



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

---

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

кафедра физики колебаний

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПОТЕНЦИАЛА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА МЕТОДОМ  
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Дипломная работа студента 6-го курса  
Красильникова Ивана Александровича

Допущен к защите «    » декабря 2008 года

Научный руководитель

Зав. кафедрой физики колебаний  
профессор

А.С. Логгинов

кандидат физ.-мат. наук  
ведущий научный сотрудник ИЯС  
РНЦ «Курчатовский институт»  
А.В. Мельников

---

Москва 2008 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 3  |
| 1. Принцип измерений параметров плазмы пучком тяжелых ионов..... | 4  |
| 2. Измерительный тракт диагностики.....                          | 7  |
| 3. Фокусировка пучка.....  | 9  |
| 4. Методы обработки сигнала с детекторных пластин.....           | 12 |
| 5. Экспериментальные результаты.....                             | 13 |
| • Обработка экспериментальных данных на токамаке Т-10.....       | 19 |
| • Обработка экспериментальных данных на стеллараторе ТЖ-II.....  | 28 |
| Заключение.....  | 31 |
| Литература.....  | 33 |

## ВВЕДЕНИЕ

Токамак – лабораторная термоядерная установка для исследований в области термоядерного синтеза. Температура электронов в ней порядка 1 -10 кэВ.

Диагностика столь горячей плазмы требует развития специальных бесконтактных (невозмущающих) методов исследований параметров плазмы.

Методы диагностики плазмы делятся на пассивные и активные. Пассивные представляют собой регистрацию корпускулярного и волнового излучения плазмы. Активные методы — это зондирование плазмы радиоволнами, лазерным излучением, пучками частиц.

Метод зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов впервые был реализован в конце шестидесятых годов Р.Л. Хикоком и Ф.К. Джобсом на маленькой установке дугового разряда [1]. Для изучения электрического потенциала термоядерной плазмы этот метод впервые был использован в США на токамаке ST [2].

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов – один из современных многоцелевых методов исследования горячей плазмы. Это уникальный прямой метод измерения электрического потенциала плазмы.

Диагностика является на данный момент одной из важных задач в области физики термоядерной плазмы. Знание распределения электрического поля и его потенциала необходимо для предсказания удержания плазмы и развития плазменных неустойчивостей различной природы.

Цель дипломной работы – исследование колебаний потенциала и плотности плазмы методом ее зондирования пучком тяжелых ионов на двух установках: на токамаке T-10 в диапазоне частот  $f < 50$  кГц и на стеллараторе TJ-II в диапазоне частот  $f < 250$  кГц, изучение их корреляционных свойств, а также нахождение дальних корреляций между колебаниями в основной плазме (данные диагностики тяжелым пучком) и на периферии плазменного шнура (данными Ленгмюровского зонда).

## 1. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

К настоящему времени метод диагностики плазмы пучком тяжелых ионов достиг статуса одной из наиболее информативных многоцелевых диагностик. Он позволяет выполнять измерения с высоким временным и пространственным разрешением в объеме термоядерной плазмы [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Сущность метода диагностики плазмы пучком тяжелых ионов состоит в следующем. Ионный источник, расположенный вне плазмы, инжектирует пучок однократно ионизованных ионов, называемый первичным пучком, в меридиональной плоскости, перпендикулярной оси плазменного шнура (см. Рис. 1). В современных термоядерных установках обычно используются ионы  $Cs^+$  или  $Tl^+$  с энергиями в несколько сотен кэВ. При прохождении пучка через плазму некоторые из ионов могут испытать вторичную ионизацию электронным ударом, образуя при этом вторичные двукратно заряженные частицы, которые движутся по траекториям, имеющим в два раза меньший радиус. Таким образом, вдоль всей первичной траектории образуется веер вторичных частиц. На пути вторичного веера устанавливается энергетический анализатор ионов с малой входной апертурой, в которую попадает часть вторичного веера, называемая вторичным пучком. (См. рис. 1.)

Кинетическая энергия вышедших из плазмы двукратно ионизованных вторичных ионов отличается от начальной энергии первичных ионов на величину локального потенциала плазмы в точке вторичной ионизации.

$$\Phi_{pl} = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Диагностический комплекс для зондирования плазмы пучком тяжелых ионов состоит из: инжектора тяжелых ионов, набора управляющих и корректирующих пластин, анализатора энергии вторичных ионов.

Инжектор тяжелых ионов представляет собой линейный электростатический ускоритель частиц. Для токамака Т-10  $E_{Tl^+} = 250 \text{ кэВ}$ .

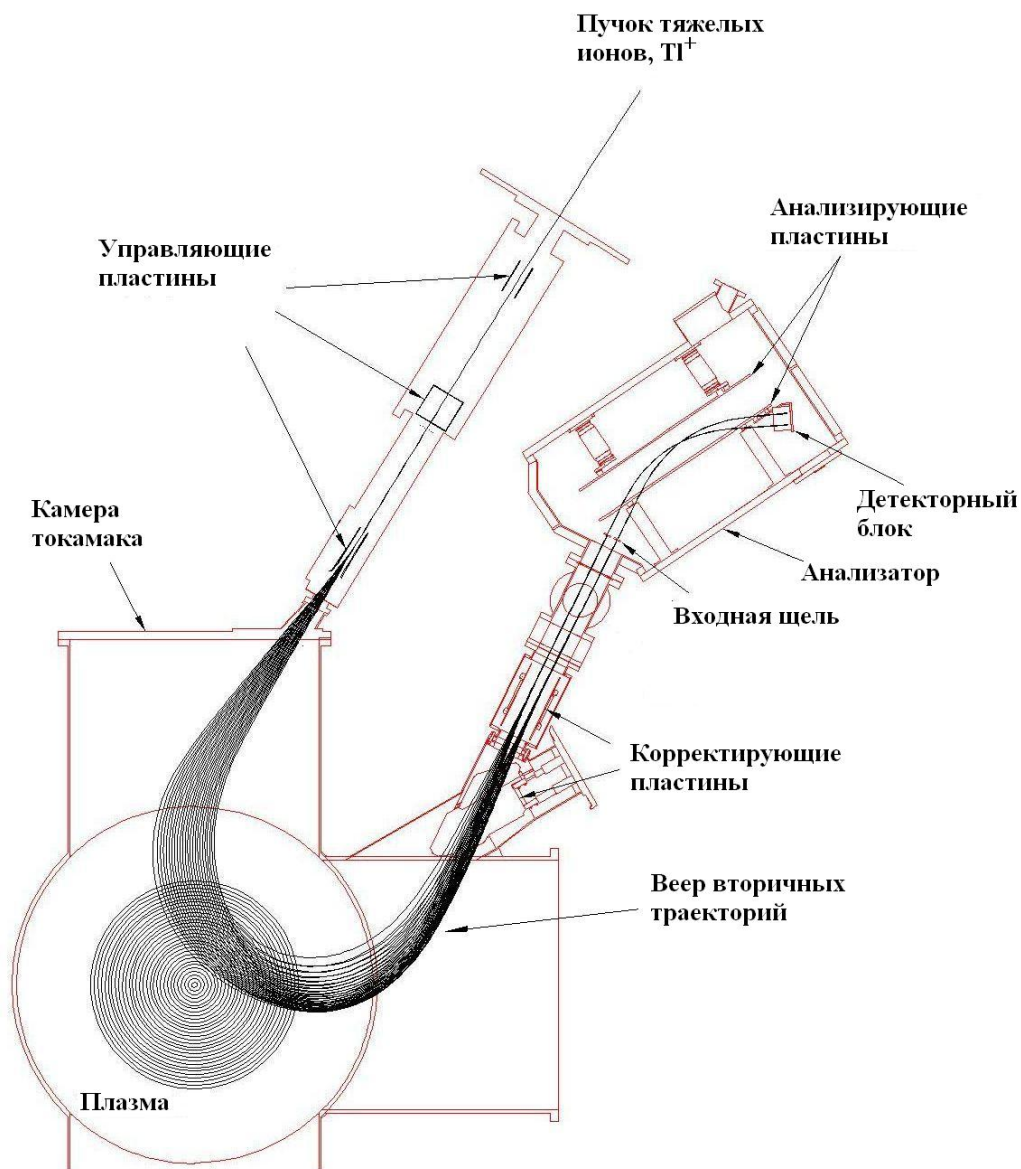


Рис. 1. Общая схема диагностического комплекса для зондирования плазмы пучком тяжелых ионов на токамаке Т-10.

Корректирующие пластины — медные пластины, на которые подается отклоняющее напряжение, они обеспечивают юстировку пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Корректирующие пластины для вторичного пучка позволяют оптимизировать угол влета вторичных частиц в анализатор.

Детектирующие пластины энергетического анализатора показаны на рис. 2. Это четыре пластины, обозначаемые LU (левая верхняя), RU (правая верхняя), LD (левая нижняя), RD (правая нижняя).

|           |           |
|-----------|-----------|
| <b>LU</b> | <b>RU</b> |
| <b>LD</b> | <b>RD</b> |

Рис. 2. Детектирующие пластины энергетического анализатора.

Принцип работы энергетического анализатора состоит в измерении энергии частиц пучка по его положению на детекторных пластинах. Сигналы ионных токов с пластин регистрируются в системе сбора данных диагностики тяжелым пучком (предусилители, опторазвязки, 16-bit АЦП, файл в базе данных).

Приведенная разность токов на пластинах рассчитывается по формуле 2 [12]:

$$\delta i = \frac{(I_{LU} + I_{RU} - I_{LD} - I_{RD})}{I_{\Sigma}} \quad (2)$$

Суммарный ток пучка на пластины:

$$I_{\Sigma} = I_{LU} + I_{RU} + I_{LD} + I_{RD} \quad (3)$$

Потенциал плазмы пропорционален приведенной разности токов:

$$\varphi_{pl} \sim \delta i \quad (4)$$

Плотность плазмы в измеряемом объеме пространства пропорциональна суммарному току на пластины:

$$n_{pl} \sim I_{\Sigma} \quad (5)$$

С помощью диагностики тяжелым пучком (ТП, НІВР — Heavy Ion Beam Probe) можно одновременно исследовать плотность плазмы и ее электрический потенциал. С помощью программы, обрабатывающей данные, записанные с помощью АЦП в файл базы данных, можно построить трехмерные цветные графики («ковры») для временной эволюции спектральной плотности мощности потенциала и плотности плазмы, их когерентность и сдвиг фазы между двумя сигналами. Расчеты были проведены с помощью программного математического пакета MatLab.

## 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ ДИАГНОСТИКИ ТЯЖЕЛЫМ ПУЧКОМ

Сигнал токов с измерительных пластин энергетического анализатора подается на вход двухкаскадного преобразователя ток-напряжение. Первый каскад преобразует ток в напряжение, второй каскад усиливает входной сигнал. Преобразователи представляют собой трансимпедансные усилители на основе малошумящих быстродействующих операционных усилителей. К преобразователям предъявляются жесткие технические требования. В первую очередь это необходимость большого коэффициента усиления. Так как ток первичного пучка составляет порядка 1-100 мкА, то ток вторичного пучка имеет порядок 0.1-10 нА. Диапазон входного сигнала АЦП составляет 5 В. Таким образом, коэффициент передачи (усиления) имеет порядок  $10^8 - 10^{10}$  В/А. Исследование высокочастотных колебаний в плазме требует обеспечения достаточно широкой полосы пропускания сигнала по частоте вплоть до 500 кГц. Применяемый в настоящих экспериментах на токамаке Т-10 тип усилителей обеспечивает полосу в 100 кГц, на стеллараторе ТЖ-II-250кГц.

Усиленный сигнал подается на входное устройство волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), которое преобразует входное напряжение в частотно-модулированный световой сигнал, который по оптическим линиям связи передается с установки в пультовую диагностики тяжелым пучком. В пультовой стоит выходное устройство ВОЛС, преобразующее аналоговый световой сигнал в аналоговый электрический, который подается на плату АЦП в компьютере для оцифровки, хранения и дальнейшей обработки.

