



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

**Институт атомной энергии**

им. И. В. Курчатова

*208402531*

**В.И. Дербилов, В.В. Сиднев,  
Н.М. Умрихин, В.Ф. Шевченко**

**ИАЭ-3683/7**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННЫХ СПЕКТРОВ  
ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ,  
ГЕНЕРИРУЕМЫХ МОЩНЫМ КОАКСИАЛЬНЫМ  
УСКОРИТЕЛЕМ ПЛАЗМЫ МК-500**

**Москва 1982**

УДК 533.916.08

**Ключевые слова:** ускоритель, плазма, корпускулярная диагностика, ионный спектр ионов.

Описан метод измерения ионных спектров и определения наиболее важных параметров плотного ( $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) плазменного сгустка методом пассивной корпускулярной диагностики. Приведены измеренные параметры плазмы, полученной на ускорителе МК-500. Предложен метод обработки экспериментальных данных на ЭВМ. На основе сравнения результатов различных диагностических методик сделаны выводы о достоверности данных, полученных с помощью корпускулярной диагностики.

## ВВЕДЕНИЕ

При изучении электродинамических ускорителей основное внимание уделяется получению информации о структуре и параметрах генерируемых ускорителем плазменных сгустков.

Необходимо отметить, что в настоящее время такая информация представляет в равной мере как физический (изучение механизма ускорения плазмы и взаимодействия плазменных сгустков с магнитными полями), так и прикладной интерес, поскольку сфера применения инжекторов становится чрезвычайно разнообразной. Их используют не только для приготовления предварительной плазмы в различного рода экспериментальных установках и заполнения магнитных ловушек, но и в качестве плазменных реактивных двигателей, в МГД-преобразователях энергии, в плазменной технологии и т.д. [1]. В зависимости от назначения к плазменному сгустку предъявляются требования, касающиеся его скорости, плотности, электронной и ионной температур, содержания примесей, распределения всех этих величин по длине сгустка и т.д.

Широкий круг возникающих при этом диагностических задач успешно решается, в частности, методами корпускулярной диагностики [2, 3]. В настоящее время наблюдается усиленное развитие этих методов. Оно обусловлено как ценностью получаемой с их помощью информации, так и тем, что диапазон параметров плазмы, в котором их можно применять, обычно труднодоступен для традиционных диагностик (различного рода зонды, СВЧ-методика и т.п.). Корпускулярная диагностика в принципе дает возможность получить информацию практически обо всех наиболее важных параметрах плазмы: о плотности ионов и нейтральных атомов, об ионной и электронной температурах, об энергии направленного дви-

жения ионов, а также о распределении электрических и магнитных полей в плазме [2]. Методы корпускулярной диагностики обладают достаточно высокой пространственной и временной разрешающей способностью, и многие из них являются бесконтактными. Перечисленные достоинства стимулировали развитие этих методов и, несмотря на относительную громоздкость аппаратуры, определили успех при их использовании.

В настоящей работе описывается методика анализа ионной компоненты плотного ( $n \geq 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) плазменного сгустка применительно к установке МК-500. Приводятся результаты экспериментальных измерений и сравнительной проверки метода. Дано описание диагностической аппаратуры. Предложен метод обработки экспериментальных данных на ЭВМ. В заключение излагаются выводы, следующие из полученных экспериментальных результатов.

## МЕТОДИКА ПРЯМОГО АНАЛИЗА ИОННЫХ СПЕКТРОВ

Для целей настоящей работы (изучение ионных спектров движущегося плотного плазменного сгустка) наиболее предпочтительным является метод прямого анализа ионной компоненты плазмы. Применение других методов либо не дает достаточной информации для восстановления энергетических спектров ионов, либо связано с большими техническими трудностями.

Анализ нейтралов перезарядки, например, при плотностях плазмы  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и температуре ионов  $\sim 30 \text{ эВ}$  (что соответствует длинам перезарядки  $\sim 1 \text{ см}$ ) позволяет получить информацию об ионном распределении лишь в поверхностном слое сгустка. Центральная же часть потока остается недостижимой для этого метода [2].

В свою очередь, метод зондирования плазмы нейтральным пучком [2] сопряжен с техническими трудностями. Для атомов низкой энергии (порядка нескольких килоэлектронвольт) исследуемый сгусток является непрозрачным, а использование пучка атомов высокой энергии ( $\sim 1 \text{ мэВ}$ ) для зондирования плазмы влечет за собой усложнение диагностической аппаратуры. Кроме того, информация, получаемая этим методом, носит, как правило, интегральный по толщине сгустка характер. Для проведе-

ния локальных измерений необходимо, чтобы плазма находилась в стационарном и хорошо известном магнитном поле [2].

Следует отметить, что анализ заряженных частиц, выходящих из плазмы, может быть использован для определения параметров самой плазмы лишь в тех случаях, когда состав и спектр частиц не искажается на пути от плазменной установки к измерительному прибору.

Как показано в [4], искажения ионных спектров при отборе и транспортировке ионов из плазмы могут быть сведены до допустимых значений лишь для достаточно быстрых плазменных скруток (энергии центра масса  $E_0 > 1$  кэВ, число Маха  $M > 3,2$ ).

