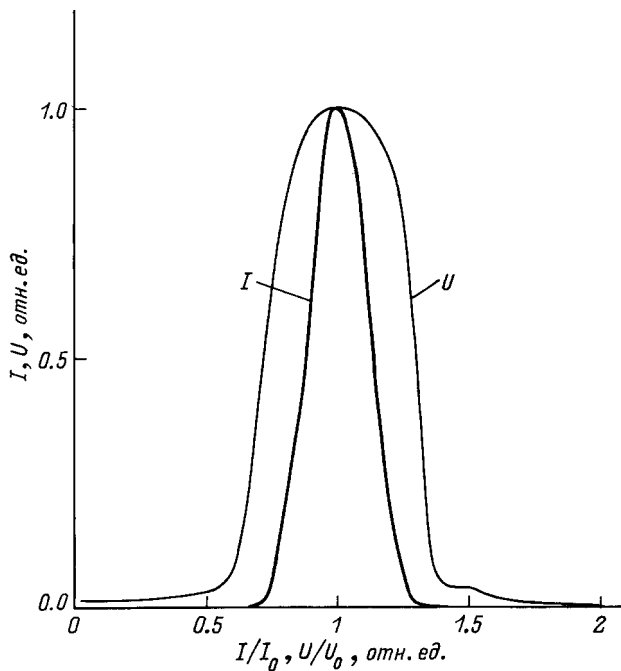


Рис. 2. *I* — контуры по току, *U* — по напряжению для одного из каналов пятиканального анализатора.

энергией  $E_1$

$$dN_i(d/1) = I_i \left( \frac{\sqrt{A_d \cdot E_d}}{\sqrt{A_1 \cdot E_1}} \right) \times U_i(E_d/E_1) f_1(E_1) \alpha_1(E_1) dE_1.$$

Полное число частиц с массой  $A_1$ , зарегистрированных в  $i$ -м канале, равно интегралу

$$N_i(d/1) = \int_0^\infty dN_i(d/1). \tag{5}$$

В том случае, когда индексы  $d$  и  $i$  совпадают (т.е.  $A_d = A_1$ ), интеграл (5) будет определять величину основного сигнала. Если же индексы  $d$  и  $i$  различны (т.е.  $A_d \neq A_1$ ), то интеграл будет определять уровень фона, связанного с частицами массы  $A_1$ .

Значение интеграла (5) зависит от нескольких факторов — сомножителей, составляющих подынтегральную функцию  $dN_i(d/1)$ . Один из них — произведение двух контуров

$$I_i U_i(d/1) = I_i \left( \frac{\sqrt{A_d \cdot E_d}}{\sqrt{A_1 \cdot E_1}} \right) U_i(E_d/E_1).$$

На рис. 3 приведены такие произведения, как функция энергии  $E_1$  для одного из каналов пятиканального анализатора, которые соответствуют основному сигналу, связанному с водородом  $I \cdot U$  (H/H), и фоновому, связанному с дейтерием  $I \cdot U$  (H/D). Как видно из рисунка, интеграл по энергии от такого произведения (т.е. площадь под кривой) для фонового дейтерия гораздо меньше, чем

аналогичный интеграл для водорода. Следует ожидать, что и полное число атомов дейтерия, определяемое интегралом (5), будет намного меньше, чем сигнал, связанный с водородом. Но наряду с этим другим сильным фактором, влияющим на число зарегистрированных частиц, является их функция распределения по энергии. Важным обстоятельством, как будет показано ниже, является то, что на практике функция распределения обычно имеет вид максвелловского распределения или более сложную форму, спадающую в сторону больших энергий.