Условная схема передачи сигнала с установки в пультовую представлена на рис. 3.

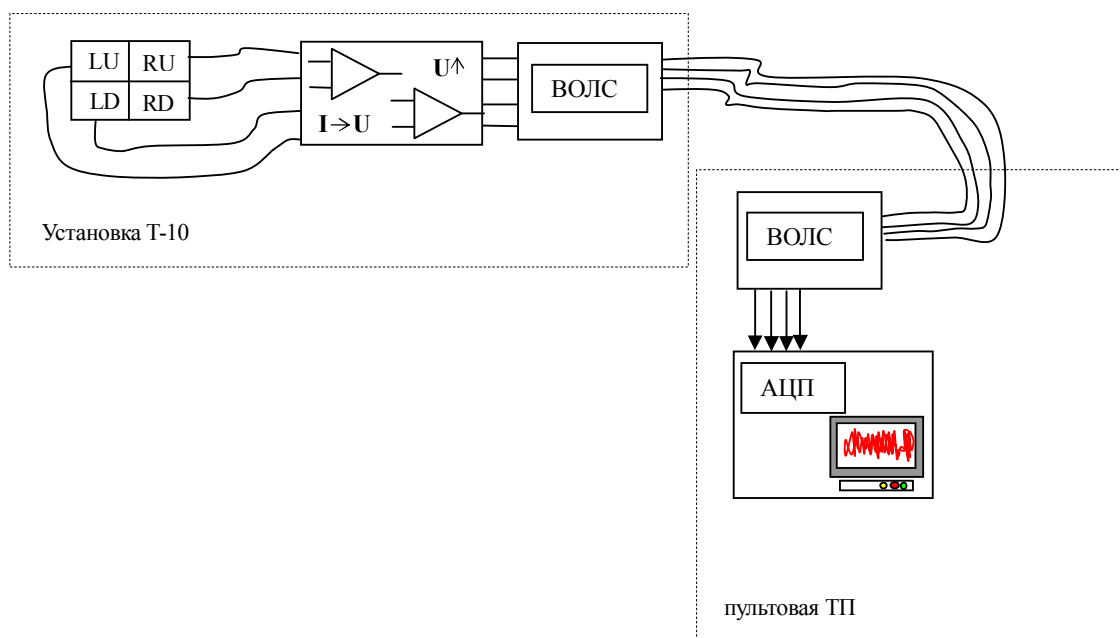


Рис. 3. Схема передачи сигнала с установки в пультную ТП.



### 3. ФОКУСИРОВКА ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

При наладке диагностики необходимо получить сфокусированный первичный пучок с минимальным пространственным размером (диаметром) и угловым расхождением. В области вторичной ионизации пучка в плазме желательно расположить фокус пучка. Это позволит получить более высокую локальную плотность пучка, следовательно, увеличить вероятность столкновения электронов плазмы с зондирующими ионами  $Tl^+$ . Таким образом можно получить более интенсивный вторичный пучок, а следовательно получить лучшее отношение сигнал/шум и более надежные спектры мощности колебаний потенциала и плотности. Диаметр пучка не поддается непосредственному измерению в области плазмы. Его можно измерить на подлете к плазме и экстраполировать результат на область плазмы.

Контролируемые параметры пучка: сила тока и диаметр. Для формирования пучка важна конфигурация электрического поля в ускорительной трубке. Изменение конфигурации поля достигается подбором установленных на трубку сопротивлений.

Сила тока регулируется нагревом ионного эмиттера, содержащего ионы рабочего вещества (в случае диагностики на T-10 –  $Tl^+$ , для стелларатора TJ-II –  $Cs^+$ ). Ток пучка измеряется с помощью цилиндра Фарадея, расположенного в первичном ионопроводе, имеющего подвижный механический привод. Для проведения измерений в плазме цилиндр убирается с оси ионопровода и не мешает прохождению пучка внутрь камеры. Для измерения силы тока в пучке цилиндр, закрепленный на стальном штыре, перемещается на ось ионопровода с помощью тягивающего реле, и собирает пучок на свой приемный электрод. Сигнал тока пучка регистрируется на осциллографе. Характерный уровень первичного тока для токамака T-10 – 2-50 мкА ( $Tl^+$ ), для стелларатора TJ-II – 10-70 мкА ( $Cs^+$ ).

Измерительные датчики представляют собой натянутые перпендикулярно направлению движения пучка проволоки, имеющие измерительные выводы наружу (рис. 4). Пучок перемещается по проволокам при подаче пилообразного напряжения на отклоняющие (сканирующие) пластины. Точковый сигнал с проволок поступает на осциллограф и на плату АЦП. Таким образом можно наблюдать прохождение пучка по проволокам на экране осциллографа и записывать профиль пучка в файл для дальнейшей обработки.



Рис. 4. Расположение проволочных датчиков в первичном ионопроводе Т-10.

Пример измерений диаметра пучка с помощью проволочных датчиков приведен на рисунке 5. Здесь ускоряющее напряжение – 225 кВ, ток пучка – 22 мкА. Представлены сигналы, полученные со среднего (красный и синий цвет линии) и нижнего (зеленый и серый цвет линий) датчиков. Фиолетовая кривая – напряжение, подаваемое на отклоняющие пластины, с помощью которых производится «качание» пучка по проволокам. Зная расстояние между проволоками можно вычислить диаметр пучка по ширине пика. Цифрой 1 обозначены пики, относящиеся к сигналу со среднего датчика (см. рис.4), а цифрой 2 – к сигналу с нижнего. Высота пиков на разных датчиках неодинакова, она зависит от толщины проволок.

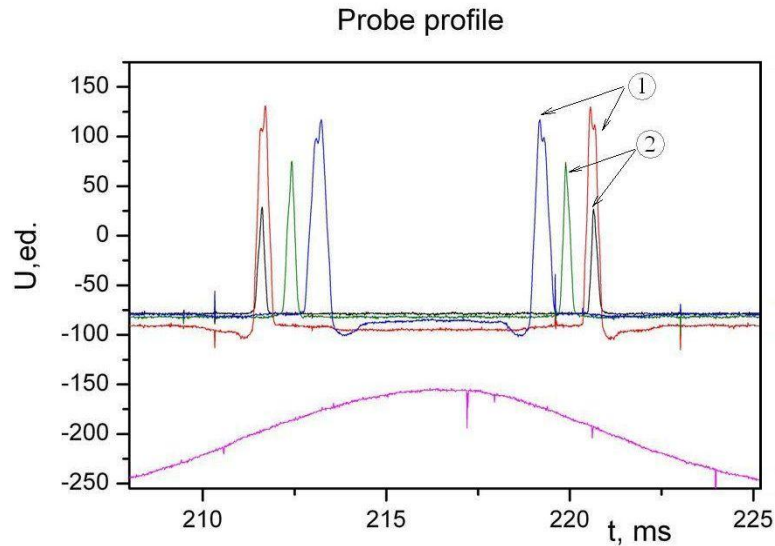


Рис.5. Развертка токовых сигналов с проволок датчика. В приведенном примере расстояние между проволоками: **1** – 13 мм, диаметр пучка –  $3,3 \pm 0,4$  мм, **2** – 14 мм, диаметр пучка –  $3,6 \pm 0,5$  мм.

Термоионный эмиттер, применяемый на описываемых установках, имеет ограниченный ресурс около 2 мАч. Как правило, его достаточно для проведения одной экспериментальной кампании длительностью 3 месяца. При смене эмиттера необходимо провести калибровку пучка. Она состоит из измерений силы тока пучка и его диаметра при различной степени нагрева эмиттера с помощью спирали накаливания и при различном ускоряющем электрическом поле (энергии пучка).

Описанная выше процедура калибровки была проведена перед началом осенней экспериментальной кампании 2007 года. Приведенный пример показывает, что в результате наладки получен квазипараллельный зондирующий пучок диаметром менее 4 мм, обеспечивающий размер области измерений в плазме на уровне менее  $1 \text{ см}^3$ .

#### 4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА С ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛАСТИН

Математическая обработка «сырых» данных, полученных с детекторных пластин анализатора, состоит в следующем.

Поступающий сигнал оцифровывается с помощью 16-битного АЦП и записывается в файл базы данных. Файл представляет собой набор столбцов чисел: время, четыре столбца для сигналов с четырех пластин.

«Сырые» данные обрабатываются с помощью математического пакета Matlab. Для получения спектральной плотности мощности сигнала используется функция “psd” (Power Spectral Density), которая использует для вычисления Фурье-периодограммы модифицированный метод периодограмм Уэлча (Welch's averaged, modified periodogram method) на основе дискретного преобразования Фурье.

Когерентность двух различных сигналов вычисляется с помощью функции “cohere”. Эта функция дает оценку квадрата модуля функции взаимной когерентности двух случайных процессов.

Пусть  $F(x)$  – Фурье-образ сигнала “x”,  $F(y)$  – Фурье-образ сигнала “y”, тогда функция когерентности двух сигналов “x” и “y” *cohere* будет выражена:

$$cohere = \frac{F(y) \cdot F^*(x)}{|F(x)|^2 \cdot |F(y)|^2}, \quad (6)$$

где  $F^*(x)$  – значение, сопряженное  $F(x)$ .

Более подробное математическое описание преобразований можно найти в специальной литературе и справке к математическому пакету.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе были исследованы данные, полученные в нескольких экспериментальных кампаниях на токамаке T-10.

Сигналы токов, получаемые с детекторных пластин, представляют собой сильно зашумленную функцию, в которой сложно проследить закономерности.

На рис. 6 представлен временной отрезок для сигнала полного (суммарного) тока одного из разрядов токамака. По горизонтальной оси отложено – время, по вертикальной – амплитуда.

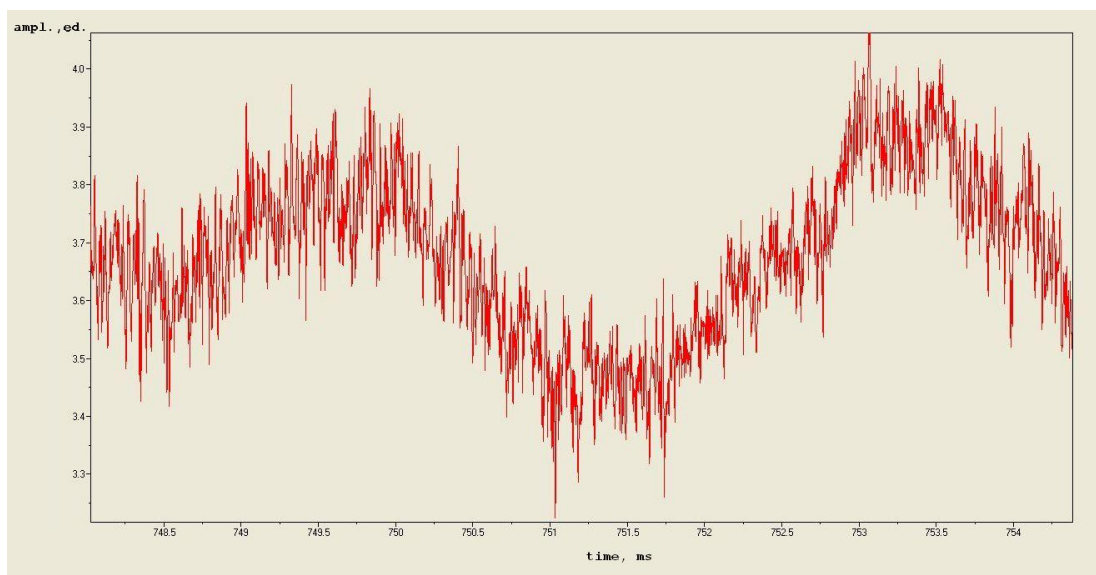


Рис.6. Полный ток, суммарный сигнал с 4-х детекторных пластин анализатора. Видна низкочастотная электротехническая наводка.

Рассмотрим получаемые результаты на примере импульса № 44841 (декабрь 2007).