Экспериментальные условия, обеспечивающие минимальные искажения ионных спектров, подробно обсуждались в работах [4, 5]. Процедура анализа ионной компоненты в основном сводится к следующему: из плазменного потока большой плотности ( $\sim 3 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ) при помощи специальной системы отбора выделяется бесстолкновительная плазменная струя пониженной плотности ( $\sim 10^8$  см $^{-3}$ ) с последующим выделением ионного пучка для электростатического анализа по энергии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Эксперименты проводились на установке МК-500, представляющей собой импульсный коаксиальный электродинамический ускоритель плазмы. Схема установки и расположения диагностической аппаратуры приведены на рис. 1.

Ускоритель запитывается от малоиндуктивной конденсаторной батареи ( $C_0 = 700$  мкФ,  $L_0 = 25$  нГн). Диапазон рабочих напряжений в описываемых экспериментах 10 – 30 кВ.

Для измерения параметров плазмы и определения режима ускорителя применялась следующая диагностическая аппаратура:

1. Ток разряда и напряжение на ускорителе измерялись поясом Роговского 8 и омическим делителем напряжения 1.

2. Плотность плазменного потока, на выходе из ускорителя измерялась с помощью интерферометра Маха – Цандера с лазерным осветителем 4 ( $\lambda = 6945$  Å).

3. Магнитное поле регистрировалось пристеночными зондами 5, расположение которых указано на схеме.

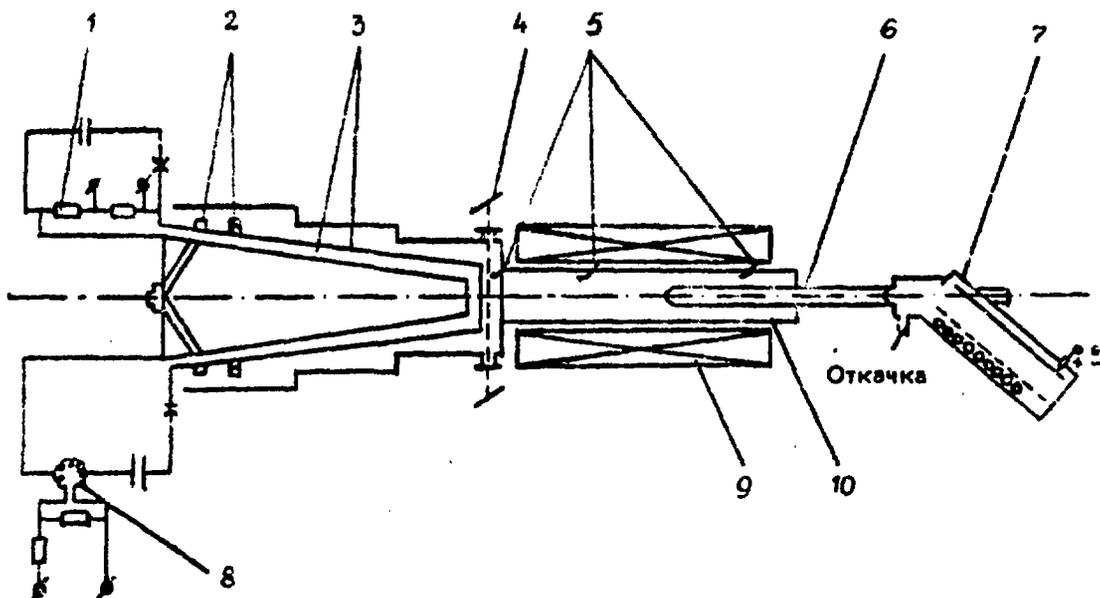


Рис. 1. Схема установки и расположение диагностической аппаратуры: 1 — омический делитель напряжения; 2 — кольцевой клапан; 3 — электроды ускорителя; 4 — интерферометр; 5 — магнитные зонды; 6 — система отбора; 7 — электростатический анализатор; 8 — пояс Роговского; 9 — соленоид; 10 — плазмопровод

4. Датчиками давления, установленными на торце плазмопровода, измерялся скоростной напор плазменного потока (на схеме не обозначены).

5. Энергетические спектры ионов плазменного потока определялись методом пассивной корпускулярной диагностики с помощью электростатического анализатора 7.

6. Синхронизация всех методик осуществлялась с помощью искрового разрядника, свет которого регистрировался на фотопленке, а сигнал с шунта разрядника — на соответствующих осциллограммах.

Магнитное поле создавалось соленоидом и в описываемых экспериментах менялось от 1 до 3 кГс.

## АНАЛИЗАТОР ИОННЫХ СПЕКТРОВ

1. Устройство анализатора и системы отбора. Несмотря на сравнительную простоту одноканальных электростатических анализаторов, предпочтение было отдано многоканальному. Это объясняется тем, что для снятия энер-

гетических спектров ионов с помощью одноканального анализатора необходимо многократное повторение эксперимента, тогда как многоканальный позволяет получить ту же информацию в ходе одного измерения.

В настоящей работе использовался 9-канальный электростатический анализатор типа плоского зеркала с углом отклонения исследуемого пучка на  $90^\circ$ .

