

Оглавление

Оглавление	1
Введение.....	2
1 Описание установки	4
1.1 ГДЛ как пробкотрон.....	4
1.2 Желобковая неустойчивость	6
3. Методы измерений.	9
3.1 Низкочастотная магнитная диагностика	9
3.2 Высокочастотная магнитная диагностика.....	13
3.3 Представление данных и точность определения частоты.	14
4. Результаты	16
4.1 Режим без дополнительного напуска газа в расширитель	16
4.2 Режим с дополнительным напуском газа в расширитель.....	19
Выводы	25
Список литературы	26

Введение

Исследование способов удержания и нагрева плазмы является одним из важнейших направлений современной науки. Достижения в этом направлении могут привести к созданию термоядерных реакторов, которые в свою очередь можно использовать для выработки тепловой энергии, а также в роли источника быстрых нейтронов. Одним из типов установок для удержания плазмы являются ловушки на основе проботрона – конфигурации магнитного поля со слабым однородным полем, заключенным между областями с сильным и неоднородным магнитным полем. На основе конструкции проботрона было построено множество открытых ловушек. В качестве преимуществ таких систем можно отметить их относительную инженерную простоту и возможность достижения большого значения параметра β – отношения давления плазмы к давлению магнитного поля. Одним из представителей таких устройств является Газодинамическая Ловушка (далее ГДЛ) в институте ядерной физики имени Г.И. Будкера, на которой была выполнена данная работа.

Существенной проблемой, свойственной любым типам устройств для удержания плазмы, является развитие неустойчивостей – колебаний плазмы, амплитуды которых в определенных условиях быстро нарастают, приводя к потерям частиц из установки или попаданию плазмы на стенку. Исследование развития неустойчивостей и способов их подавления являются одним из главных направлений исследований на ГДЛ. Для этой цели была, в частности, создана система магнитных зондов. Электромагнитные колебания замагниченной плазмы возмущают магнитное поле установки и могут непосредственно наблюдаться магнитными датчиками. Потенциальные колебания влияют на движение плазмы в целом, что также приводит к периодическим возмущениям магнитного поля и может наблюдаться магнитными зондами. С помощью нескольких магнитных датчиков можно получить информацию об

азимутальном модовом составе, распространении вдоль оси установки и частотном составе колебаний. Именно таким способом в данной работе исследовались различные колебания плазмы в ГДЛ.

Одним из важнейших параметров для ГДЛ является электронная температура. Для ее повышения используется нагрев электромагнитным излучением на частоте электронного циклотронного резонанса. В предыдущих работах таким способом была достигнута температура, приближающаяся к 1 кэВ [1] [2]. Однако в этих же работах было зафиксировано развитие неустойчивости, которая ограничивала время разряда. По этой причине в настоящее время ведется поиск способов стабилизации плазмы в режимах с дополнительным ЭЦР нагревом. Данная работа нацелена на изучение и анализ колебаний, возникающих во время работы установки.

1 Описание установки

1.1 ГДЛ как пробкотрон.

Данная работа была выполнена на Газодинамической Ловушке. ГДЛ представляет собой аксиально-симметричный пробкотрон. В ловушках этого типа область с однородным магнитным полем, направленным вдоль оси установки ограничивается двумя областями с сильным магнитным полем, называемыми магнитными пробками. На частицу, движущуюся в таком поле, действует продольная сила:

$$F_{\parallel} = \nabla(\mu \cdot B) = -\mu \nabla B, \quad (1)$$

где μ – магнитный момент частицы, B – напряженность магнитного поля. Так как μ является адиабатическим инвариантом для частицы, движущейся между пробками [3], то эта сила пропорциональна градиенту магнитного поля и направлена вдоль оси к центру пробкотрона. Если скорость, поперечную магнитному полю в точке с минимальной напряженностью магнитного поля обозначить $V_{0\perp} = V \sin(\theta_0)$, то условием покидания частицами установки является отношение (без учета электростатического потенциала):

$$\frac{B_{min}}{B_{max}} > \sin^2(\theta_0). \quad (2)$$

Область в пространстве скоростей, задаваемая этим соотношением называется конусом потерь, а величина $B_{max}/B_{min} = R$ называется пробочным соотношением. В классическом пробкотроне длина свободного пробега частиц относительно кулоновского рассеяния больше длины установки и частицы осциллируют между пробками. Время удержания определяется редкими кулоновскими столкновениями, которые рассеивают частицы в конус потерь:

$$t \approx \nu_{ii}^{-1} \cdot \ln R, \quad (3)$$

где ν_{ii} – частота ион-ионных соотношений.

В другом предельном случае, когда длина пробега частиц

относительно рассеяния много меньше длины установки, процесс покидания частицами пробкотрона аналогичен процессу истечения газа из сосуда с малым отверстием. Время удержания частиц в такой системе пропорционально длине установки и пробочному отношению:

$$t \approx L \frac{R}{V_i}, \quad (4)$$

где L – длина установки, V_i – тепловая скорость ионов.

ГДЛ имеет следующие параметры: расстояние между пробками 7 м, напряженность магнитного поля 0.3 Тл в центре и до 13 Тл в пробках. Схема газодинамической ловушки представлена на рисунке 1.