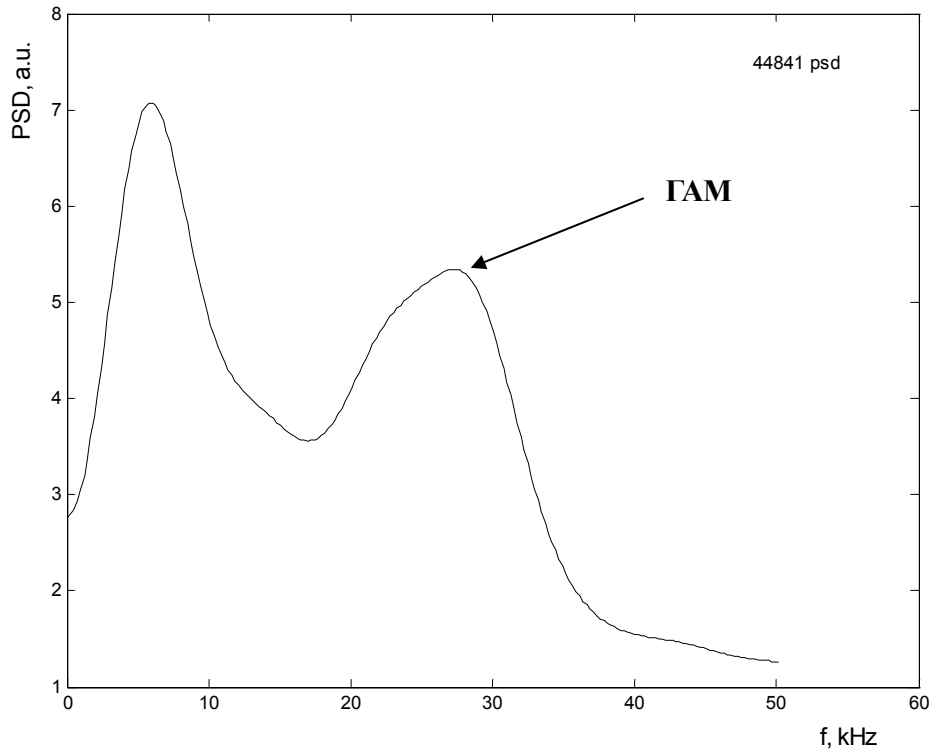


Рис. 7. Спектральная плотность мощности полного тока ( $I_{\Sigma}$ ).

На примере рис. 7 рассмотрим «суммарные» спектры сигналов (суммирование по времени, интервал 500-950 мс, стационарная часть разряда токамака).

Ярко выражена мода 6 кГц — так называемая магнитогиродинамическая мода с полоидальным модовым числом 3 (МГД-мода  $m=3$ ). Колебания с более низкой частотой требуют отдельного рассмотрения (скорее всего это наводки). Менее выражена на полном токе мода 20-30 кГц — геодзическая акустическая мода (ГАМ — указана стрелками на рисунке). Геодзическая Акустическая мода колебаний ярче проявляется на потенциале (рис. 8). В дальнейшем будет рассмотрена ее временная эволюция, рост частоты при включении СВЧ нагрева плазмы [16].

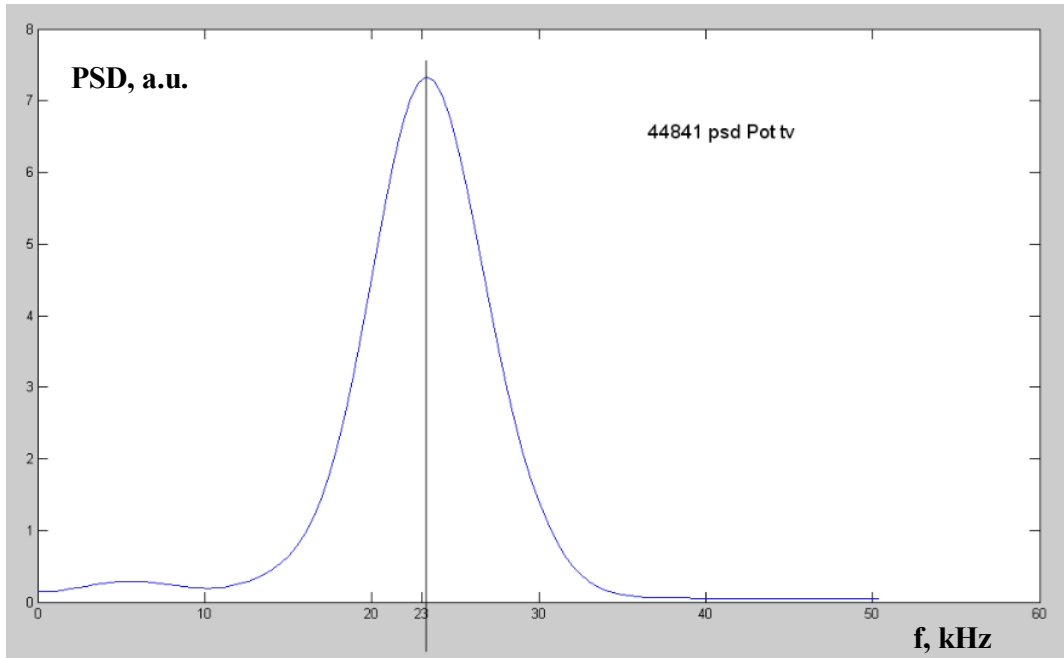


Рис. 8. Спектральная плотность мощности потенциала ( $\delta i$ ).

Магнитогидродинамическая мода на потенциале проявляется слабо, ее частота не изменяется при включении СВЧ нагрева. Как видно из рисунка 9, полный ток пучка (плотность) и потенциал сильно коррелируют на частотах ГАМ. Отметим, что МГД-мода практически не проявляется для данного диапазона частот, поэтому мы имеем дело с «чистой» ГАМ, не подверженной влиянию других типов плазменных колебаний.

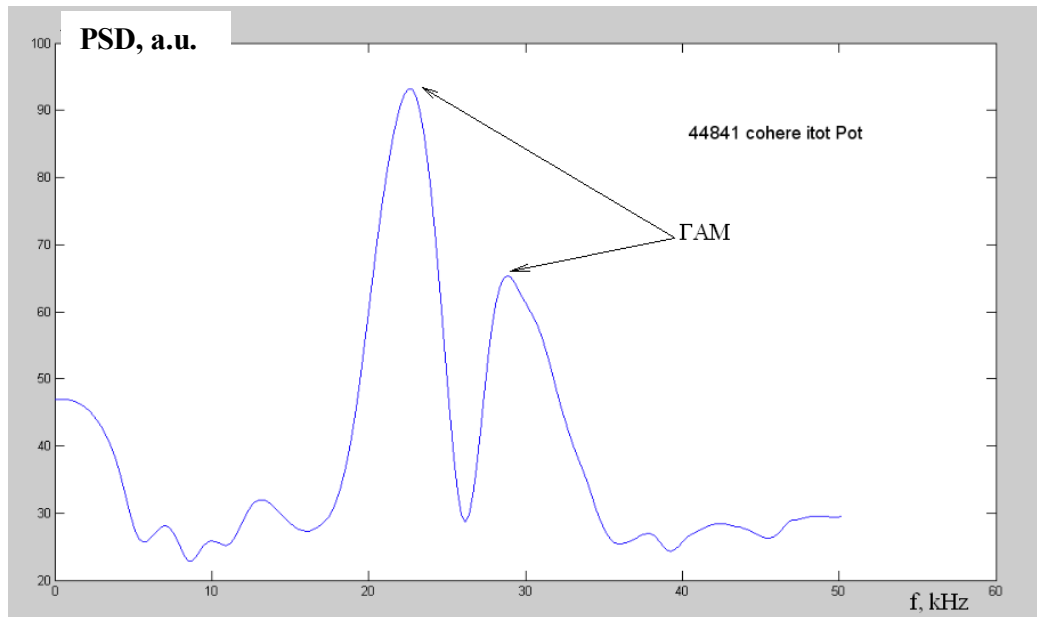


Рис. 9. Когерентность полного тока и потенциала. 500-950 мс.

Рассмотрим временную эволюцию спектров мощности потенциала и плотности плазмы, представленную в виде двумерной цветовой диаграммы «ковра»:

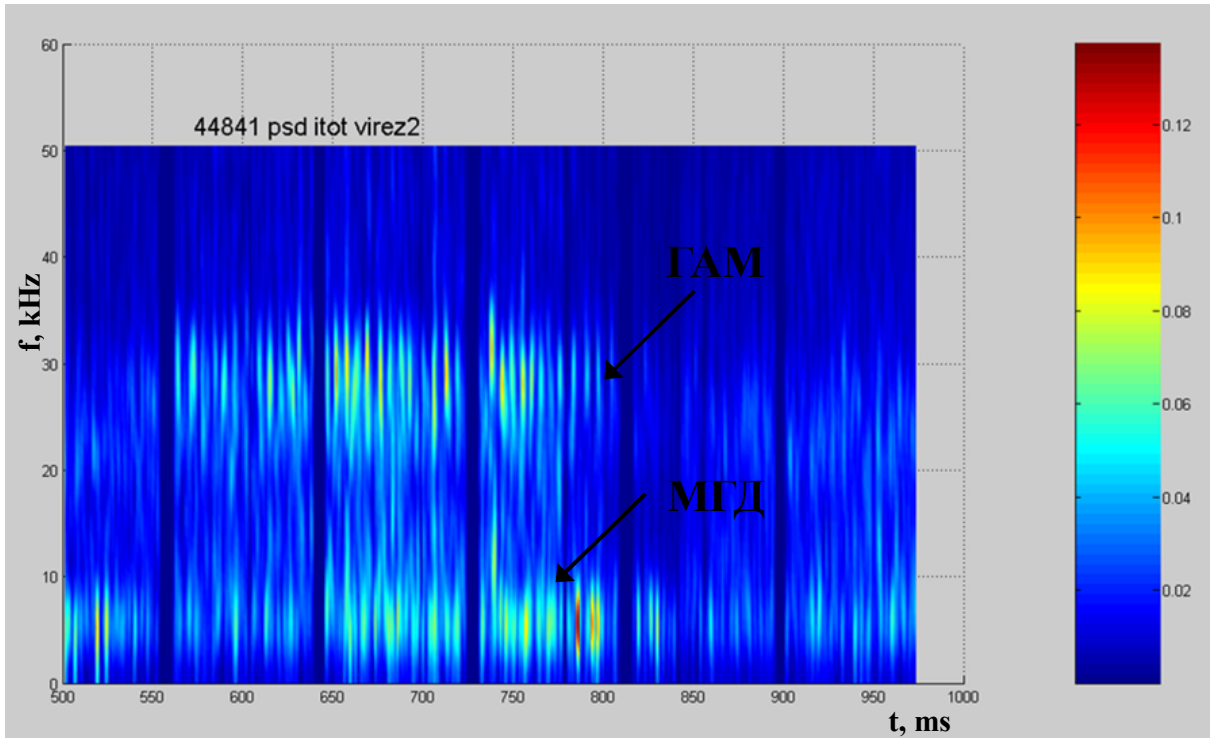


Рис. 10. Спектр мощности колебаний полного тока ТП ( $I_{tot}$ ).