Он был установлен в 300 см от торца электродной системы ускорителя. Система отбора корпускулярной диагностики располагалась внутри плазмопровода вдоль его оси.

Из плотного плазменного сгустка, генерируемого ускорителем, с помощью конической диафрагмы  $D_1$  (рис. 2) вырезалась тонкая плаз-

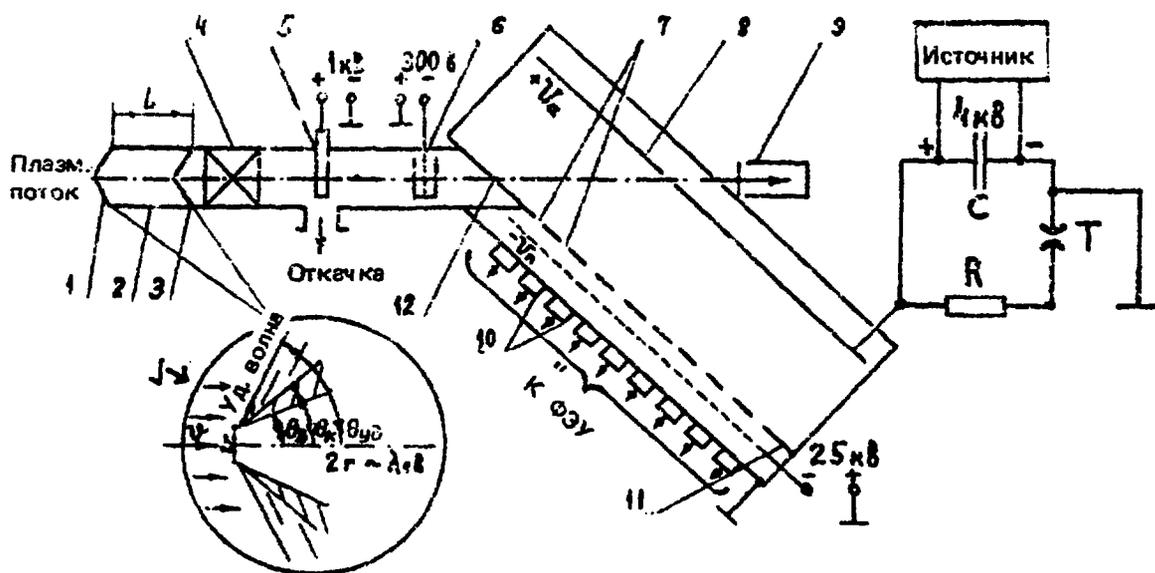


Рис. 2. Схема корпускулярной диагностики и калибровки анализатора: 1 — выделяющая диафрагма  $D_1$ ; 2 — трубка дрейфа; 3 — диафрагма  $D_2$ ; 4 — клапан шкиберный; 5 — ионный источник; 6 — разделяющая сетка с диафрагмами; 7 — выходные отверстия; 8 — высоковольтная пластина; 9 — цилиндр Фарадея; 10 — пластмассовые сцинтилляторы; 11 — заземленная пластина; 12 — выходное отверстие

менная струя. Она двигалась вдоль трубки дрейфа 2, где происходил ее свободный разлет. Трубка дрейфа и диафрагма  $D_1$  выполнены из стали АРМКО. Диафрагма представляла собой полый конус с углом при вершине  $\theta_k = 45^\circ$ .

Диаметр отверстия в вершине конуса — 1 мм, внутренний угол диафрагмы  $\theta_v = 30^\circ$  (см. рис. 2). Длина трубки дрейфа  $L = 150$  см,

внешний диаметр — 62 и внутренний — 50 мм. Соединение диафрагмы и трубки дрейфа резьбовое. Из плазменного потока пониженной плотности при помощи диафрагмы  $D_2$  3 (аналогичной  $D_1$ ) и разделяющей сетки 6 выделялся узкий пучок ионов, который попадал затем в анализатор. После отклонения анализирующим полем ионы могли покидать конденсатор через девять отверстий 7 в заземленной пластине 11. Анализирующее электрическое поле создавалось пластинами 11 и 8 длиной 236 и шириной 56 мм. Во избежание искажений однородности поля и для уменьшения габаритов конденсатор был набран из семи пластин, расположенных на расстоянии  $h = 10$  мм друг от друга.

В описываемых экспериментах на высоковольтную пластину 8 подавался положительный потенциал в диапазоне  $U_a = 3 \div 7$  кВ. Угол влета анализируемого пучка в анализатор составлял  $45^\circ$ . Выходные отверстия анализатора 7 диаметром 1 см располагались вдоль прямой на расстоянии 2 см, входное отверстие 12 имело диаметр 3 мм. За выходными отверстиями на изоляторах располагались ионно-электронные преобразователи [7] (ИЭП), на которые подавалось отрицательное напряжение  $U_n = 20$  кВ.