На рис. 3 также показаны произведения  $IUf(E)$ , которые соответствуют основному сигналу, связанному с водородом  $IU(H/H)f_H(E_H)$  и дейтериевому фону  $I \cdot U_i(H/D) \cdot f_D(E_D)$ . Функции распределения частиц  $f_H(E_H)$  и  $f_D(E_D)$  взяты максвелловскими с одинаковой средней энергией. При этом считалось, что отношение общего числа атомов водорода к числу атомов дейтерия, поступающих в прибор, равно 1:10. В данном случае интеграл от таких произведений по энергии (площадь под кривой) для фонового дейтерия становится величиной того же порядка, что и аналогичный интеграл для водорода. Это вызвано не только количественным соотношением водорода и дейтерия 1:10, но и тем, что атомы водорода, регистрируемые анализатором, имеют в среднем большую энергию, чем фоновые атомы дейтерия; в результате значение функции распределения для фонового дейтерия в среднем больше, чем функции распределения для водорода в силу ее экспоненциально

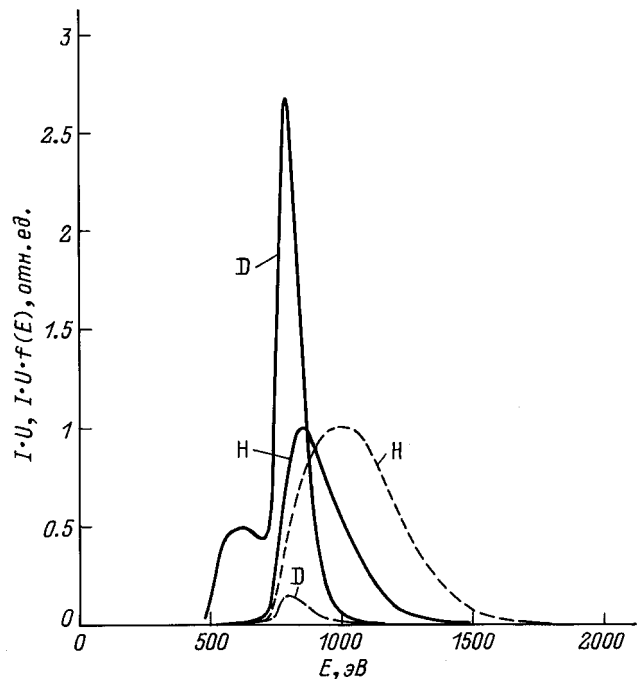
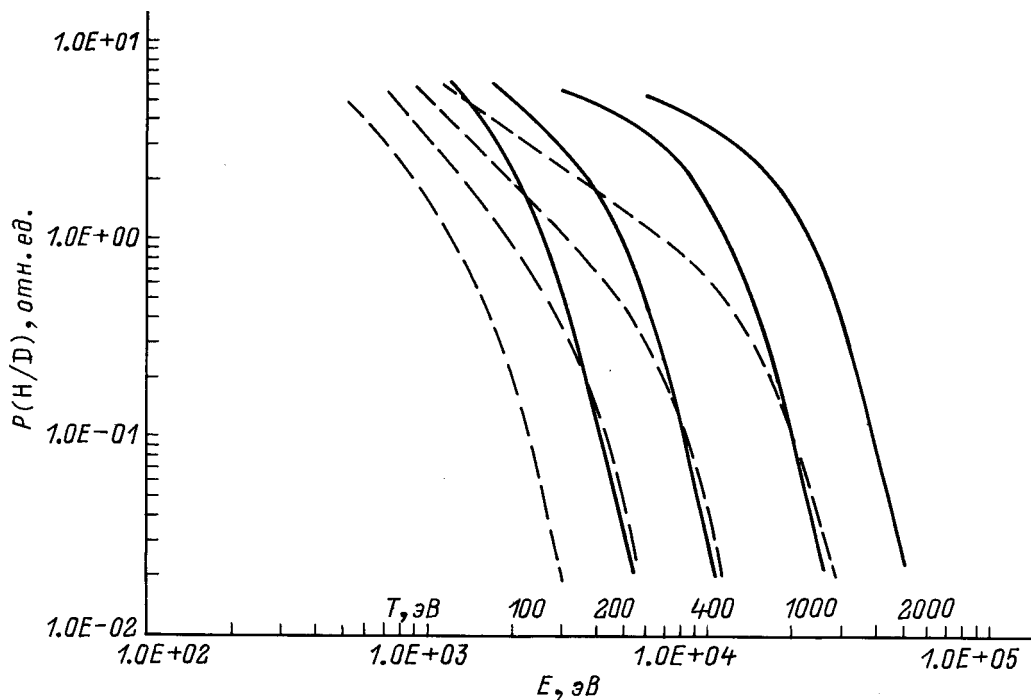