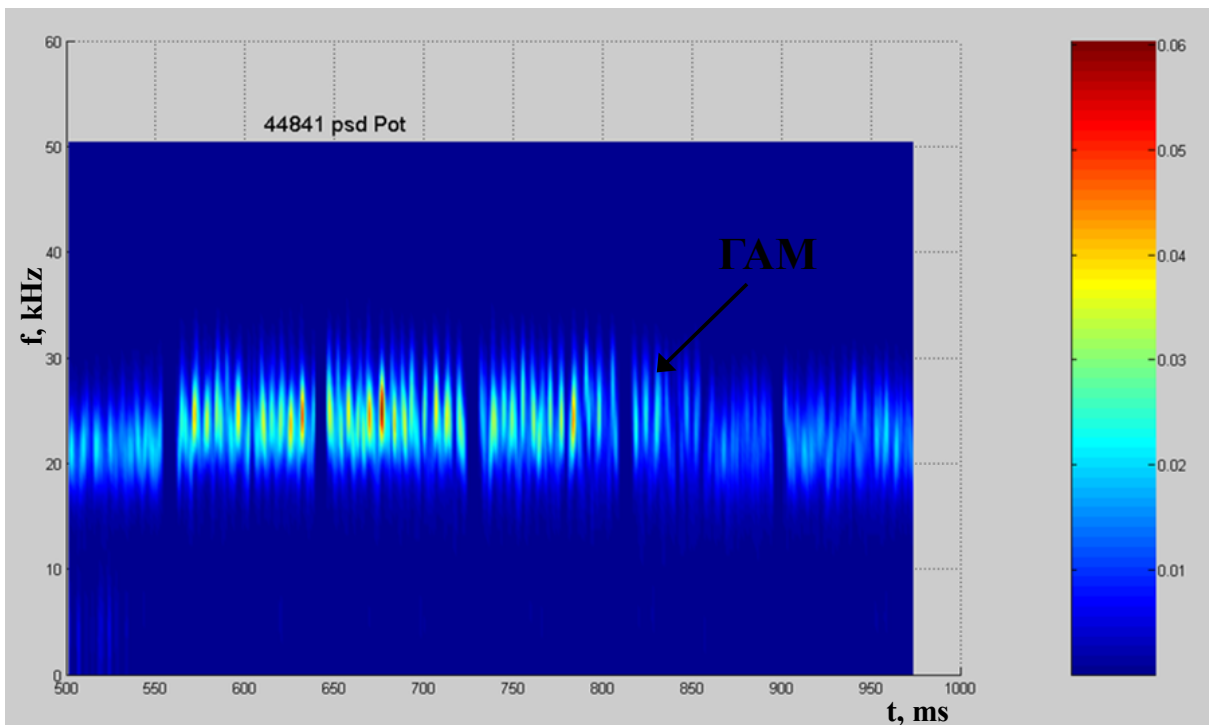


Рис. 11. Спектр мощности колебаний потенциала ТП (Pot).



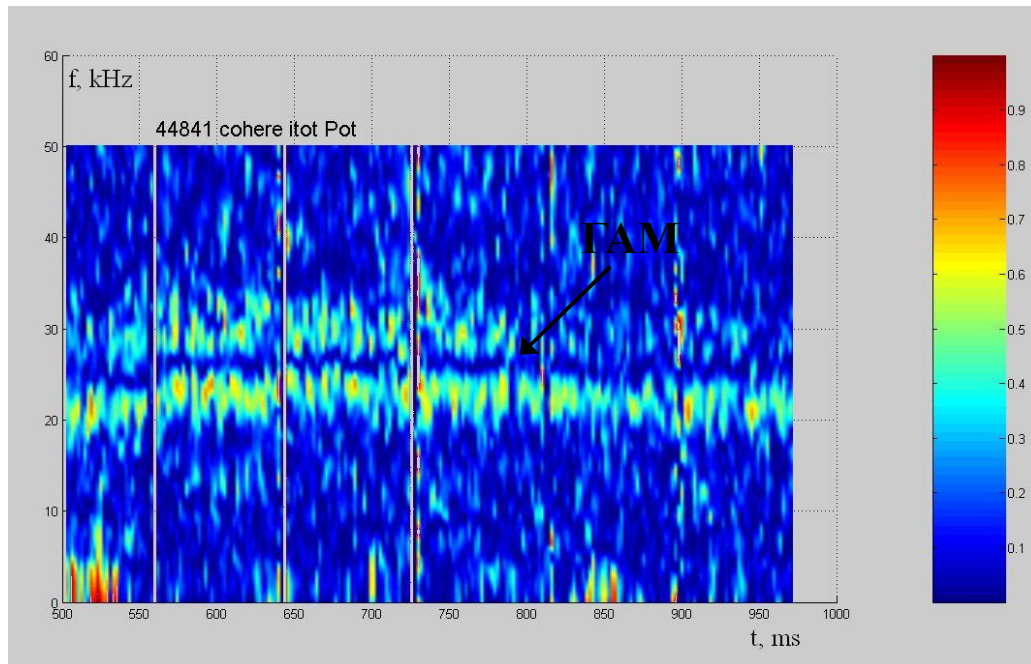


Рис. 12. Ковер когерентности плотности (полного тока) и потенциала.

Рисунки 10-12 показывают, что спектры ГАМ имеют прерывистый характер

Рассмотрим величину сдвига фаз между этими сигналами. Для этого построим эволюцию спектра сдвига фаз (рис. 13). Здесь все значения с корреляцией меньше заданной обнулены.

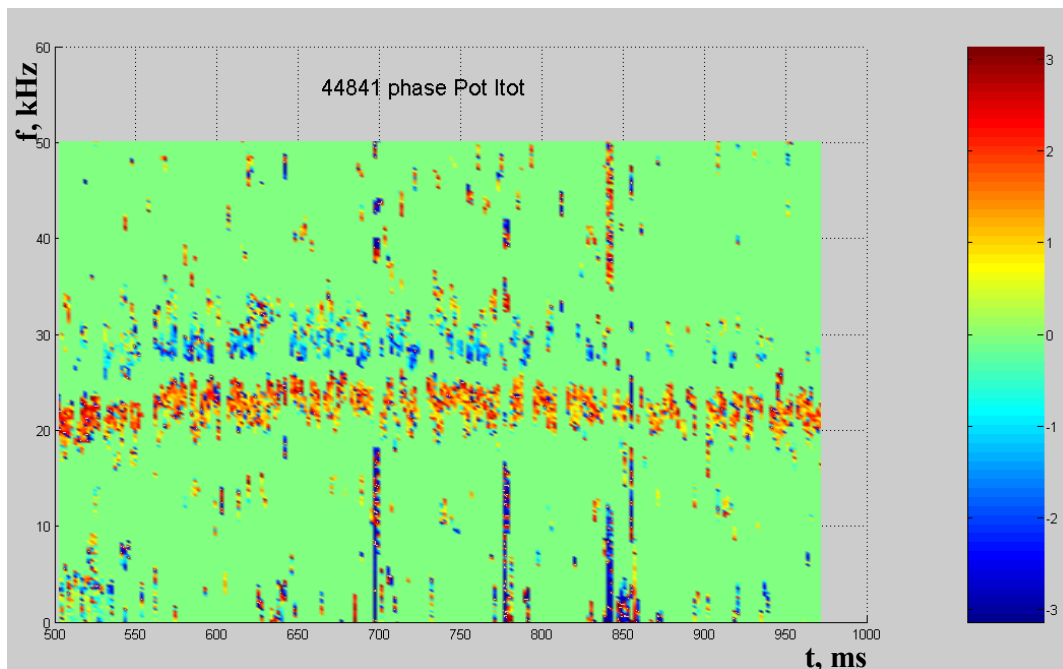


Рис. 13. Временная эволюция спектров мощности сдвига фаз между сигналами потенциала и плотности.

Рисунок 13 показывает, что кросс фаза потенциала и плотности для ГАМ имеют прерывистый характер. Для ее оценки по всем значениям сдвига фаз строится гистограмма (рис. 14). Для различных частотных компонент ГАМ (23 и 30 кГц) величина сдвига фаз различная. Интересно отметить, что она одинакова по модулю, противоположна по знаку. Для основной компоненты Гам с частотой 23 кГц потенциал опережает ток на  $0,4 \pm 0,2 \pi$  (сдвиг  $+0,4 \pi$ ), а для ее более высокочастотного сателлита потенциал запаздывает на  $0,4 \pm 0,2 \pi$  относительно сигнала полного тока (сдвиг  $-0,4 \pi$ ).

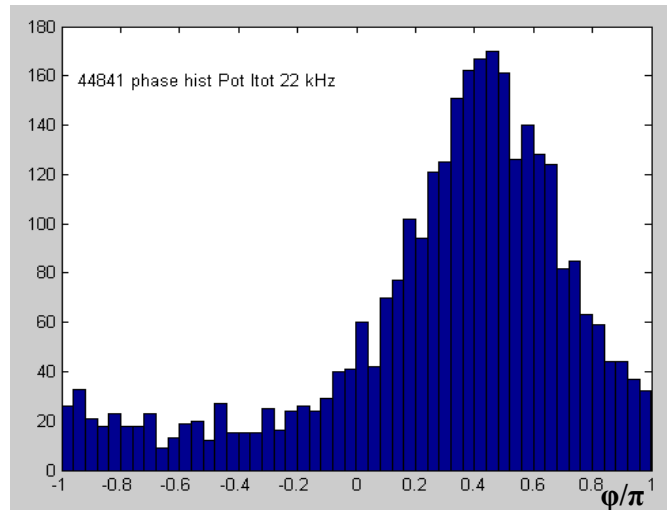


Рис. 14. Гистограмма сдвига фаз между сигналами потенциала и плотности на основной частоте 22 кГц:  $0,4 \pm 0,2 \pi$ .

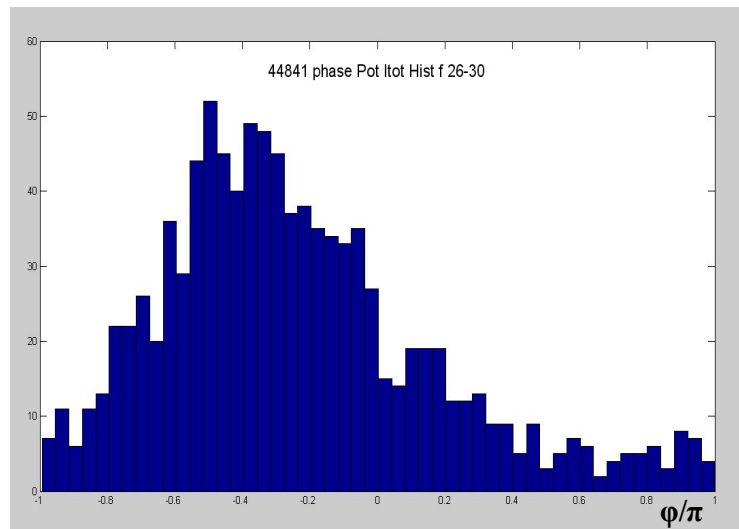


Рис. 15. Гистограмма сдвига фаз между сигналами потенциала и плотности на частоте 30 кГц (сателлит):  $-0,4 \pm 0,3 \pi$ .

Обработка данных по исследованию ГАМ на токамаке T-10.

Спектральная плотность мощности для сигналов потенциала (Potential), плотности (полного тока (Tot.current)) и их когерентность (Coherency) для различных выстрелов (№ shoot). В таблице 1 указаны частоты в кГц. В колонке (Satell.) указаны сателлитные частоты колебаний для сигналов.

Таблица 1. Частоты колебаний для потенциала, плотности и когерентности этих сигналов.

| № shoot | Potential  | Satell. | Tot.current | Satell. | Coherency           | Satell.             |
|---------|------------|---------|-------------|---------|---------------------|---------------------|
| 36082   | 13, 22     | ~18, 27 | ~24         | 26      | 13, 22 (350-600 ms) | 17, 27 (600-850 ms) |
| 36083   | 13, 18     | ~22, 26 | ~23         | 26      | 23 (400-600 ms)     | 27 (600-800 ms)     |
| 43234   | 18, 24     |         | 7           |         | 7, 19               | 26, 28              |
| 43235   | 17, 23     |         | 7           |         | 7, 19               | 26, 29              |
| 43236   | 18, 23     |         | 7           |         | 7, ~20              | 24                  |
| 43260   | 20, 25     |         | 7           |         | 6, 20               | 25                  |
| 43261   | 7, 20      | 23      | 7           |         | ~7, 20              | 23                  |
| 43285   | 3(!), 17   |         | 7, 19       |         | 18                  |                     |
| 43855   | 17->21     | 25->28  | ?           |         | ?                   |                     |
| 44160   | ~3, ~7, 18 |         | 7           |         | 7, 20               |                     |
| 44166   | ~7, 19     |         | 7, 20       |         | 7, 20               |                     |

Отметим, что колебания потенциала происходят в основном на частоте ГАМ (рис.8, 11), характерные значения которой 20, 25 кГц. Колебания полного тока происходят с характерной частотой МГД-моды – 7 кГц (рис.7, 10). Когерентность колебаний плотности и потенциала наблюдается для обоих типов колебаний (рис.12).