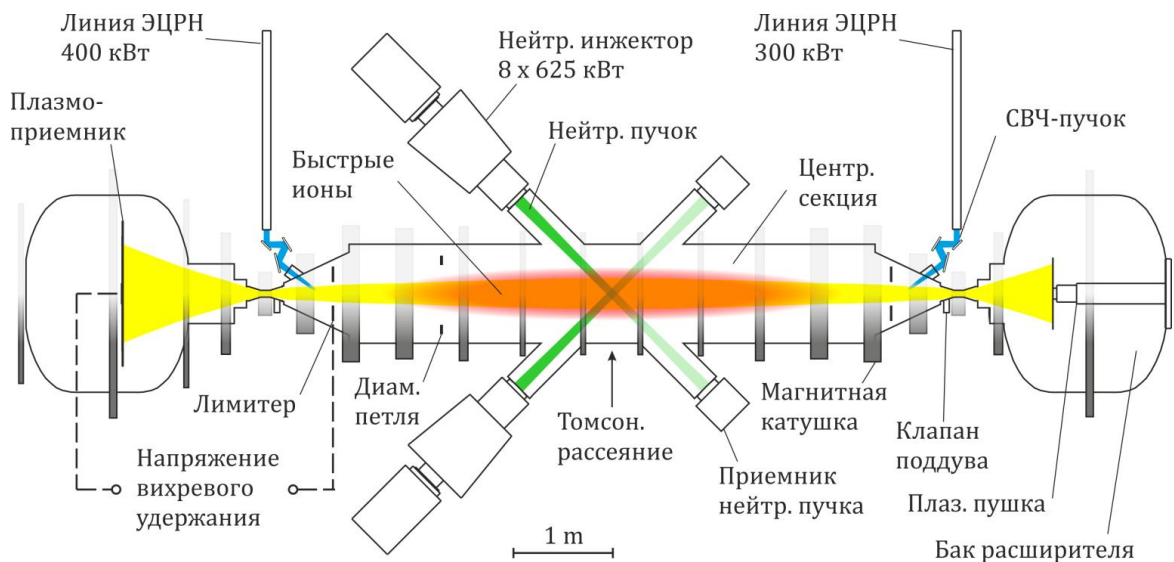


Рис.1 Схема газодинамической ловушки.

В ГДЛ ионы плазмы делится на две компоненты. Одна из этих компонент – это столкновительная плазма с ионной и электронной температурой до 300 эВ и выше и плотностью до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Столкновительность означает, что длина пробега частиц меньше длины установки. Это приводит к установлению в этой компоненте максвелловского распределения. Для нагрева максвелловской компоненты в установку инжектируются нейтральные атомы дейтерия с энергией 22 – 25 кэВ под углом 45° к оси установки. Ионизуясь, эти частицы образуют вторую компоненту – «горячие» ионы. Средняя энергия горячих ионов ~ 10 кэВ, а плотность до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в области поворота.

Основными процессами для горячей компоненты являются торможение на электронах максвелловской компоненты и рассеяние на ионах. При этом происходит нагрев максвелловской компоненты. Длина свободного пробега горячих ионов относительно рассеяния больше длины установки. Следовательно, быстрые ионы движутся вдоль силовых линий, отражаясь от пробок. Большая длина свободного пробега также означает, что угловое распределение имеет узкий пик около 45° до энергий $\sqrt[3]{\frac{m_i}{m_e}} T$, где T – температура максвелловской компоненты.

В экспериментах, рассмотренных в данной работе для создания плазмы, а также для ее дополнительного нагрева использовались два гироторона, излучение которых вводилось в области около пробок. Создание плазмы происходило за счет СВЧ пробоя в газе, напускаемом в центральную часть, а нагрев за счет поглощения излучения на частотах электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР нагрев).

1.2 Желобковая неустойчивость

Одним из явлений, ухудшающих удержание плазмы в открытых ловушках, является желобковая неустойчивость. Из-за кривизны магнитных силовых линий и градиента магнитного поля ионы и электроны дрейфуют по азимуту в разных направлениях. Скорость дрейфа описывается формулой[3]:

$$v_{\text{гр}} = \frac{v_{\perp}^2 [\vec{h} \times \frac{\vec{\nabla} B}{B}]}{2\Omega}, \quad (5)$$

$$v_{\text{цб}} = \frac{v_{\parallel}^2 [\vec{h} \times \vec{\kappa}]}{\Omega}, \quad (6)$$

где Ω – циклотронная частота, \vec{h} – единичный вектор вдоль магнитного поля, $\vec{\kappa} = (\vec{h}\vec{\nabla})\vec{h}$ - вектор кривизны магнитных силовых линий. Возмущения поверхности плазмы приводят к тому, что в «буграх» и «ямах» заряды разделяются, создавая азимутальное магнитное поле. В

скрещенных электрическом и магнитном полях плазма дрейфует по радиусу, и возмущение увеличивается (рис. 2).

Высокие моды этой неустойчивости, характеризуемые малым размером «желобков» подавляются эффектом конечного ларморовского радиуса ионов. В данном случае это означает, что все моды выше первой, которая соответствует движению плазменного шнура как целого, не являются опасными для удержания плазмы.

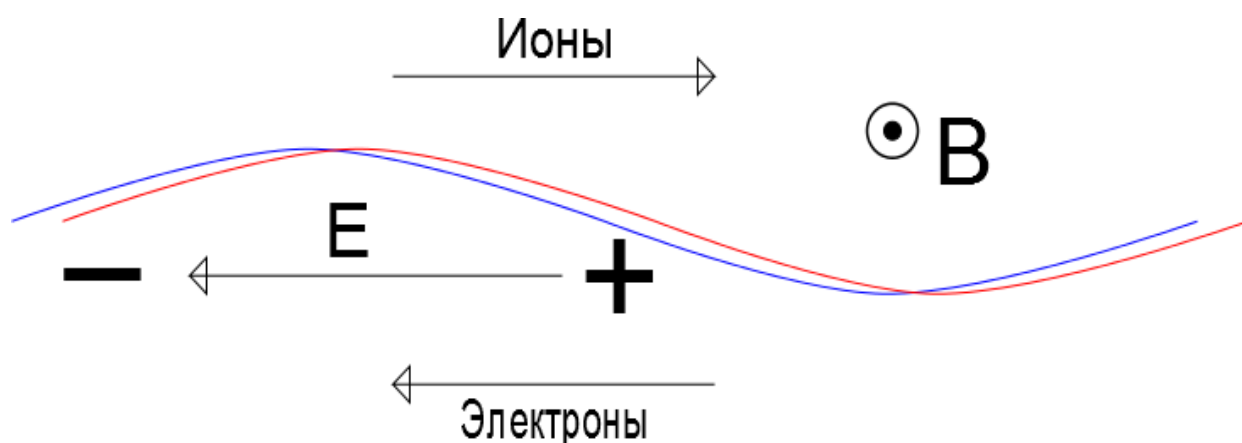


Рис.2 Схема разделения зарядов в желобковой неустойчивости

Первая мода будет нарастать, если заряд желобка будет расти. Для определения критерия устойчивости ток, связанный с дрейфом в неоднородном поле (5) (6) нужно усреднить по функции распределения, получая компоненты тензора давления, и проинтегрировать по всей длине установки. Получившийся таким образом критерий устойчивости называется критерием Розенблюта-Лонгмайра [4]:

$$\int \frac{\kappa(P_{\perp} + P_{\parallel} + \rho v^2) ds}{B^2 r} \geq 0, \quad (7)$$

где P_{\perp}, P_{\parallel} - компоненты тензора давления, ρ - плотность плазмы, κ - кривизна магнитной силовой линии, v - скорость течения плазмы вдоль магнитного поля.