Рис. 3. Произведения  $I \cdot U$  (штриховая линия) и  $I \cdot U \cdot f(E)$  (сплошная линия), входящие в подынтегральную функцию выражения (5), в зависимости от энергии. *H* — кривые, соответствующие основному сигналу, связанному с водородом; *D* — фоновому, связанному с дейтерием.



**Рис. 4.** Факторы массового подавления для 5-го канала пятиканального анализатора (штриховая линия) и 9-го канала десятиканального анализатора (сплошная линия) в зависимости от энергии атомов водорода, регистрируемых на фоне дейтерия.

спадающего характера. Таким образом, наименее благоприятная ситуация с точки зрения отношения сигнал/фон возникает в случае, когда на фоне дейтерия регистрируется поток атомов водорода, являющийся малой добавкой.

Для количественной характеристики массового разрешения атомного анализатора удобно перейти к так называемому фактору массового подавления прибора, т.е. отношению числа частиц массы  $A_1$ , зарегистрированных в  $i$ -м канале анализатора при настройке диспергирующей системы на регистрацию частиц данной массы, к числу фоновых частиц массы  $A_2$  в этом же канале. Фактор массового подавления удобно записать в виде

$$P_i(1/2) = N_i(1/1)/N_i(1/2). \quad (6)$$

На рис. 4 показаны факторы массового подавления для пяти- и десятиканального анализаторов (для 5-го и 9-го каналов соответственно) при регистрации атомов водорода на фоне дейтерия. Водород является малой 10-процентной добавкой, а распределение частиц по энергии максвелловское. Эффективности регистрации  $\alpha(E)$  взяты для обдирки в азоте. Значения фактора массового подавления приведены в зависимости от энергии водорода, на регистрацию которого настроены анализаторы. Различные кривые соответствуют разным температурам распределений частиц. Основная тенденция поведения фактора массового подавления — это его падение с ростом энергии регистрируемых частиц и с уменьшением температуры. Объясняется такая тенденция тем, что как при увеличении энергии регистрации, так и

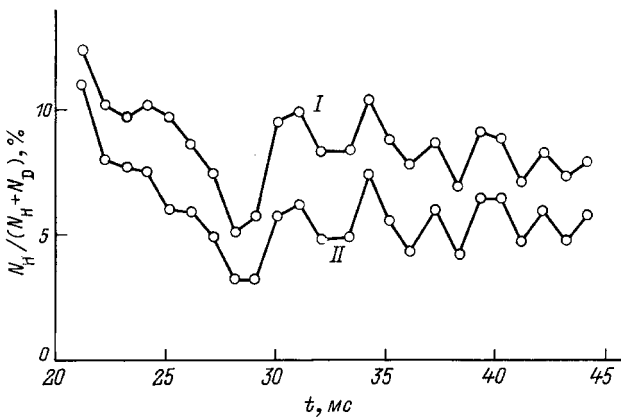
при уменьшении температуры спектр регистрируемых анализатором частиц сдвигается в область высокоэнергетичной части их функций распределения. При этом в силу экспоненциально спадающего характера функций распределения, количество атомов водорода, регистрируемых прибором, уменьшается быстрее, чем количество фоновых атомов дейтерия.

Различие в факторах массового подавления на рис. 4 для пяти- и десятиканального анализаторов обусловлено в основном двумя причинами. Это, во-первых, разная форма контуров по току и напряжению  $I_i$  и  $U_i$ , что определяется разной геометрией приборов, во-вторых, это отличие в эффективностях регистрации  $\alpha_H(E)$  и  $\alpha_D(E)$  для данных анализаторов.