Сдвиг фазы между сигналами плотности и потенциала для основной частоты ГАМ (полоса 20-30 кГц) показан в таблице 2. Названия в колонках обозначают следующее: **№** - номер выстрела, **В** – тороидальное поле в токамаке, **I** – ток плазмы, **E** – энергия ионов, **n** – плотность плазмы, **r max** – максимальный радиус

проникновения ионов,  $\theta$  – кросс-фаза между плотностью и потенциалом плазмы,  $\Delta\theta$  – отклонение в сдвиге фазы,  $\text{coh}$  – когерентность сигналов плотности и потенциала.

Таблица 2.

| №     | B, Т | I, кА | E, кэВ | n, *10 <sup>13</sup> см-3 | r max, см | $\theta$ , $\pi$ | $\Delta\theta$ , $\pi$ | coh |
|-------|------|-------|--------|---------------------------|-----------|------------------|------------------------|-----|
| 36082 | 2,33 | 185   | 240    | 1,4                       | r=19,7    | - 0,4            | $\pm 0,2$              | 0,6 |
| 36083 | 2,33 | 185   | 240    | 1,4                       | r=19,7    | - 0,4            | $\pm 0,3$              | 0,7 |
| 36084 | 2,33 | 185   | 240    | 1,4                       | r=27      | + 0,2            | $\pm 0,3$              | 0,4 |
| 36085 | 2,33 | 185   | 240    | 1,4                       | r=27      | + 0,1            | $\pm 0,3$              | 0,4 |
| 36086 | 2,33 | 185   | 240    | 1,4                       | r=27      | + 0,2            | $\pm 0,3$              | 0,4 |
| 43235 | 2,39 | 250   | 240    | 2,13→1,80                 | r=21,2    | - 0,4            | $\pm 0,4$              | 0,5 |
| 43236 | 2,39 | 250   | 240    | 2,13→1,77                 | r=21,2    | - 0,4            | $\pm 0,3$              | 0,6 |
| 43260 | 2,2  | 235   | 250    | 2,25→1,37                 | r=15,3    | - 0,4            | $\pm 0,4$              | 0,4 |
| 43261 | 2,2  | 235   | 250    | 2,25→1,37                 | r=15,3    | - 0,1            | $\pm 0,3$              | 0,5 |
| 43285 | 2,2  | 230   | 180    | 3,16→2,84                 | r=24,2    | - 0,4            | $\pm 0,4$              | 0,4 |
| 43855 | 2,5  | 235   | 250    | -                         | r=21,9    | + 0,4            | $\pm 0,4$              | 0,8 |
| 44160 | 2,2  | 235   | 250    | 2,7→2,2                   | r=15,3    | + 0,5            | $\pm 0,2$              | 0,7 |
| 44166 | 2,2  | 240   | 210    | 2,9→2,3                   | r=21,1    | + 0,5            | $\pm 0,2$              | 0,8 |

| №     | B, Т | I, кА | E, кэВ | n, *10 <sup>13</sup> см-3 | r max, см | $\theta$ , $\pi$          | $\Delta\theta$ , $\pi$ | coh        |
|-------|------|-------|--------|---------------------------|-----------|---------------------------|------------------------|------------|
| 44815 | 2,4  | 300   | 220    | 2→1,5                     | r=23,6    | <b>23 kHz</b> <b>1</b>    | $\pm 0,4$              | <b>0,6</b> |
|       |      |       |        |                           |           | 27 kHz +0,5               | $\pm 0,2$              | 0,6        |
| 44816 | 2,4  | 300   | 220    | 2,1→1,6                   | r=23,6    | <b>22 kHz</b> <b>-0,4</b> | $\pm 0,3$              | <b>0,7</b> |
|       |      |       |        |                           |           | 29 kHz +0,2               | $\pm 0,3$              | 0,6        |
| 44841 | 2,4  | 300   | 220    | 2,1→1,8<br>→1,95          | r=23,6    | <b>22 kHz</b> <b>-0,4</b> | $\pm 0,3$              | <b>0,6</b> |
|       |      |       |        |                           |           | 28 kHz +0,4               | $\pm 0,4$              | 0,5        |
| 44842 | 2,4  | 300   | 220    | 2,15→1,7<br>5→2,2         | r=23,6    | <b>23 kHz</b> <b>-0,5</b> | $\pm 0,3$              | <b>0,6</b> |
|       |      |       |        |                           |           | 29 kHz +0,5               | $\pm 0,3$              | 0,5        |
| 44843 | 2,4  | 300   | 220    | 2,2→1,9<br>→2,3           | r=23,6    | <b>23 kHz</b> <b>-0,4</b> | $\pm 0,3$              | <b>0,6</b> |
|       |      |       |        |                           |           | 29 kHz +0,4               | $\pm 0,4$              | 0,4        |

На рис. 16 показано, что в стационарной фазе рассмотренных омических разрядов сдвиг фазы не меняется с течением времени, и тем более не изменяется при изменении нижней границы для коэффициента корреляции  $c_{\min}$ , используемой при построении гистограмм. ( $c_{\min}$  – граничная величина, значения с меньшим коэффициентом корреляции не учитываются).

Слева – направо изменяется коэффициент корреляции (от 0,3 до 0,6 через 0,1).  
Сверху – вниз представлены различные моменты времени импульса: верхний ряд –

460-570 мс, средний – 580-740 мс, нижний – 760-940 мс.

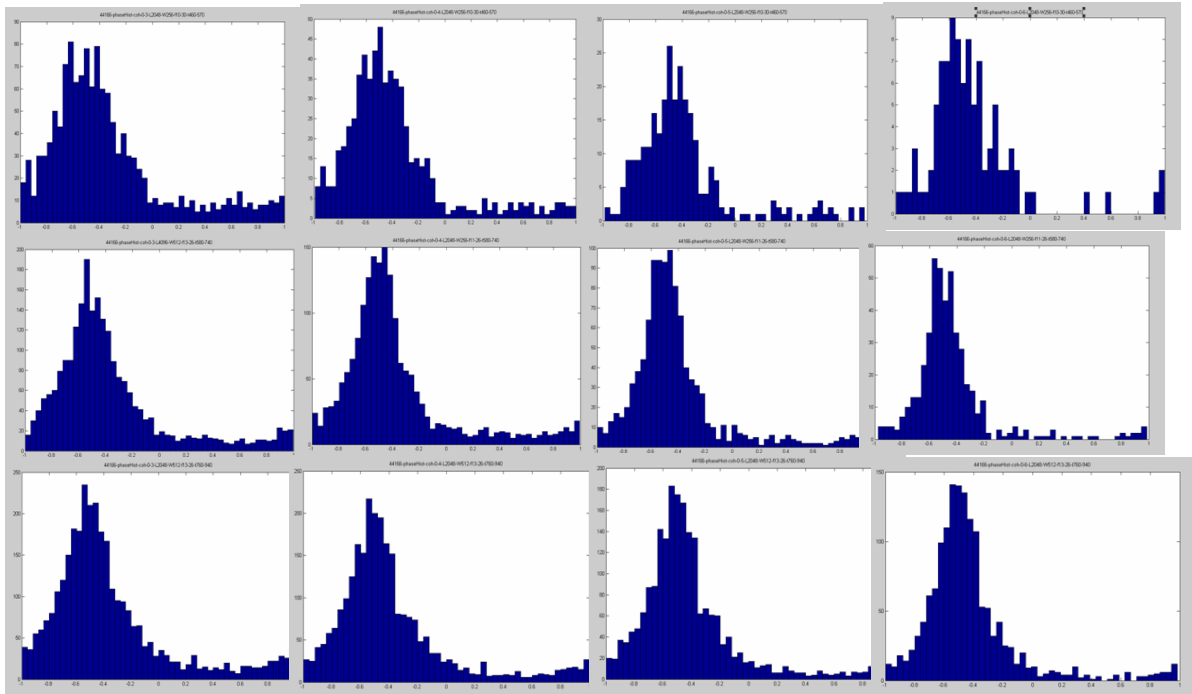


Рис. 16. Гистограммы сдвига фаз в различные моменты времени с различным значением нижнего порога для коэффициентом корреляции.

На рис. 16а представлена гистограмма сдвига фаз для сигналов потенциала и плотности для различных моментов импульса с различными способами нагрева плазмы: омическим и СВЧ. Частота колебаний при СВЧ-нагреве при этом выше, чем в омической фазе. Сдвиг фаз, как видно из рисунка, не меняется.

Гистограмма сдвига фаз (рис. 17) получена при высоком значении коэффициента корреляции ( $c = 0,7$ ). Сдвиг фазы между потенциалом и плотностью (полным током) виден достаточно отчетливо, равен  $-0,5 \pi \pm 0,2$ .

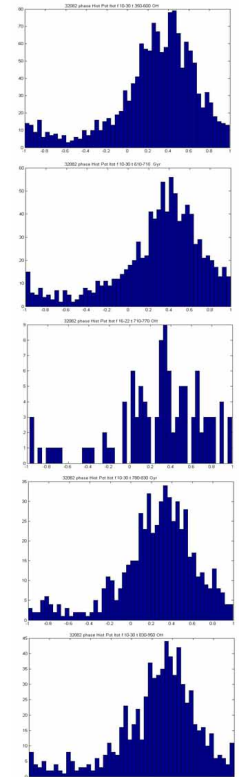


Рис. 16а. Сдвиг фаз сигналов потенциала и плотности в различные моменты времени с разными режимами нагрева (импульс №36082).

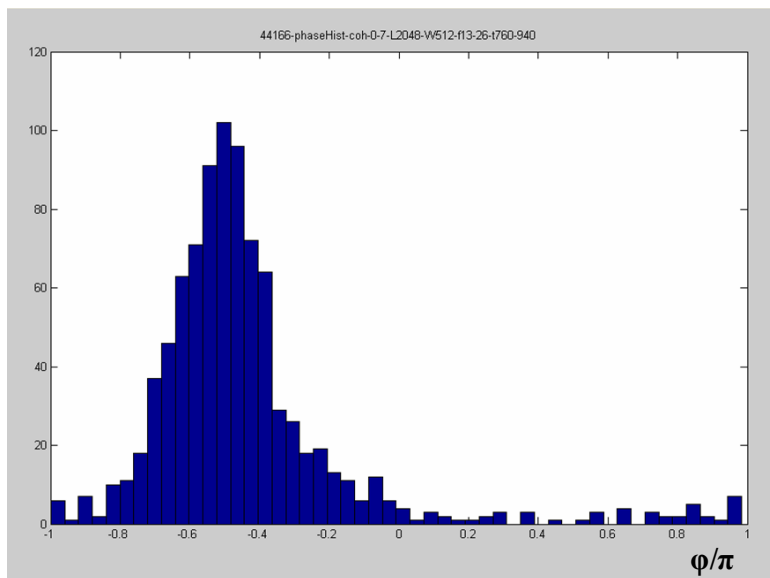


Рис. 17. Гистограмма сдвига фаз для сигнала потенциала и плотности.

При проведении данной экспериментальной кампании данные тяжелого пучка (ТП) записывались на АЦП с частотой оцифровки 1 МГц. Одновременно в одно АЦП регистрировались данные ТП, а также сигналы Ленгмюровских зондов. Подсчитывалась корреляция сигналов ТП, лимитерных и подвижного зондов.

В таблице 3 указаны частоты колебаний для сигналов потенциала **Pot**, полного тока **Itot** ТП, потенциалов **LPleo**, **LPlio**, **LPpf** и токов **LPlii**, **LPg2** на лимитерных и подвижном зондах соответственно. Значения указаны в килогерцах.