Ионно-электронный преобразователь выполнен в виде цилиндра со скошенным дном. Ионы, ускоренные напряжением  $U_n$ , попадали на ИЭП и выбивали вторичные электроны, которые вытягивались тем же напряжением  $U_n$  и попадали на пластмассовые сцинтилляторы 10. На сцинтилляторы напылена тонкая ( $\sim 1000 \text{ \AA}$ ) алюминиевая пленка. Свечение сцинтиллятора при бомбардировке ускоренными электронами регистрировалось ФЭУ. Использовались малогабаритные ФЭУ-63 с коэффициентом усиления по току  $\sim 10^4$ . Делители напряжения для питания ФЭУ смонтированы в контейнерах, экранированных от электромагнитных помех. Блок ФЭУ и эмиттерных повторителей выполнен выносным. Свет сцинтилляторов передавался к ФЭУ через световоды с коэффициентом передачи  $\sim 0,5$ . Коэффициент передачи эмиттерных повторителей  $\sim 1$ . Сигналы с повторителей подавались на входы запоминающих осциллографов СВ-2. Напряжения  $U_a$  и  $U_n$  подводились через высоковольтные вводы. Для измерения величины тока неотклоненного пучка в пластине высокого напряжения по оси движения пучка имелось отверстие, за которым располагался цилиндр Фарадея 9. Через это же отверстие в пластине конденсатора производилась осевая юстировка системы анализатор — коллиматор при сборке. Прибор устанавливался на стойке, которая была снабжена юстировочными приспособлениями. Вакуум в установке создавался турбомолекулярным насосом ТМН-200 и поддерживался на уровне  $10^{-5}$  мм рт.ст.

2. **Схема калибровки анализатора.** Для калибровки анализатора применялся источник ионов  $\text{Li}^+$ , аналогичный использованному в [4]. Он обеспечивал получение пучка ионов с энергией до 2 кэВ при токе  $J \sim 10^{-12} \div 10^{-9}$  А в апертуре  $\sim 2^\circ$ .

Источник 5 вводился в коллиматор после диафрагмы  $D_2$  через специальное отверстие (рис. 2). Отсечка анализатора от атмосферы осуществлялась клапаном 4. На отклоняющие пластины подавалось напряжение  $U_a$  с конденсатора  $C = 0,015$  мкФ, который заряжался до  $U_c = 4$  кВ. После срабатывания триатрона Т происходил разряд конденсатора С через сопротивление R ( $R = 700$  кОм) и напряжение  $U_a$  экспоненциально падало с характерным временем  $RC \approx 10$  мс. Отклоненный калибровочный пучок поочередно попадал во все каналы начиная с первого. Ток на выходах ФЭУ записывался на запоминающем осциллографе С8-2. По амплитудам калибровочных сигналов определялись относительные величины коэффициентов усиления по току всех каналов. Как показано в [4], ошибка в определении коэффициентов усиления из-за различия коэффициентов вторичной эмиссии  $K_3$  электронов для ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{D}^+$  оказывается малой ( $\sim 5 - 7\%$ ). Там же показано, что  $K_3$  слабо зависит от энергии ионов (при  $E_i \sim 20$  кэВ), поэтому в настоящих экспериментах  $K_3$  считалось величиной постоянной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились при напряжениях на электродах ускорителя 20 кВ и временах задержки 400 мкс (в этом режиме работы ускорителя наблюдаются максимальные сигналы датчиков давления, что соответствует максимальному энергосодержанию головной части сгустка).

В ходе предварительных экспериментов было зафиксировано присутствие паразитных шумов в первых двух каналах анализатора и частично в третьем. Эксперимент, проведенный при нулевом напряжении на отклоняющих пластинах, показал, что сигналы в первых двух каналах не исчезают как следовало бы ожидать. Их появление нельзя объяснить попаданием в ФЭУ плазменного света, так как при отключении напряжения на ИЭП они исчезают. Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемые сигналы обусловлены корпускулярным шумом, возникающим, вероятнее всего, из-за бомбардировки входной диафрагмы и высоковольт-

ной пластины анализатора быстрыми ионами и нейтралами, присутствующими в ионном пучке. В результате положительно заряженные частицы, выбитые с поверхности диафрагмы и пластины, попадают в первые два канала.

В дальнейших экспериментах напряжения на анализаторе подбирались таким образом, чтобы максимумы измеряемых ионных спектров приходились на 5-й и 6-й каналы. Таким образом, в большинстве экспериментов ионные спектры восстанавливались по сигналам последних семи каналов.

Типичная осциллограмма сигналов приведена на рис. 3. Длительность сигнала ( $\sim 1,5$  мкс) хорошо согласуется с длительностью соот

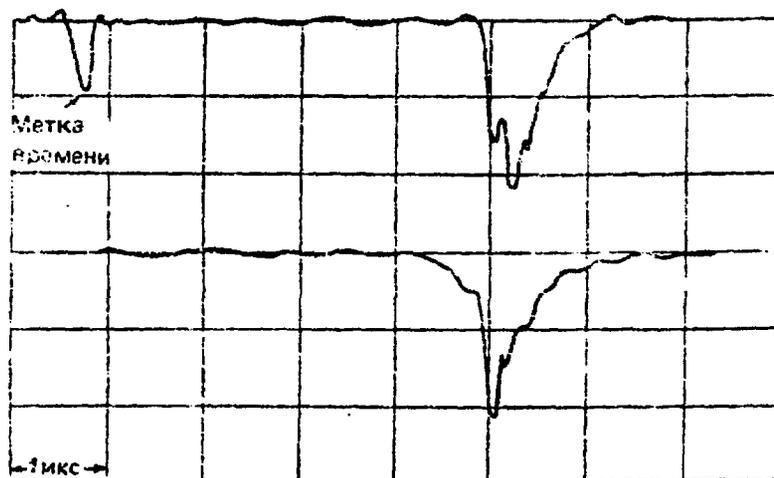


Рис. 3. Типичный вид сигналов (5-й и 6-й каналы анализатора)

ветствующих сигналов диамагнитных зондов. Амплитуды сигналов, пересчитанные согласно калибровочным коэффициентом и измеренные в один и тот же момент времени, дают точки ионного спектра, соответствующие энергиям каналов.