Из критерия (7) видно, что устойчивость плазмы определяется знаком кривизны магнитных силовых линий. Внутри пробкотрона кривизна силовых линий неблагоприятна. Однако если создать области, где

кривизна магнитных силовых линий будет благоприятна и давление плазмы в этих областях будет достаточно велико, можно создать ситуацию, в которой плазма окажется устойчивой.

Добиться устойчивости по критерию Розенблюта-Лонгмайра можно разными способами. В ГДЛ велика плотность плазмы, вытекающей через пробки. Поэтому для удовлетворения критерию (7) в за пробочных областях создавалась благоприятная кривизна магнитного поля с помощью антипробкотрона. Исследования устойчивости плазмы в режимах с удержанием с помощью антипробкотрона приведено в работе [5].

Альтернативным способом уменьшения продольных потерь, связанных с желобковой неустойчивостью, является вихревое удержание. Суть вихревого удержания заключается в создании неоднородного радиального электрического поля в плазме. Электрический дрейф, перпендикулярный электрическому и магнитному полю, создает вихрь вращающейся плазмы. Такое движение перемешивает заряды и приводит к тому, что желобковая неустойчивость нелинейно насыщается на малых амплитудах [6]. При этом плазма в установке неустойчива по критерию (7), но амплитуды колебаний остаются достаточно малыми и не приводят к попаданию плазмы на стенку установки. Радиальное электрическое поле создается с помощью лимитера, расположенного перед пробкой, и плазмодриемника, расположенного в расширителе. Лимитер — это кольцо, окружающее плазменный шнур, на которое подается положительный потенциал. Плазмодриемник представляет собой набор из 12 концентрических дисков, на которые можно независимо подавать потенциал или заземлять. Заземление внутренних дисков плазмодриемника во время подачи положительного потенциала на лимитер и на внешние диски плазмодриемника создает в плазме градиент потенциала и неоднородное радиальное электрическое поле.

Для достижения максимальных температур с помощью ЭЦР нагрева добиваются поглощения электромагнитного излучения в тонком слое около

оси установки. Но при этом возникают колебания. Следовательно, было выдвинуто предположение, что желобковая неустойчивость развивается локально около оси, и приложение отрицательного потенциала к центральным дискам плазмоприемника приведет к еще более благоприятному движению частиц и лучшему подавлению неустойчивости. Для проверки этого предположения и поиска оптимальной конфигурации и величины потенциала на плазмоприемнике на ГДЛ была проведена серия экспериментов. В данной работе наблюдались колебания электромагнитного поля при разных потенциалах на плазмоприемнике.

Помимо потенциала на плазмоприемнике на результаты влияло количество газа, поддуваемого в расширитель. Увеличивая давление в расширителе можно добиться лучшего электрического контакта с плазмоприемником.

3. Методы измерений.

3.1 Низкочастотная магнитная диагностика

Низкочастотная магнитная диагностика на ГДЛ представляет собой набор магнитных зондов. Каждый магнитный зонд является катушкой со 100 витками диаметром 7 см. Катушка окружена экраном из нержавеющей стали толщиной 0.4 мм для защиты от электростатических наводок. С помощью катушек гельмгольца была снята амплитудно-частотная характеристика нескольких зондов. Одна из них представлена на рисунке 3. Видно, что область с небольшим относительным изменением чувствительности доходит до частоты 140 кГц. На частоте 156 кГц виден резонанс, связанный с паразитной емкостью системы регистрации. С помощью данных зондов можно наблюдать колебания до 200 кГц, однако получить информацию об относительной амплитуде колебаний можно только для колебаний в диапазоне до 140 кГц.

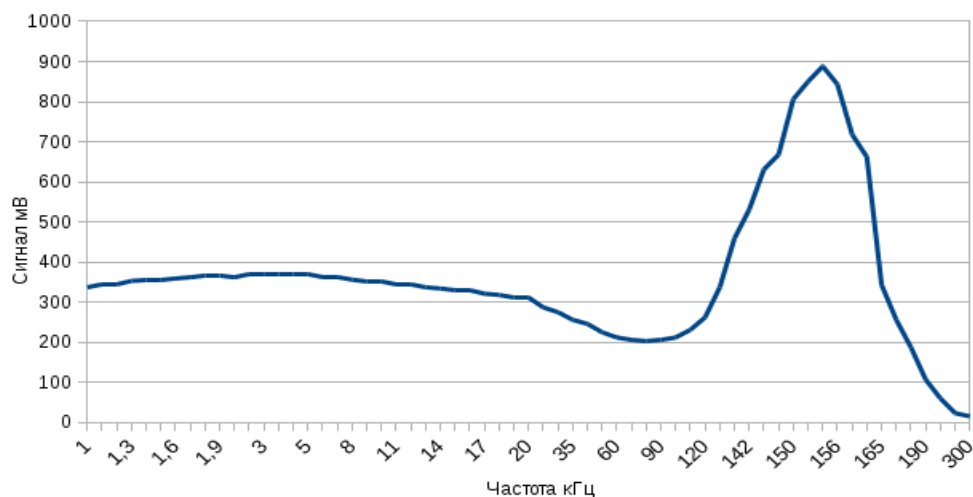


Рис.3 Пример чувствительности низкочастотного зонда.

В области частот около 1 кГц на низкочастотных зондах заметны наводки, не связанные с плазмой. При этом характер этих наводок различен для каждого отдельного зонда и не повторяется от выстрела к выстрелу, что не позволяет учесть их вклад с помощью вычитания фонового выстрела (рис. 4). Это ограничивает снизу область наблюдаемых частот. Поэтому в данной работе сигналы на частотах порядка 1 кГц и менее не учитывались.