Таблица 3. Частоты колебаний для различных сигналов.

| № shoot | Pot           | Itot      | LPleo | LPlio | LPlii     | LPg2 | LPpf     |
|---------|---------------|-----------|-------|-------|-----------|------|----------|
| 44815   | 23            | 7         | 7     | 7     | 15-30     | -    | -        |
| 44816   | ~7, 22, 28    | 7, 22, 28 | 7     | 7     | 15-30     | -    | -        |
| 44841   | 23, 27        | 7, 25, 30 | 7     | 7     | 15-30     | 3    | 3, 7     |
| 44842   | 23, 29        | 7, 23, 29 | 5-10  | 7     | 15-30     | 3    | 3, 8     |
| 44843   | 3, ~7, 24, 29 | 7, ~28    | 7     | 7     | ~7, 15-30 | 3-10 | 7, 10-30 |

На спектре колебаний потенциалов на лимитерных зондах (**LPlio**, **LPleo**) видны доминирующие пики на частоте 7 кГц (рис. 18, 19), в то время как для сигнала потенциала ТП (**Pot**), как и в кампании марта 2007 года, наблюдается две доминирующие частоты ГАМ (в пределах 20-30 кГц) (рис. 11).

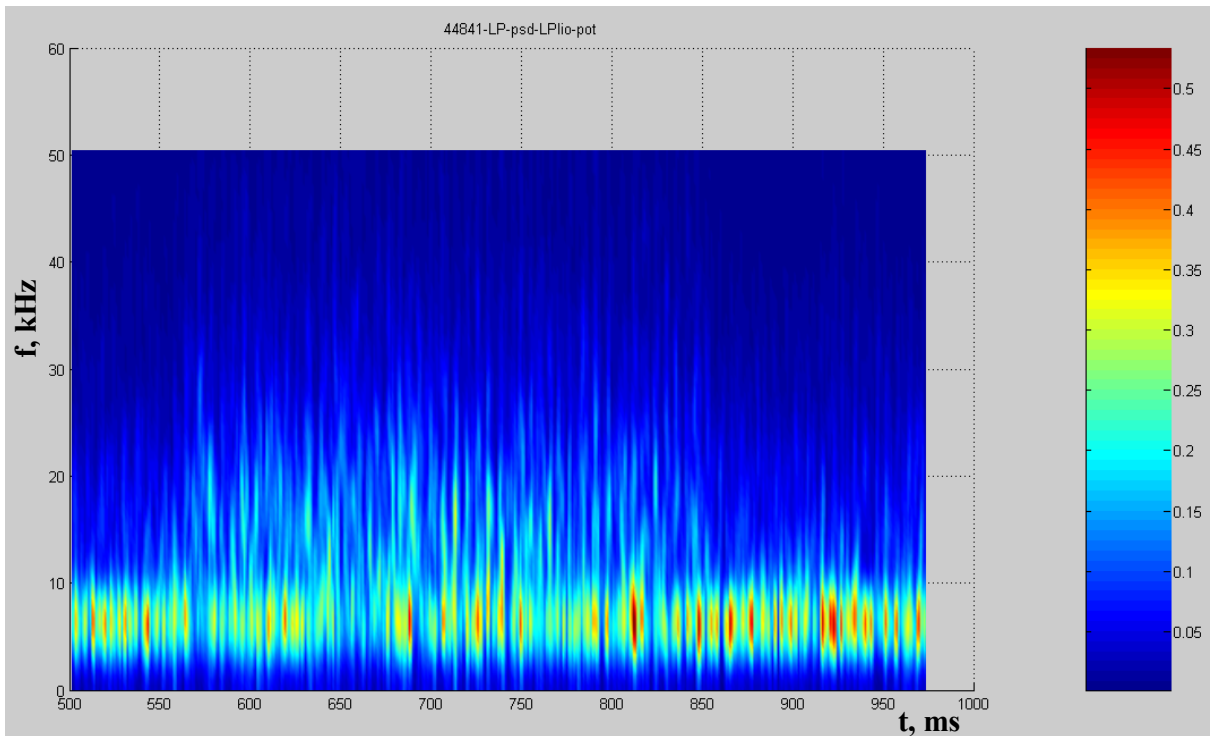


Рис. 18. Спектр мощности колебаний потенциала лимитерного зонда (LPlo).

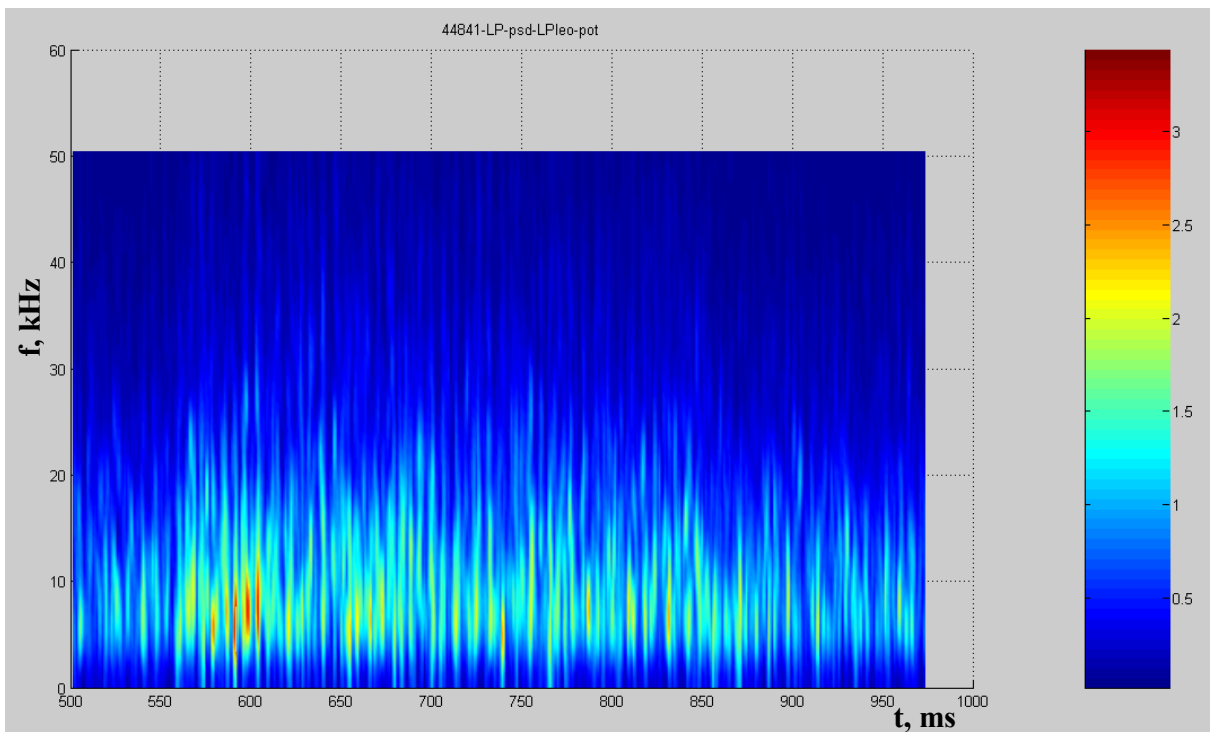


Рис. 19. Спектр мощности колебаний потенциала лимитерного зонда (LPleo).

На сигнале полного тока ТП ( $I_{tot}$ ) стали проявляться высокие частоты (рис. 12), чего практически не было заметно в предыдущих выстрелах (таблица 1).

Для тока лимитерного зонда нет определённой частоты, колебания распределены равномерно по некоторой полосе частот (рис. 20).

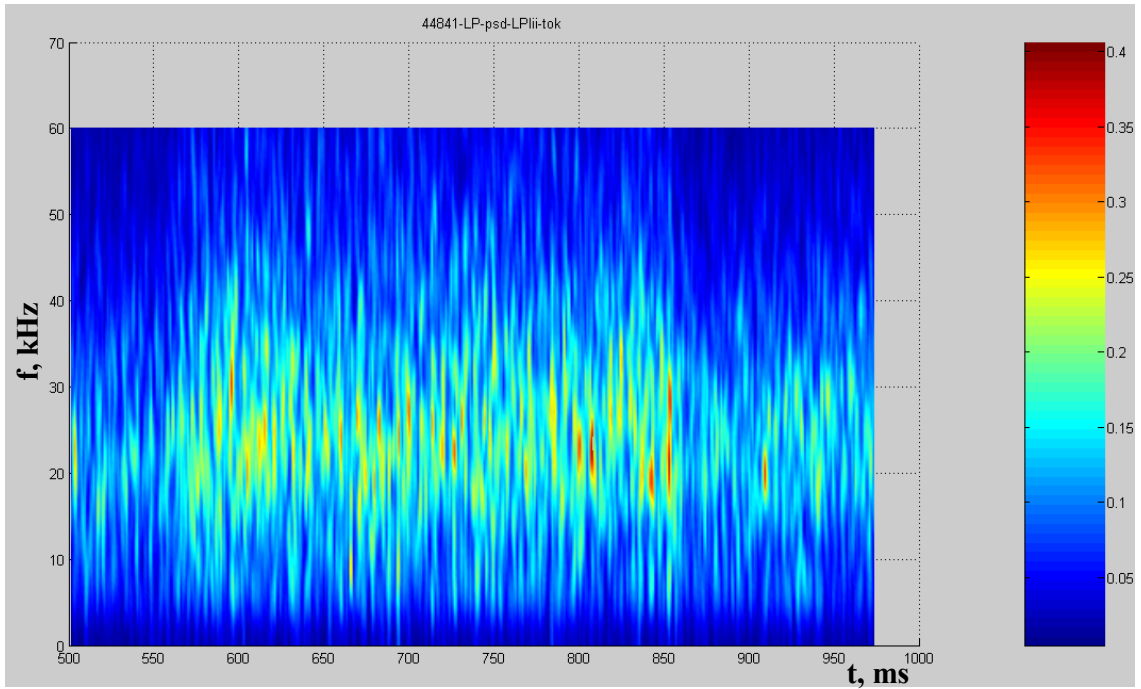


Рис. 20. Спектр мощности колебаний тока лимитерного зонда (LPlii).

На сигналах подвижного зонда (LPg2 – ток, LPpf – потенциал) проявляются низкочастотные колебания – 3 кГц (рис. 21, 22).

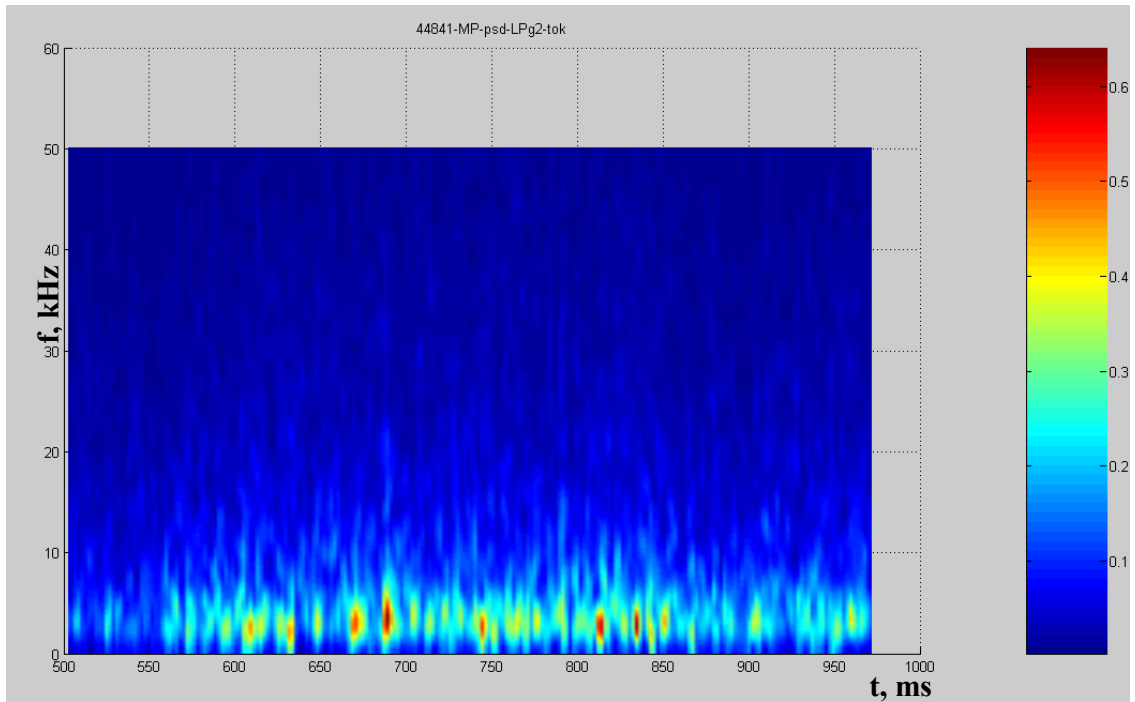


Рис. 21. Спектр мощности колебаний тока подвижного зонда (LPg2).