### 3. Эксперименты по определению изотопного состава плазмы

Оценка влияния массового разрешения пятиканального атомного анализатора на определение изотопного состава плазмы производилась в экспериментах по нагреву плазмы на частоте ионно-циклотронного резонанса на установке Туман-3 [3]. В экспериментах использовалась дейтериевая плазма с малой (около 10%) добавкой водорода.

Для определения изотопного состава производились измерения величин потоков атомов водорода и дейтерия, имеющих одинаковую энергию, а затем вычислялось их отношение, которое и считалось относительным со-



**Рис. 5.** Временная зависимость содержания водорода в водородно-дейтериевой плазме. I — без вычета фонового сигнала, связанного с дейтерием; II — с вычетом фонового сигнала.

держанием водорода в дейтериевой плазме. Измерения производились на квазистационарном участке плазменного разряда в отсутствие ионно-циклотронного нагрева, чтобы энергетические функции распределения частиц не были возмущены введением в плазму ВЧ мощности и с хорошей точностью аппроксимировались максвелловской функцией.

Следует отметить, что определение изотопного состава производилось на основе сравнения потоков частиц с энергиями выше 700 эВ, так как в области более низких энергий значительным становится влияние на массовое разрешение анализатора рассеяния частиц в камере обдирки прибора. С другой стороны, при характерных температурах ионов на установке Туман-3 100–150 эВ, число частиц в потоке атомов более высоких энергий было недостаточным для проведения корректных с точки зрения статистики измерений.

Для учета влияния массового разрешения анализатора при определении изотопного состава плазмы применялась следующая процедура. В двух идентичных плазменных разрядах производились измерения потоков атомов водорода и дейтерия. В одном из разрядов измерялись потоки атомов водорода, а в другом — дейтерия, причем таким образом, чтобы одни и те же каналы прибора в обоих разрядах регистрировали частицы одинаковых энергий. После этого определялись (аппроксимировались максвелловской функцией) энергетические распределения частиц. Затем с помощью соотношения (6) и на основе найденных функций распределения частиц фактор массового подавления для одного из каналов анализатора. И наконец, определялось отношение содержания водорода и дейтерия в плазме в соответствии со следующей формулой:

$$N_H/N_D = (\mathcal{N}_H/\mathcal{N}_D)_i (1 + 1/P_i(H/D))^{-1} \cdot \alpha_D/\alpha_H,$$

где  $(\mathcal{N}_H/\mathcal{N}_D)_i$  — отношение числа зарегистрированных атомов водорода и дейтерия для  $i$ -го канала анализатора;

$\alpha_D, \alpha_H$  — эффективности регистрации дейтерия и водорода;  $P_i(H/D)$  — фактор массового подавления.

При определении состава смешанной плазмы удобно применять такую характеристику, как процентное содержание одного из компонентов. Так, для определения процентного содержания водорода в водородно-дейтериевой плазме использовалось выражение

$$N_H/(N_H + N_D) = (1 + (N_H/N_D)^{-1})^{-1} \cdot 100.$$

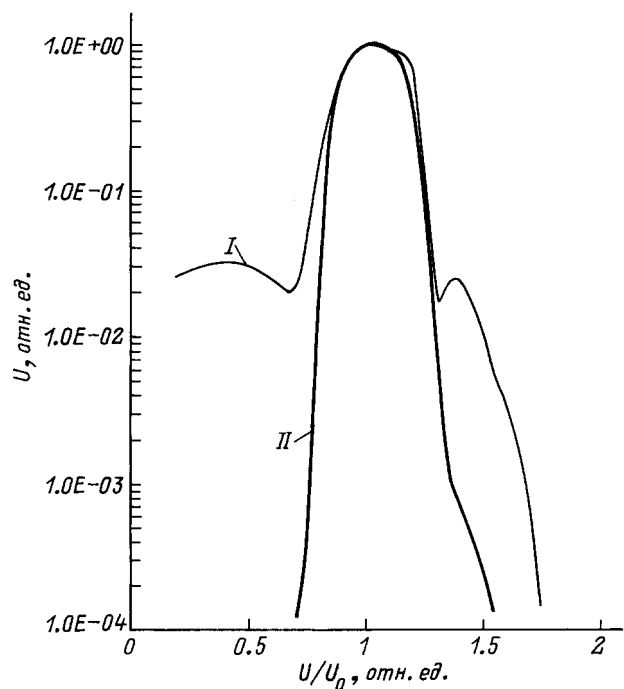
На рис. 5 представлена временная зависимость содержания водорода в водородно-дейтериевой плазме в экспериментах по ВЧ нагреву на установке Туман-3, полученная по данным 5-го канала анализатора при энергии регистрации частиц около 1000 эВ. Процентное содержание водорода, приведенное на рисунке, определялось как с учетом фонового сигнала дейтерия, так и без такого учета. В последнем случае полагалось