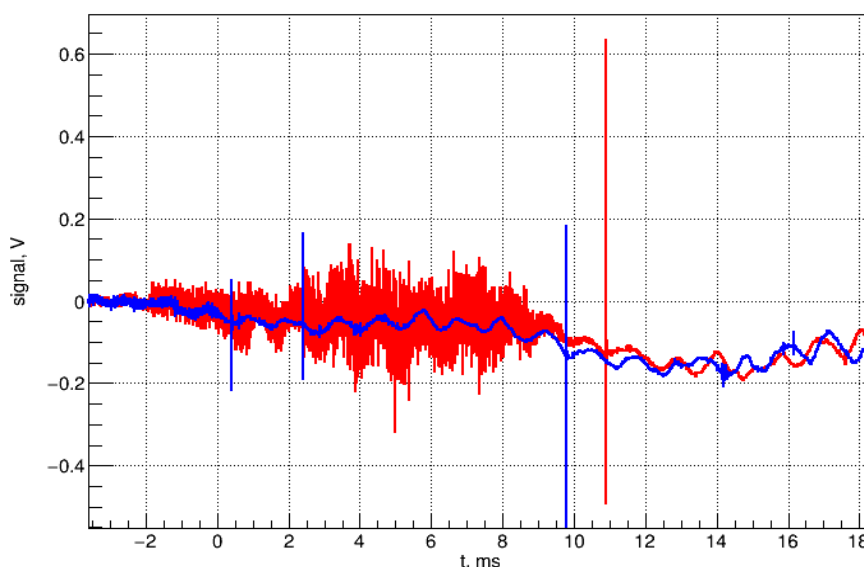


Рис.4 Красным – сигнал датчика азимутальной сборки в выстреле с плазмой. Синим – фоновый сигнал для этого выстрела.

Всего в установке ГДЛ 34 низкочастотных зонда. 16 из них составляют кольцо вокруг оси установки и позволяют определить азимутальную моду колебаний. Остальные 18 располагаются в линию параллельно оси. Кольцевая сборка позволяет определять азимутальную

моду колебаний, а линейная позволяет рассматривать структуру колебаний вдоль оси установки. Расположение магнитных зондов относительно вакуумного магнитного поля ГДЛ показано на рисунке 5

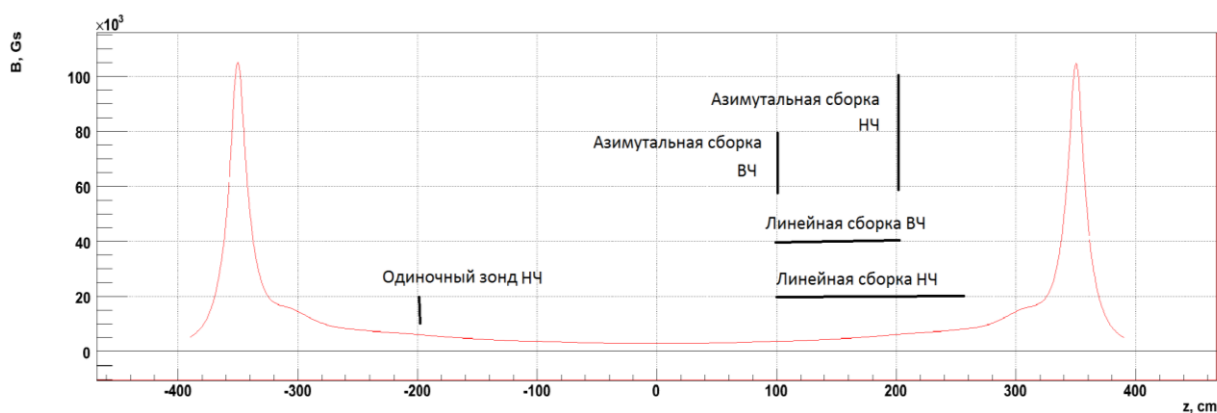


Рис.5 Расположение низкочастотных магнитных зондов относительно вакуумного магнитного поля ГДЛ

Кроме этого, с противоположной стороны от линейной и круговой сборок, располагается одиночный магнитный зонд. Для наблюдения колебаний на частотах более 200 кГц количество витков в одиночном зонде было уменьшено до 50, а электростатический экран для нового зонда был сделан с зазорами. В ГДЛ для уменьшения давления водорода на внутренние поверхности установки с помощью дуговых испарителей напыляется титановая пленка. Для изоляторов, расположенных в прямой видимости дуговых испарителей, это приводит к постепенному запылению их поверхности и существенному уменьшению сопротивления. В частности, попадая в зазоры электростатического экрана магнитного зонда, титан может «запылить» непроводящие поверхности зонда и существенно снизить чувствительность датчика к высокочастотным колебаниям магнитного поля. Чтобы предотвратить это, для нового датчика были сделаны изоляторы специальной формы. (рис. 6)