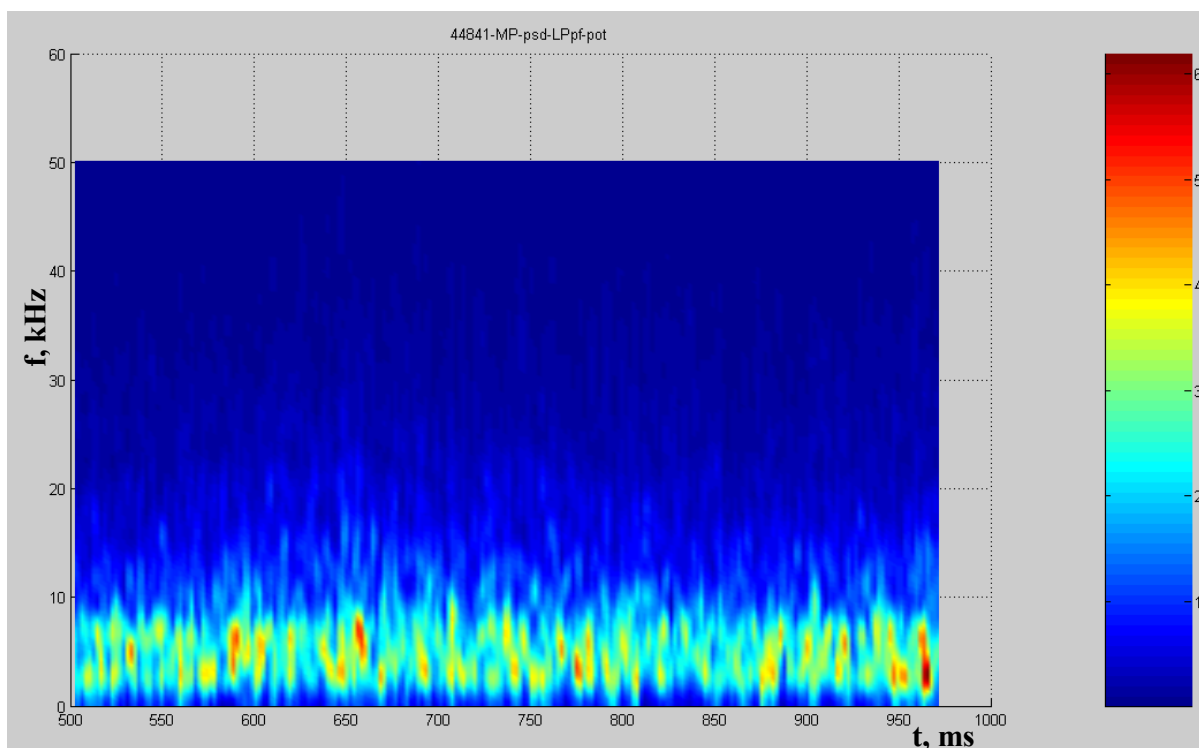


Рис. 22. Спектр мощности колебаний потенциала подвижного зонда (LPpf).

Был проведен расчет когерентности колебаний различных сигналов. Результаты представлены в таблице 4. Приведены значения частот, на которых наблюдается когерентность различных сигналов. Для выстрелов 44815 и 44816 представлены данные по корреляциям только с лимитерными зондами (Cohere LP), а для выстрелов с 44841 по 44843 – данные по корреляциям с лимитерными зондами (Cohere LP) и с подвижным зондом (Cohere MP). Для частот, колебания на которых ярко выражены (высокий уровень когерентности), указана величина сдвига фаз между соответствующими сигналами.

Таблица 4. Частоты когерентности для различных сигналов.

№ 44815

| Cohere LP | Pot     | Itot          | LPleo         | LPlio     | LPlii     |
|-----------|---------|---------------|---------------|-----------|-----------|
| LPleo     | ~ 7 kHz | 7 kHz – 0,6 π | ---           | 5-45 kHz  | --/--     |
| LPlio     | x       | ~ 7 kHz       | 5-45 kHz      | ---       | 15-30 kHz |
| LPlii     | x       | x             | 6 kHz - 0,3 π | 15-30 kHz | ---       |
|           |         |               | 21, 26 kHz    |           |           |

**№ 44816**

| <b>Cohere LP</b> | <b>Pot</b>           | <b>Itot</b> | <b>LPleo</b> | <b>LPlio</b> | <b>LPlii</b> |
|------------------|----------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>LPleo</b>     | <b>7 kHz – 0,9 π</b> | <b>x</b>    | ---          | 5-40 kHz     | 7, 15-30 kHz |
| <b>LPlio</b>     | ~ 7 kHz              | <b>x</b>    | 5-40 kHz     | ---          | 15-30 kHz    |
| <b>LPlii</b>     | ~ 7 kHz              | <b>x</b>    | 7, 15-30 kHz | 15-30 kHz    | ---          |

**№ 44841**

| <b>Cohere LP</b> | <b>Pot</b>           | <b>Itot</b> | <b>LPleo</b> | <b>LPlio</b> | <b>LPlii</b>         |
|------------------|----------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|
| <b>LPleo</b>     | <b>x</b>             | <b>x</b>    | ---          | <b>x</b>     | <b>x</b>             |
| <b>LPlio</b>     | <b>7 kHz – π</b>     | <b>x</b>    | <b>x</b>     | ---          | <b>7 kHz – 0,3 π</b> |
|                  |                      |             |              |              | 20-25 kHz – 0,5 π    |
| <b>LPlii</b>     | ~ 7 kHz (770-970 ms) | <b>x</b>    | <b>x</b>     | --/--        | ---                  |

| <b>Cohere MP</b>  | <b>Pot</b>            | <b>Itot</b> | <b>LPg2 - tok</b> | <b>LPpf - pot</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| <b>LPg2 - tok</b> | <b>X</b>              | <b>x</b>    | ---               | 0-50 kHz          |
| <b>LPpf - pot</b> | <b>7 kHz – -0,8 π</b> | <b>x</b>    | 0-50 kHz          | ---               |

**№ 44842**

| <b>Cohere LP</b> | <b>Pot</b>       | <b>Itot</b> | <b>LPleo</b> | <b>LPlio</b> | <b>LPlii</b> |
|------------------|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>LPleo</b>     | <b>x</b>         | <b>x</b>    | ---          | 10-40 kHz    | 15-30 kHz    |
| <b>LPlio</b>     | <b>7 kHz – π</b> | ~           | 10-40 kHz    | ---          | 7, 15-30 kHz |
| <b>LPlii</b>     | <b>x</b>         | <b>x</b>    | 15-30 kHz    | 7, 15-30 kHz | ---          |

| <b>Cohere MP</b>  | <b>Pot</b> | <b>Itot</b> | <b>LPg2 - tok</b> | <b>LPpf - pot</b> |
|-------------------|------------|-------------|-------------------|-------------------|
| <b>LPg2 - tok</b> | <b>X</b>   | <b>x</b>    | ---               | 5-40 kHz          |
| <b>LPpf - pot</b> | <b>X</b>   | <b>x</b>    | 5-40 kHz          | ---               |

## № 44843

| <b>Cohere LP</b> | <b>Pot</b>            | <b>Itot</b>               | <b>LPleo</b> | <b>LPlio</b> | <b>LPlii</b>  |
|------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>LPleo</b>     | <b>x</b>              | <b>X</b>                  | ---          | 5-40 kHz     | 15-27 kHz     |
| <b>LPlio</b>     | $7 \text{ kHz} - \pi$ | $7 \text{ kHz} - 0,4 \pi$ | 5-40 kHz     | ---          | $7 - 0,3 \pi$ |
|                  |                       |                           |              |              | 15-27 kHz     |
| <b>LPlii</b>     | <b>x</b>              | <b>X</b>                  | 15-27 kHz    | --/--        | ---           |

| <b>Cohere MP</b>  | <b>Pot</b> | <b>Itot</b> | <b>LPg2 - tok</b> | <b>LPpf - pot</b> |
|-------------------|------------|-------------|-------------------|-------------------|
| <b>LPg2 - tok</b> | <b>X</b>   | <b>x</b>    | ---               | 5-40 kHz          |
| <b>LPpf - pot</b> | <b>X</b>   | <b>x</b>    | 5-40 kHz          | ---               |

## Обработка экспериментальных данных на стеллараторе TJ-II

В данной работе представлены результаты обработки одного из импульсов (№18995), произведенного с помощью диагностики ТП на стеллараторе TJ-II.

Отличительной особенностью является наличие двухщелевого анализатора. Таким образом появляется возможность с помощью одной диагностики измерять корреляции в двух различных точках, расположенных на заданном расстоянии (в данном случае – 1 см).

На рис.23 представлен спектр полного тока (плотности) для первой щели.

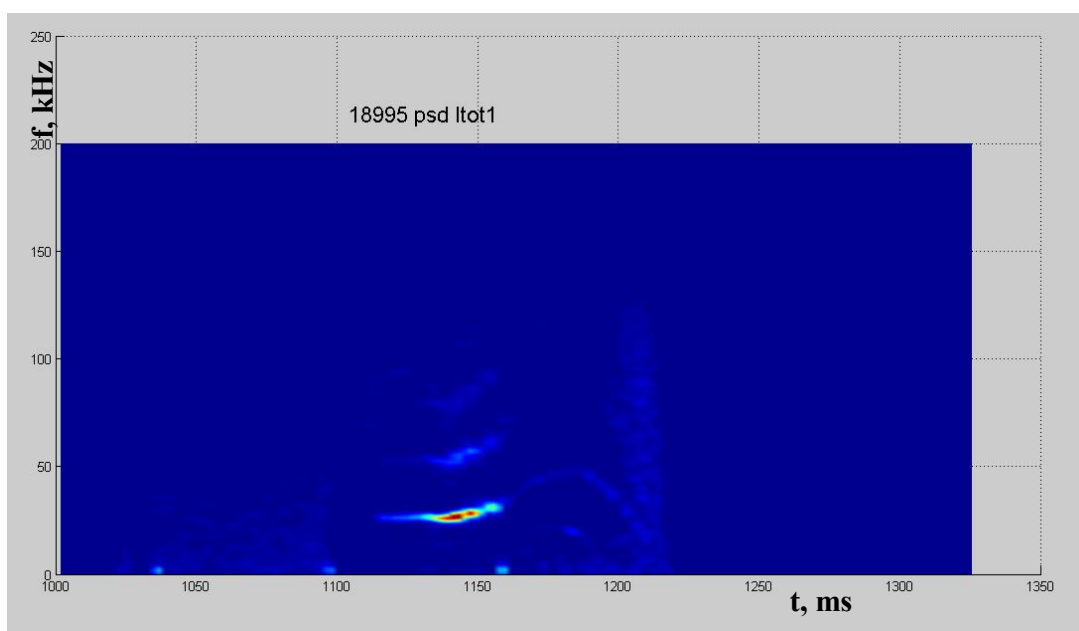


Рис.23. Спектр полного тока для первой щели.

Рис.24 – ковер когерентности двух токов: первой и второй щели. Сигналы когерентны на тех же частотах, на которых происходят колебания полного тока.