При обработке измеренного спектра предполагалось наличие в плазме максвелловского распределения по скоростям. Для корректности аппроксимации полученных экспериментальных спектров максвелловской функцией необходимо выполнить следующее условие:

$$\tau_{np} \gg \tau_{ii} \quad (1)$$

где  $\tau_{np}$  — время пролета плазмы от ускорителя до анализатора;

$\tau_{ii}$  — время ион-ионных столкновений,

$$\tau_{ii} = 3 \cdot 10^6 \frac{T_i^{3/2} (\text{эВ})}{n_i (\text{см}^{-3})} \quad (2)$$

Это накладывает определенные ограничения на  $T_i$ , а именно:

$$T_i < \left( \frac{L \cdot n_i}{3 \cdot 10^5 \cdot v_{||}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

где  $L$  расстояние от ускорителя до анализатора;  $n_i$  — плотность ионов на выходе ускорителя;  $v_{||}$  — скорость движения плазменного образования. Для величин плотности  $n_i \sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $L = 3 \text{ м}$  и  $v_{||} \sim 6 \div 8 \cdot 10^7 \text{ см/с}$  аппроксимация будет корректной при  $T_i < 125 \text{ эВ}$ .

В данной работе аппроксимация экспериментальных точек спектра проводилась при помощи ЭВМ ЕС-1010. Использовался метод минимизации функционала среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой. В качестве аппроксимирующей функции была взята [5]

$$F = \text{const} \cdot T_i^{-3/2} \cdot E_z \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{E_z - \phi_p} - \sqrt{E_0}}{T_i}\right) \quad (4)$$

где  $T_i$  — температура ионов;  $E_z$ ,  $E_0$ ,  $\phi_p$  — энергия, измераемая анализатором, энергия центра масс и энергия, приобретенная ионами на разности потенциалов между плазмой и анализатором.

Для иллюстрации работы программы обратимся к ее блок-схеме (рис. 4).

В ЭВМ вводятся амплитуды сигналов в каналах анализатора в фиксированный момент времени, величина напряжения  $U_a$  на отклоняющих пластинах и числа определяющие требуемую точность аппроксимации. Эти данные попадают в предварительный блок программы, где определяются границы области ожидаемых значений параметров  $T_i$  и  $E_0$ , и грубо оцениваются их численные значения (в большинстве экспериментов потенциал плазмы оказался нулевым, поэтому в качестве параметра он здесь рассматриваться не будет). Из предварительного блока весь набор данных передается в блок минимизации функционала  $R(E_0, T_i)$  среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек от кривой  $F$  по параметру  $T_i$ .

$$R(E_0, T_i) = \sum_{k=1}^g [C \cdot F(E_0, T_i, E_z^k) - A_k]^2 \quad (5)$$

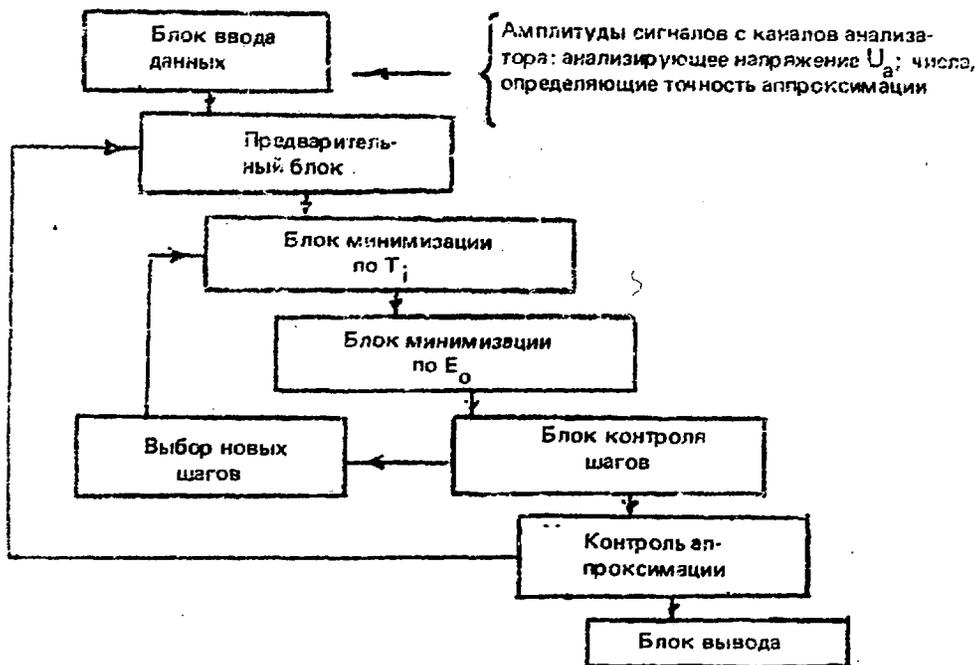


Рис. 4. Блок-схема программы восстановления ионных спектров по экспериментальным точкам

где  $K$  — номер канала;  $A_K$  — амплитуда сигнала в  $k$ -м канале.