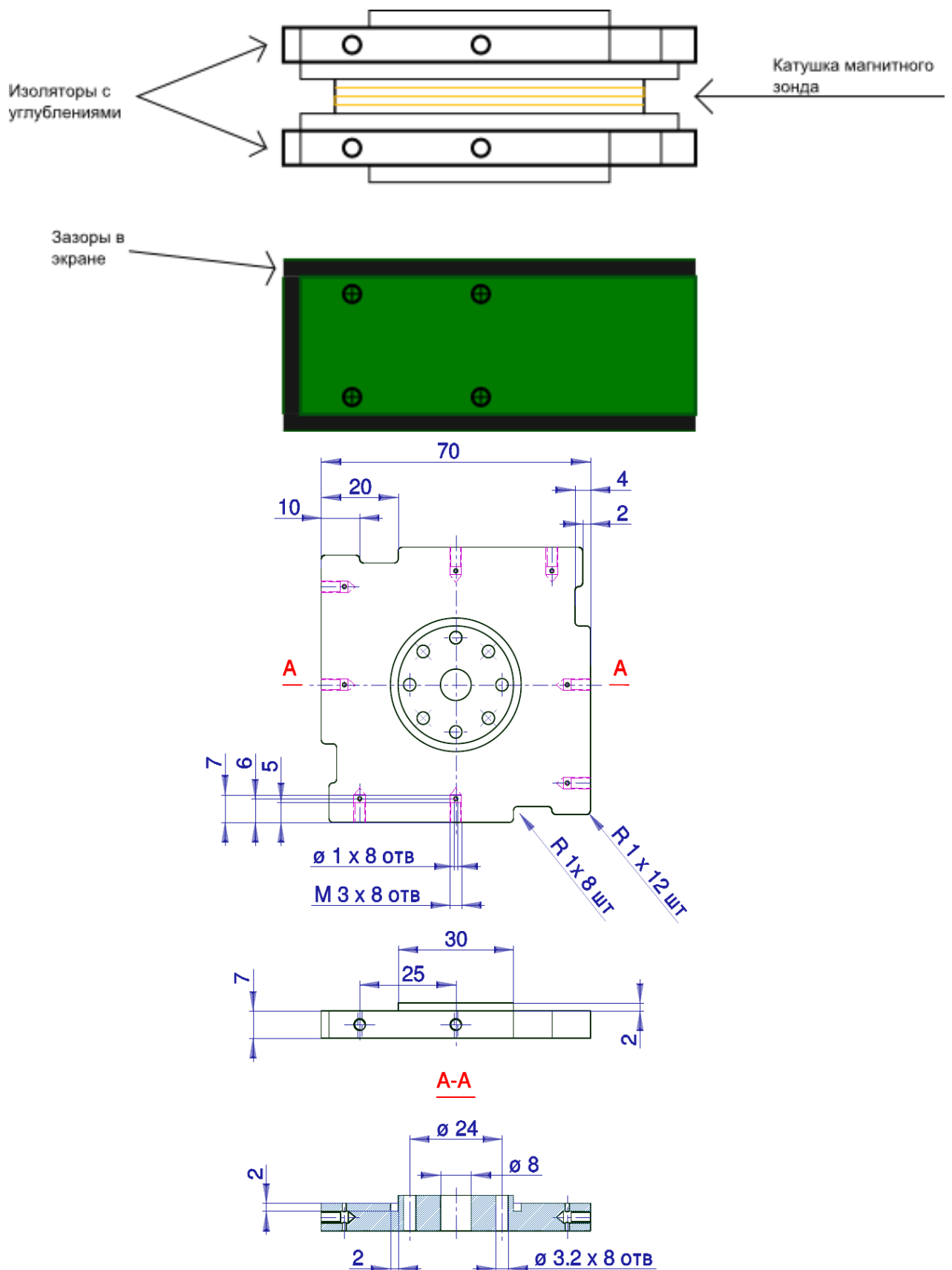


Рис.6 Сверху – схема одиночного магнитного зонда, снизу - чертеж изолятора для него.

Титан, проникающий в зазоры в стальном экране, не попадает в углубления. Таким образом, всегда остается поверхность изолятора, не

покрытая титаном, что позволяет высокочастотным колебаниям магнитного поля лучше проникать внутрь экрана. АЧХ нового зонда представлена на рисунке 7. Видно, что область с небольшим относительным изменением чувствительности лежит от 160 кГц до 450 кГц, а также небольшой участок до 110 кГц. На частоте 140 кГц присутствует резонанс, связанный с паразитной емкостью в цепи регистрации. С помощью данного зонда можно регистрировать колебания частотами до 450 кГц, однако получить информацию об относительной амплитуде колебаний можно только в диапазоне от 160 кГц до 450 кГц.

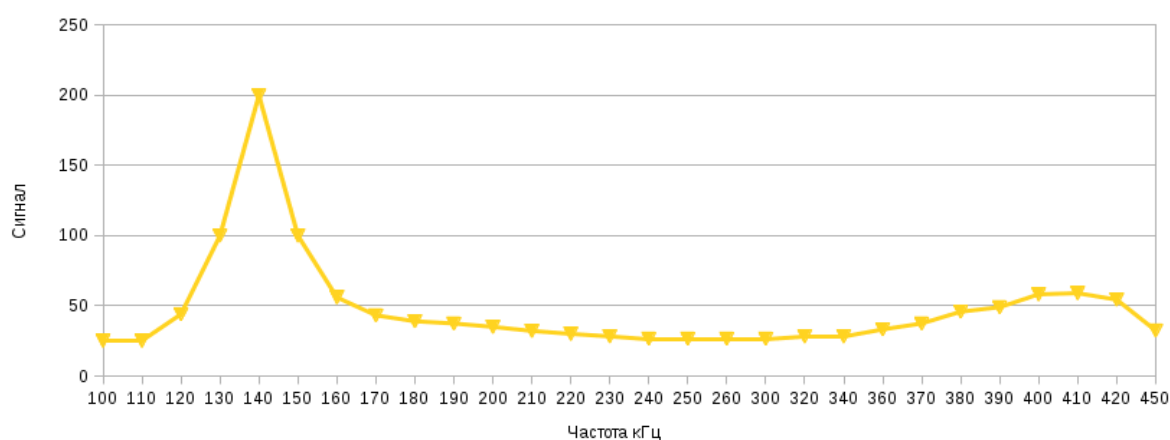


Рис.7 Чувствительность нового зонда

3.2 Высокочастотная магнитная диагностика

Высокочастотная магнитная диагностика ГДЛ представляет собой набор высокочастотных магнитных зондов. Каждый зонд — это три взаимоортогональных петли диаметром 1 см для измерения радиальной, продольной и азимутальной компонент магнитного поля. Петли накрыты кварцевым колпаком для защиты от напыляемого титана и других внешних воздействий.

Всего в ГДЛ установлено 10 высокочастотных зондов. 4 Из них составляют азимутальную сборку, а 6 расположены вдоль оси установки (рис. 8).