$$N_H/N_D = (\mathcal{N}_H/\mathcal{N}_D)_i \cdot \alpha_D/\alpha_H.$$

Отличие между двумя приведенными зависимостями составляет величину в среднем 1.5 раз, что демонстрирует важность учета массового разрешения анализатора при определении изотопного состава плазмы.

#### 4. Улучшение массового разрешения анализаторов атомных частиц

Как отмечалось выше, одной из причин появления фона в анализаторах при регистрации потока атомов нескольких масс является отражение частиц от пластин



**Рис. 6.** Контурсы по направлению одного из каналов пятиканального анализатора.

канальных конденсаторов и других элементов прибора. Таким образом, если уменьшить отражающую способность элементов прибора, расположенных вблизи траектории пучка регистрируемых частиц, можно добиться снижения фонового сигнала и тем самым повысить массовое разрешение анализатора.

Задача повышения массового разрешения многоканальных анализаторов для более точного определения состава водородно-дейтериевой плазмы встала в экспериментах по ВЧ нагреву плазмы на стеллараторе Wendelstein-7AS (Германия). Для решения этой задачи было произведено покрытие пластин канальных конденсаторов анализатора углеродной пленкой. На рис. 6 в логарифмическом масштабе показаны контуры по напряжению одного из каналов пятиканального анализатора до (I) и после (II) нанесения углеродного покрытия. На контуре, полученном до нанесения покрытия, наряду с главным максимумом, соответствующим частицам, прошедшим вблизи центра конденсатора без отражения от его пластин, в области низких и высоких энергий имеются два дополнительных пика, связанных с отражением частиц соответственно от внешней и внутренней пластины. Отсутствие таких дополнительных пиков на контуре, полученном после нанесения покрытия, свидетельствует о значительном сокращении доли отраженных от пластин конденсатора частиц.

Расчет, выполненный в соответствии с представленным в разделе 2 методом, показал, что в результате углеродного покрытия пластин канальных конденсаторов удалось повысить фактор массового подавления анализаторов в среднем в 1.5–2 раза (при характерной температуре ионов плазмы 200 эВ и уровне малой добавки водорода ~ 10%).

## Заключение

Проведенный расчет показал, что массовое разрешение многоканальных атомных анализаторов сильно зависит от условий эксперимента, а именно характеристик энергетического распределения регистрируемых частиц и от выбора энергии регистрации.

Показано, что при исследовании с помощью атомных анализаторов смешанной водородно-дейтериевой плазмы наименее благоприятной является ситуация, возникающая при регистрации водорода, являющегося малой добавкой, на фоне сигнала, связанного с дейтерием. В этом случае для коррекции результатов измерений, например при определении изотопного состава плазмы, следует производить оценку фонового сигнала, величина которого может составить значительную долю от полного сигнала.

В данной работе также приведены результаты по нанесению углеродного покрытия на элементы диспергирующей системы анализаторов как метода повышения массового разрешения.

## Список литературы

- [1] Афросимов В.В., Березовский Е.Л., Гладковский И.П. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 1. С. 56–63.
- [2] Gladkovsky I.P., Izvozchikov A.B., Petrov M.P. // Nucl. Instr. and Meth. 1980. Vol. 175. P. 441–447.
- [3] Askinazi L.G., Golant V.E., Goncharov S.G. et al. // 14 Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. Madrid, 1987. Vol. 11D. Pt. III. P. 993.