В блок минимизации  $R$  по параметру  $E_0$  передается уже новое значение  $T_i$  и там отыскивается значение  $E_0$ , соответствующее минимуму  $R$  при этом  $T_i$ . Затем уточненные значения  $T_i$  и  $E_0$  вновь попадают в блок минимизации по  $T_i$  и т.д.

Контрольный блок следит за тем, чтобы шаг сетки параметров  $T_i$  и  $E_0$  не оказался меньше заданного предельного значения. По достижении требуемой точности параметры  $T_i$  и  $E_0$  выводятся на печать.

Следует отметить, что нормировочная константа  $C$  в (5) вычисляется из условия

$$C \cdot \sum_{k=1}^8 [(F_k + F_{k+1})/2 \cdot \Delta E] = \sum_{k=1}^8 [(A_k + A_{k+1})/2 \cdot \Delta E], \quad (6)$$

где  $\Delta E$  — расстояние между соседними каналами (кэВ). Константа  $C$

отличается от плотности ионов на постоянный для данного эксперимента множитель. Это дает возможность построить временную зависимость плотности плазмы в относительных единицах.

Работа программы проверялась при восстановлении заранее заданной спектральной функции. С точностью до шага по параметрам  $T_i$  и  $E_0$  ЭВМ восстанавливала искомый спектр по точкам, соответствующим энергиям каналов анализатора. Далее тестовая функция возмущалась быстропеременным косинусом с различными амплитудами. Результаты тестовых экспериментов позволяют сделать вывод, что относительная ошибка в определении параметров тестовой функции растет медленнее, чем относительное отклонение возмущенной кривой от невозмущенной. При уровне возмущения тестовой кривой  $\sim 30\%$  ошибка в определении  $T_i$  и  $E_0$  начинает расти так же, как и возмущение.

Типичный вид спектра, восстановленный по экспериментальным точкам с помощью ЭВМ, приведен на рис. 5. Соответствующие параметры плазмы имеют следующие значения: потенциал плазмы  $\varphi_p = 0$ , ионная температура  $T_i = 38$  эВ и энергия центра масс  $E_0 = 6,5$  кэВ, что хорошо согласуется с данными диамагнитных зондов (из зондовых измерений  $E_0 \approx 6,4$  кэВ).

Кроме того, используя формулу [8]

$$p = \frac{8}{3} \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (8)$$

$E_0$  можно оценить по сигналам датчиков давления. Типичные значения давления, регистрируемые в экспериментах,  $p \sim 100$  атм, что дает  $E_0 \sim 7$  кэВ.

На рис. 6 приведены энергетические спектры плазменного потока, полученные в одном пуске ускорителя для различных моментов времени. Основным результатом обработки этих спектров является прямое определение направленной энергии частиц в головной части сгустка, поскольку именно эта величина имеет решающее значение для термоядерных приложений. В зависимости от режима ускорителя она оказывается равной  $E_0 = 6 \div 10$  кэВ и слабо меняется по длине потока в течение первых 1 – 2 мкс.

График поведения параметров плазмы по длине сгустка, полученный из обработки спектров (рис. 6), приведен на рис. 7. Интерферометрические измерения показывают, что за головной частью сгустка с малой плотностью ( $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$ ) следует плазма с плотностью  $n \sim 10^{16}$  см $^{-3}$ , т.е. на порядок больше, чем во фронте потока. В то же