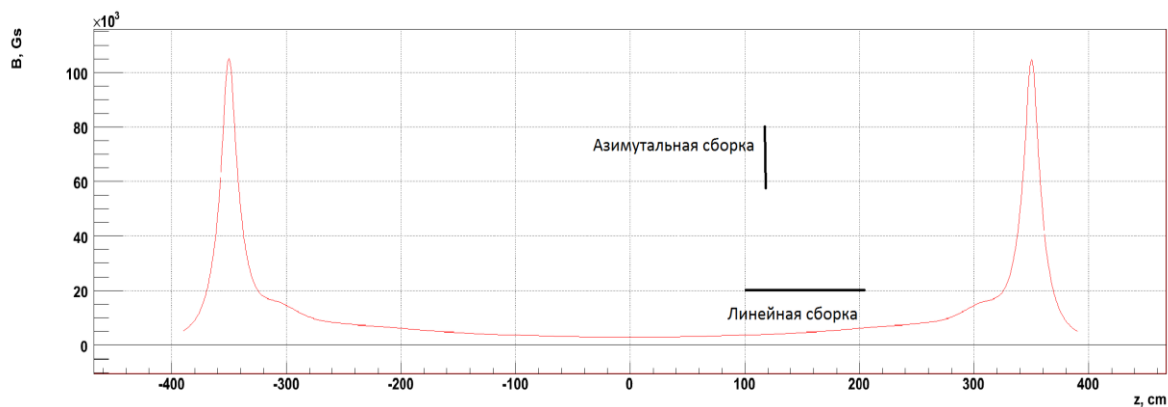


Рис.8 Расположение высокочастотных магнитных зондов относительно вакуумного магнитного поля ГДЛ.

3.3 Представление данных и точность определения частоты.

Информация о частотном и модовом составе колебаний в данной работе была получена с помощью алгоритмов преобразований Фурье дискретных сигналов любой длины. Данные о частотно-модовом составе отрезка сигнала представлялись на двумерной гистограмме (рис. 9).

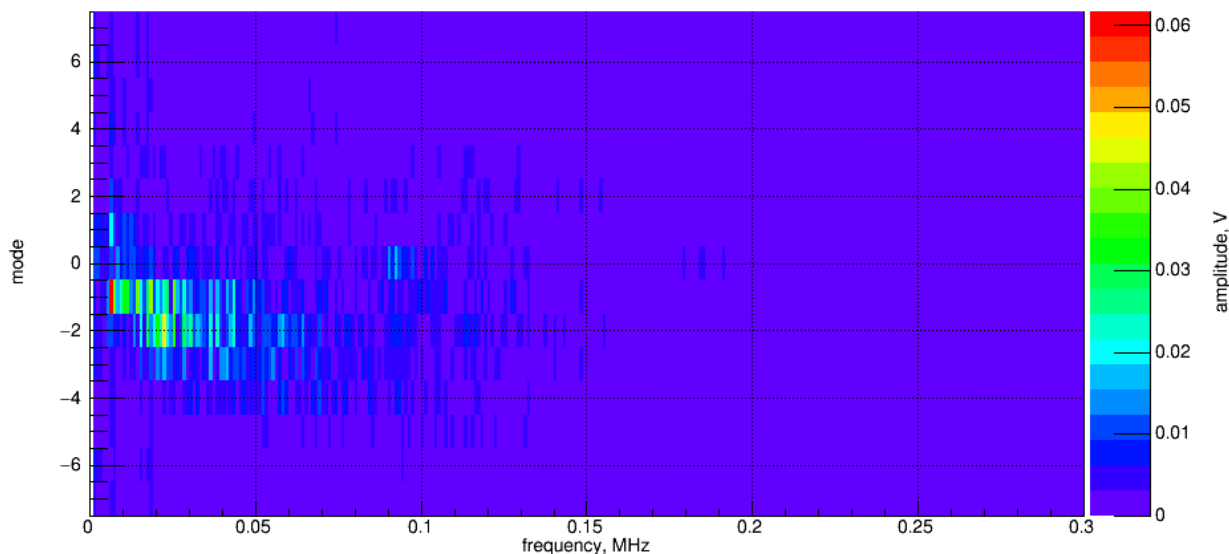


Рис.9 Пример частотно-модовой гистограммы сигнала.

Максимальная наблюдаемая мода определяется количеством датчиков в азимутальной сборке и их расположением. Азимутальная сборка низкочастотных датчиков представляет собой 16 зондов, равномерно расположенных по окружности, что позволяет наблюдать явления до 8 моды, однако в связи с подавлением колебаний за счет эффектов конечного ларморовского радиуса на высоких модах полезной информации мало. Размер столбца гистограммы по частоте определяется

длиной отрезка сигнала, взятой для расчета Фурье-образа: $dv = t^{-1}$. Соответственно точность определения частоты конкретных осцилляций пропорциональна характерному времени их изменения. Максимальная частота наблюдаемых колебаний равна половине частоты дискретизации АЦП, принимающего сигнал. В данном случае для низкочастотных зондов использовался АЦП с частотой дискретизации 1 МГц, а для высокочастотных использовались АЦП с частотой дискретизации 50 МГц и 500 МГц

Для рассмотрения временной зависимости частотного состава использовалось Фурье-преобразование с бегущим окном. Пример такого преобразования представлен на рисунке 10.