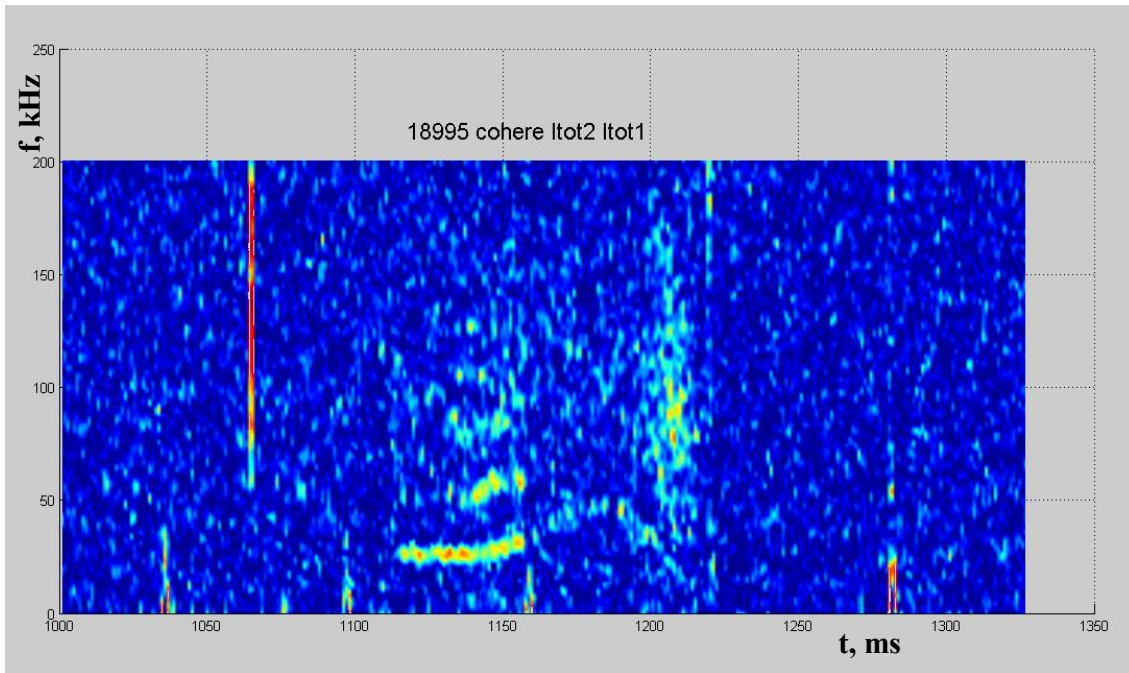


Рис.24. Когерентность полного тока первой и второй щели.

Для того же диапазона времени и частот был посчитан сдвиг фазы между сигналами полного тока разных щелей. Результат представлен на рис.25.

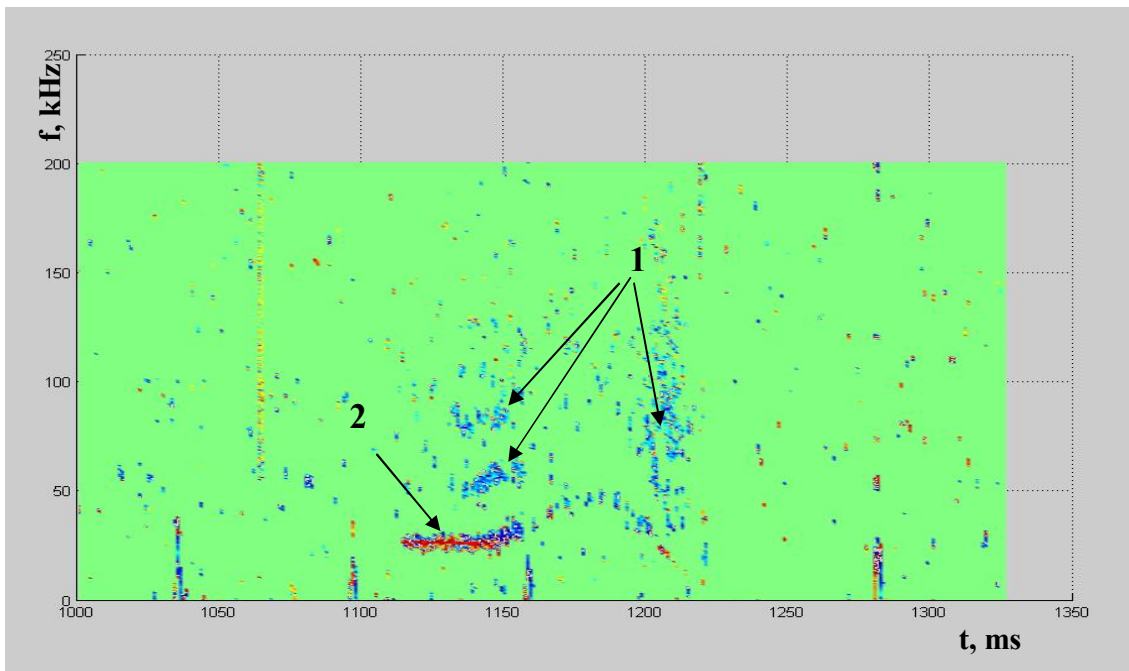


Рис. 25. Ковер сдвига фазы для сигналов полных токов двух щелей.

Было определено, что для зон 1 (см. рис.19) сдвиг фазы  $-0,4\pi \pm 0,2$ . Для зоны

2 сдвиг фазы составляет  $\pi \pm 0,3$ . Зная расстояние между точками, из которых приходит сигнал, – 1 см – и фазовую задержку, можно определить длину волны колебаний на данной частоте.

Сдвиг фазы на соответствует длине волны  $\lambda/2$ . Этот сдвиг фазы происходит на расстоянии 1 см.

$$1 \text{ см} = \lambda/2 \Rightarrow \lambda = 2 \text{ см} \quad (7)$$

Или  $n \cdot \lambda = 2 \text{ см}$ , где  $n=1, 2, 3 \dots$ . Т.е. длина волны получается 2 см или кратная ей.

Для частот, на которых сдвиг фазы составляет  $0,4 \pi$  длина волны:  $\lambda = 5 \text{ см}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были обработаны экспериментальные данные, полученные в различных кампаниях на токамаке T-10.

Определены характерные частоты колебаний потенциала и плотности плазмы для разных импульсов в камере токамака.

1) Обнаружена высокая корреляция между плотностью и потенциалом плазмы на частотах ГАМ.

Корреляция носит характер отдельных всплесков с характерным временем 1-2 мс.

2) В стационарной фазе плазменного разряда вычислена кросс-фаза между плотностью и потенциалом.

2.1) Абсолютная величина кросс-фазы различается в зависимости от характеристик разряда и положения точек наблюдения.

2.2) В омической фазе плазменного разряда кросс-фаза остается постоянной. При включении СВЧ нагрева (центрального и нецентрального) кросс-фаза не изменяется, несмотря на изменение частоты ГАМ.

2.3) В случаях, когда ГАМ проявляется в виде двух частотных пиков, основного ( $f \sim 20-23$  кГц) и сателлитного ( $f \sim 27-29$  кГц), кросс-фаза для потенциала и плотности плазмы для этих пиков различается, оставаясь постоянной в течение плазменного разряда.

3) Обнаружена высокая корреляция между потенциалом в основной плазме (ТП) и периферийной плазме (Ленгмюровский зонд) на частоте магнитогидродинамических колебаний с  $m=3$ .

3.1) Показано постоянство сдвига фазы между сигналами потенциала в основной, горячей зоне плазмы (ТП), и на периферии (ленгмюровские зонды). В рассмотренных случаях сигналы находились в противофазе, сдвиг фаз –  $\pi$ .

3.2) Наличие дальних корреляций потенциала между основной, горячей зоной плазмы (ТП) и периферией плазменного шнура (зонд) указывает на глобальный характер МГД-моды.

4) При анализе Альфвеновских колебаний, обнаруженных с помощью двухцелевого энергетического анализатора, установлено:

- колебания проявляются на плотности плазмы в виде набора квазикогерентных частотных пиков,  $f_1=27$  кГц,  $f_2=55$  кГц,  $f_3=82$  кГц,  $f_4=109$  кГц,  $\Delta f \approx 27$  кГц;

- частоты этих колебаний эволюционируют во времени согласованно;
- кросс-фаза между колебаниями плотности в соседних точках позволила определить поперечную длину Альфвеновской волны, которая составляет  $\lambda=2$  см (для частоты  $f_1$ ) и  $\lambda=5$  см (для частот  $f_2$ ,  $f_3$  и  $f_4$ ) для рассмотренных условий эксперимента.

В течение плазменного разряда длина волны не изменяется, несмотря на изменение частоты.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Melnikov A.V., Zimeleva L.G., Tarasyan K.N., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Nedzelskij I.S., Hamada Y., Iguchi H., Connor K.A., Crowley T.P., Varandas C.A.F., Malaquias A. Heavy Ion Beam Diagnostic for ITER.- Journal of Nuclear Engineering and Design.
2. Dnestrovskij Yu.N, Melnikov A.V., Krupnik L.I., Nedzelskij I.S. Development of Heavy Ion Beam Probe Diagnostics.- IEEE transactions of Plasma Science August 1994, Vol.22, No. 4, p.310-331.
3. Кингсеп А.С. Введение в нелинейную физику плазмы. М.: Издательство МФТИ, 1996.-208с.
4. Днестровский Ю.Н., Жуковский В.Г., Лядина Е.С. Об измерении полоидальных магнитных полей в токамаках. Препринт ИАЭ-3953/6.-М.: 1984.-17 с.
5. Днестровский Ю.Н., Мельников А.В. Обработка экспериментов по определению плотности плазмы с помощью пучка тяжелых ионов. Препринт ИАЭ-3778/7.-М.: 1983.- 23с.
6. Абрамов А.И., Афанасьев В.И., Бондаренко И.С. Корпускулярная диагностика плазмы на токамаке ТУМАН-3. Препринт 1205.-Л.: 1988.- 47 с.
7. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц.- М.: Мир, 1980.- 438 с.
8. Фортов В.Е., Якубов И.Т. Неидеальная плазма. - М.:Энергоатомиздат,1994.- 367с.
9. Fujisawa A., Iguchi H., Hamada Y. A study of non-ideal focus properties of 30° parallel plate energy analyzers.- Review of Scientific Instruments, May 1994, Vol. 65 No. 4, 1580-1584
10. Коваленко В.В. Бифуркации в религиозной философии, естествознании и общественном развитии.- СПб.: Гидрометеиздат 1994.- 159с
11. Крупник Л.И., Самохвалов Н., В., Симоненко А.В. Четырехэлектродная электростатическая система для формирования ускоренного пучка ионов в интервале энергий 10...30 кэВ. Препринт ХФТИ 89-46.-М.: ЦНИИатоминформ 1986.- 25 с.
12. Gary A. Hallock, Robert L. Hickok, Robert S. Hornady. The TMX Heavy Ion Beam Probe. – IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 22, No 4, August 1994.
13. A.V. Melnikov et al. Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak. Plasma Phys. Control. Fusion 48 No 4 (April 2006) S87.
14. A.V. Melnikov et al. Investigation of the plasma potential oscillations in the

range of geodesic acoustic mode frequencies by heavy ion beam probing in tokamaks. Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 55 (2005), No.3.

15. Воронов Г.С. Штурм термоядерной крепости. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 2985. - 192 с. - (Библиотечка «Квант». Вып. 37).

16. Красильников И.А. Исследование колебаний электрического поля в плазме токамака методом диагностики плазмы пучком тяжелых ионов. Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». МГУ, физический факультет, 2008. Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев.

17. Стрелков В.С. Физические основы методов диагностики плазмы в токамаке: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2004. - 88 с. (Серия «Учебная книга по диагностике плазмы»).

18. Kameo Ishii. Application of a Gold Neutral Beam Probe and an End-Loss Energy Component Analyzer to Space Potential Measurements in a Tandem Mirror. – IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 22, No 4, August 1994.