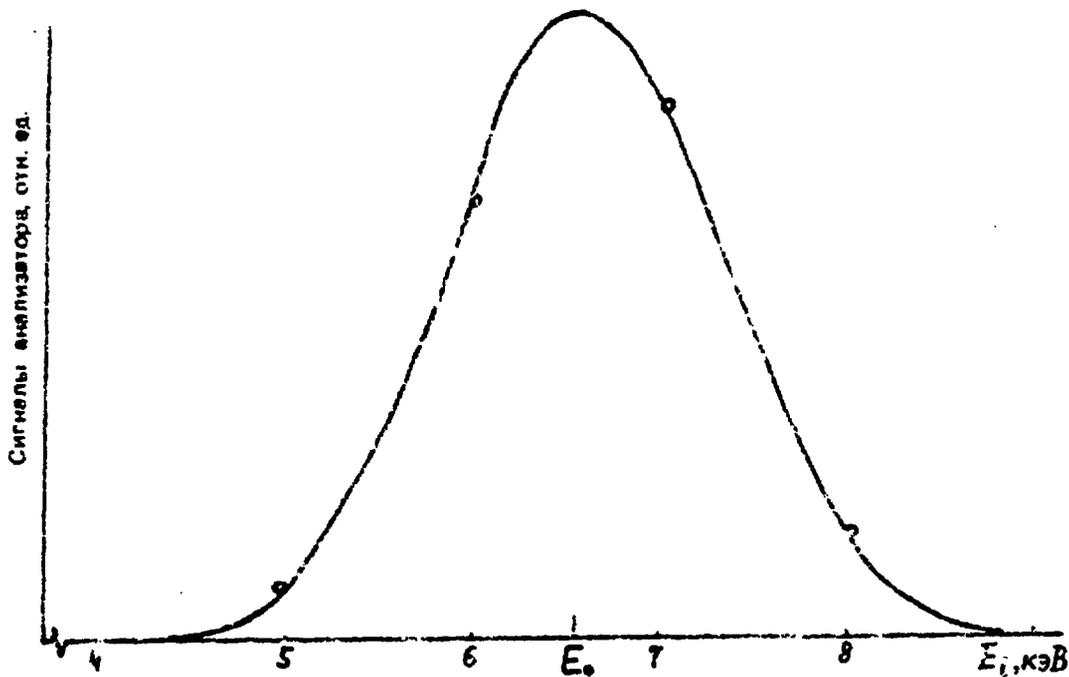


Рис. 5. Ионный спектр, восстановленный по экспериментальным точкам с помощью ЭВМ ЕС-1010.  $E_0 = 6,53$  кэВ;  $T_i = 38$  эВ

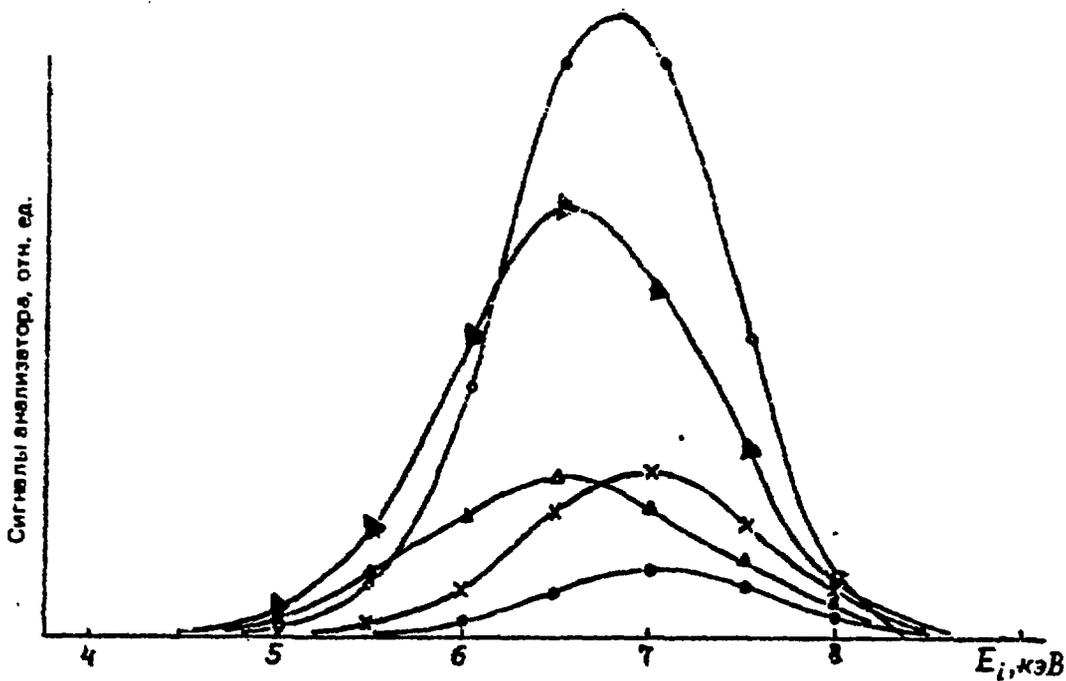


Рис. 6. Энергетические спектры ионов в различных временных сечениях: ● — 4,00 мс; × — 4,25 мс; ○ — 4,50 мс; ▲ — 4,75 мс; △ — 5,00 мс