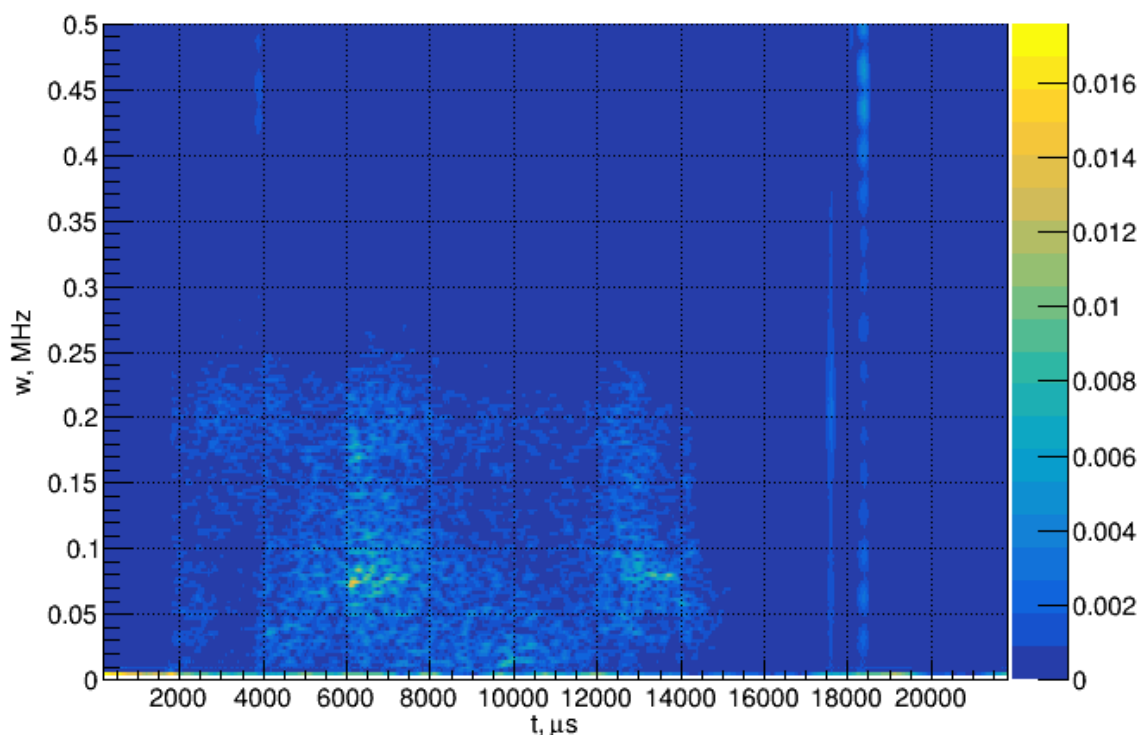


Рис.10 Пример частотно-временной гистограммы сигнала

Для корректного отображения временной зависимости размер окна должен быть меньше характерного времени изменения наблюдаемых явлений, но не слишком мал, так как он определяет шаг гистограммы по частоте. Оптимальное количество и длина окон подбирались для каждого описываемого в данной работе явления исходя из указанных соображений.

4. Результаты

4.1 Режим без дополнительного напуска газа в расширитель

В этом режиме потенциал подавался на 3 внутренних диска плазмоприемника. Нагревной гиротрон работал с 6.5 мс до 8 мс. Инжектора работали с 4 мс до 8 мс. Потенциал подавался с 6,5 мс и до 8 мс, однако в некоторых выстрелах пробои плазмоприемника приводили к тому, что внутренние диски заземлялись раньше.

В выстрелах, в которых потенциал на плазмоприемник не подавался, наблюдались колебания на частотах около 5-7 кГц на первой моде с большими амплитудами, которые в большей части выстрелов переходили в резкий рост амплитуды сигнала и превышению динамического диапазона АЦП. Рост сигнала совпадал по времени с резким спадом диамагнетизма плазмы (рис. 11).

Диамагнетизм плазмы связан с ее давлением, поэтому его резкое уменьшение соответствует быстрому распаду плазмы. Резкий рост магнитного поля около зонда в данном случае вызван выбросом плазмы на стенку вследствие неустойчивости. При этом во всех выстрелах рост сигнала на датчиках азимутальной сборки начинался с одной и той же стороны. Это явление будет рассмотрено более подробно в следующей части работы