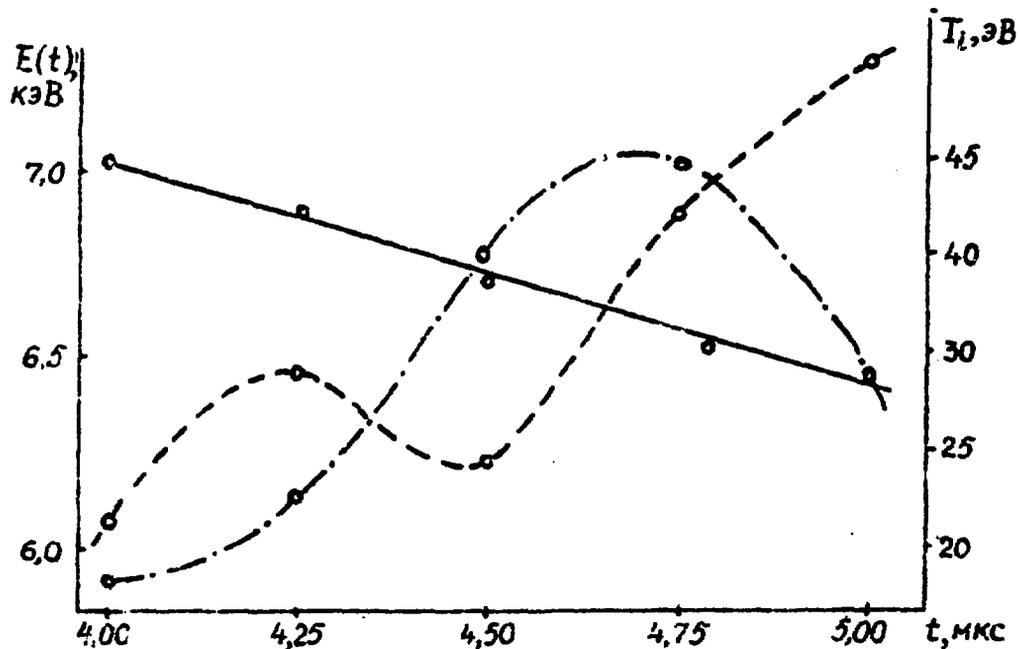


Рис. 7. Зависимость параметров плазменного сгустка от времени: — — —  $E_0$  (кэВ); — — — —  $T_i$  (эВ); — · — · —  $N$  (отн. ед.)

время по данным диамагнитных зондов скорость этой плазмы в 3 — 4 раза ниже, чем скорость фронта, и максимум энергетического спектра этой части потока лежит в области  $E_0 \sim 0,5 \div 1$  кэВ.

Энергетические спектры ионов, полученные в том же режиме работы ускорителя, но при напряжении на пластинах анализатора  $U_a = 3$  кВ, показали, что в этой области энергий действительно регистрируется плазма с плотностью, превышающей плотность головной части, приходящая в анализатор на 2 — 3 мкс позже головной части. Энергия направленного движения этой части потока составляет  $E_0 \sim 3,5$  кэВ и монотонно спадает по длине сгустка, что также соответствует данным диамагнитных зондов.

Температуры ионов во всех исследованных режимах работы ускорителя невелики и составляют  $T_i = 20 \div 50$  эВ, что находится в хорошем

соответствии со значениями  $T_e$ , полученными из диамагнитных и интерферометрических измерений.

Результаты калибровки в сочетании с приведенными выше оценками и численными экспериментами по обработке результатов дают основания считать достаточно достоверными данные, полученные с помощью корпускулярной диагностики.

## ВЫВОДЫ

1. Создана методика для измерения ионных спектров и определения наиболее важных параметров плотного ( $n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), высокоэнергетического ( $E_e \sim 10 \text{ кэВ}$ ) плазменного сгустка с большой степенью точности, хорошим временным ( $\sim 0,2 \text{ мкс}$ ) и пространственным ( $\sim 1 \text{ мм}$ ) разрешением.

2. Проведены прямые измерения энергетических спектров ионной компоненты плазменного сгустка, генерируемого мощным коаксиальным плазменным инжектором МК-500. Измерения показали, что основные параметры плазмы лежат в диапазонах:

$$E_e = 6 \pm 10 \text{ кэВ,}$$

$$T_e = 20 \pm 50 \text{ эВ,}$$

$$q_e = 0$$

3. Сравнительный анализ результатов измерений, проведенных при помощи описанной методики на ускорителе МК-500, дал хорошее соответствие с данными других диагностик.

## Список литературы

1. Морозов А.И. Физика и применение плазменных ускорителей. Минск: Наука и техника, 1974.
2. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1980.
3. Ошер Дж. Корпускулярная диагностика. — В кн.: Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967, с. 438.
4. Завада П.И., Калмыков Ю.Т. и др. Анализ ионной компоненты движущейся плазмы. Харьков, Препринт ХФТИ 74-16, 1974.
5. Завада П.И., Калмыков А.А. и др. Особенности формирования пучков из движущейся плотной плазмы для анализа спектров ионного ком-

понента. Препринт ХФТИ 77-39, 1977.

6. Sidnev V.V., Skvortzov Yu.V., Solovyeva V.G., Umrikhin N.M. Proc. XV Int. Conf. on Phenomena in ionized gases 1981. Contributed Papers, Part II, Minsk, 1981, p. 903 -- 904.
7. Афросимов В.В. и др. Метод исследования потока атомов, испускаемых плазмой. – ЖТФ, 1960, т. 30, вып. 12, с. 1456.
8. Станюкович К.П. Неустойчивые движения сплошной среды. М.: Наука, 1971, с. 262.

**Редактор О.В. Базанова**  
**Технический редактор Н.И. Мазаева**  
**Корректор Г.Я. Кармадонова**

**Т-11292. 15.07.82. Формат 60х90/16. Уч.-изд.л. 1,0.**  
**Тираж 130. Цена 15 коп. Индекс 3624. Заказ 2811**

**Отпечатано в ИАЗ**

## **РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЗ**

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика
  
3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов
  
6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора
  
9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение
  
12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология
  
14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЗ.



Препринт ИАЭ-3683/7. М., 1982