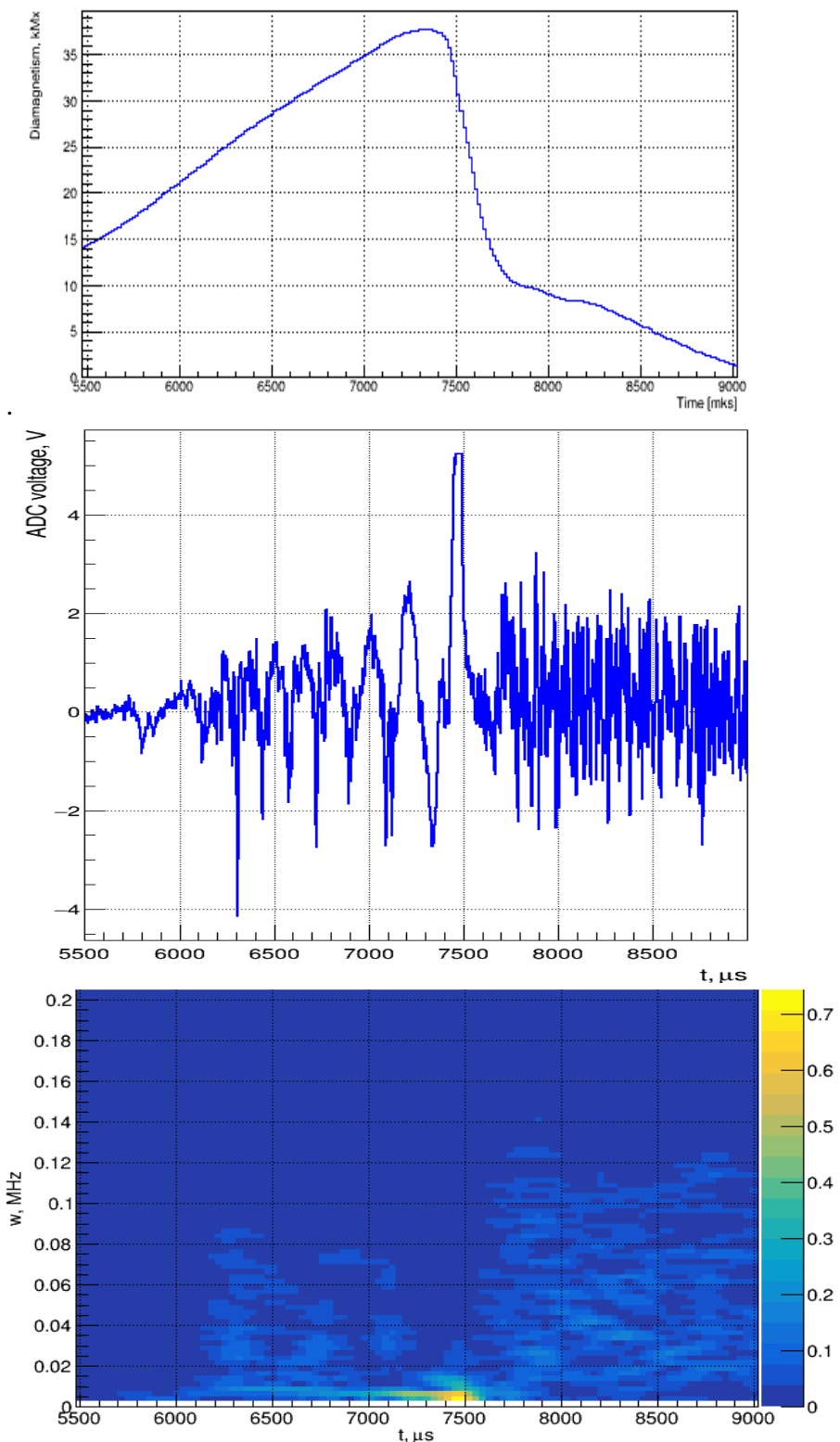


Рис.11 Диамагнетизм, сигнал с датчика азимутальной сборки и его Фурье-образ в зависимости от времени для выстрела без потенциала на плазмодриемнике.

При подаче малого потенциала (-400 В) частота колебаний возрастала до 7-9 кГц, при этом плазма также быстро распадалась до 8мс.

При подаче потенциала -600, -700 В амплитуды колебаний заметно снижались, а частоты росли до 15 кГц. После отключения напряжения,

частоты снова падали до 5-7 кГц а их амплитуды возрастали после чего снова происходил выброс плазмы на стенку в 8,5-9 мс. (рис. 12)

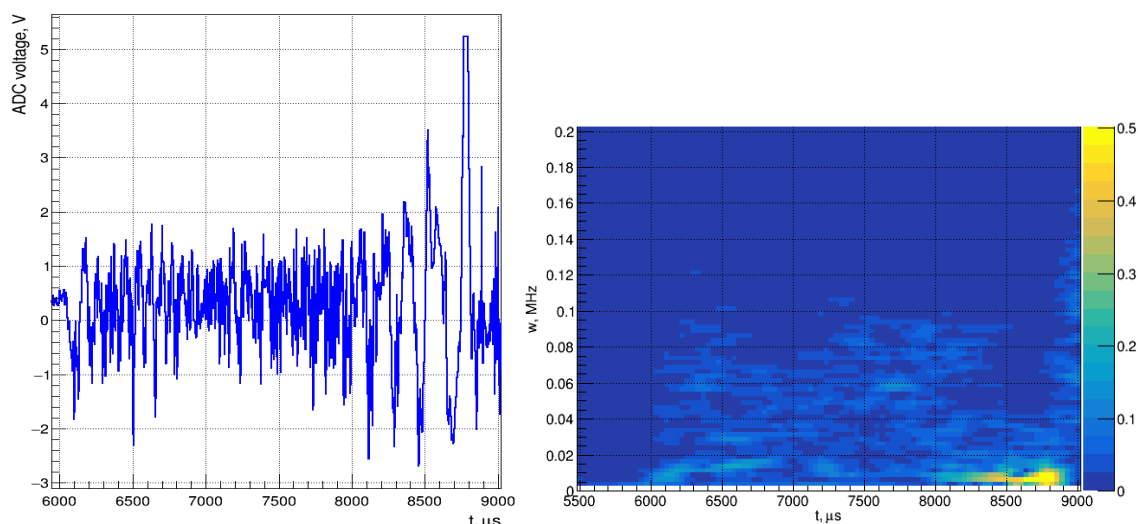


Рис.12 Сигнал с датчика азимутальной сборки и его Фурье-образ в зависимости от времени в выстреле с потенциалом В.

При потенциале -900 В в большей части выстрелов происходил пробой в плазмоприемнике, в результате чего внутренние кольца заземлялись раньше 8 мс. При этом хорошо заметно, что сразу после заземления внутренних колец частота колебаний начинает падать, а амплитуда расти (рис. 13)

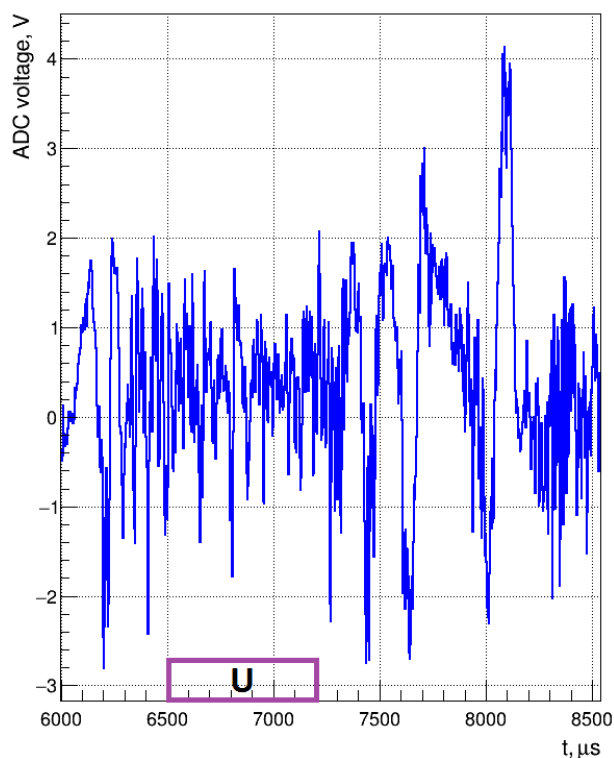


Рис.13 Сигнал с датчика азимутальной сборки в выстреле с потенциалом -900 В. На шкале времени отмечено время работы потенциала на плазмоприемнике.

В данной серии выстрелов высокочастотные магнитные зонды не работали.

4.2 Режим с дополнительным напуском газа в расширитель

В этом режиме потенциал подавался на 3 внутренних диска плазмоприемника. Нагревной гиротрон начинал работать в 7 мс и работал до 8.6 мс. Инжектора работали с 4 мс до 8 мс.

При отсутствии потенциала во время работы гиротрона и инжекторов колебаний на определенной частоте и моде не выделяется. Однако в конце работы инжекторов (в 7.6 - 8 мс в разных выстрелах) заметен рост сигнала на магнитных зондах. Как и в случаях, описанных в предыдущей главе, рост сигнала совпадал по времени с резким спадом диамагнетизма плазмы. (рис. 15).

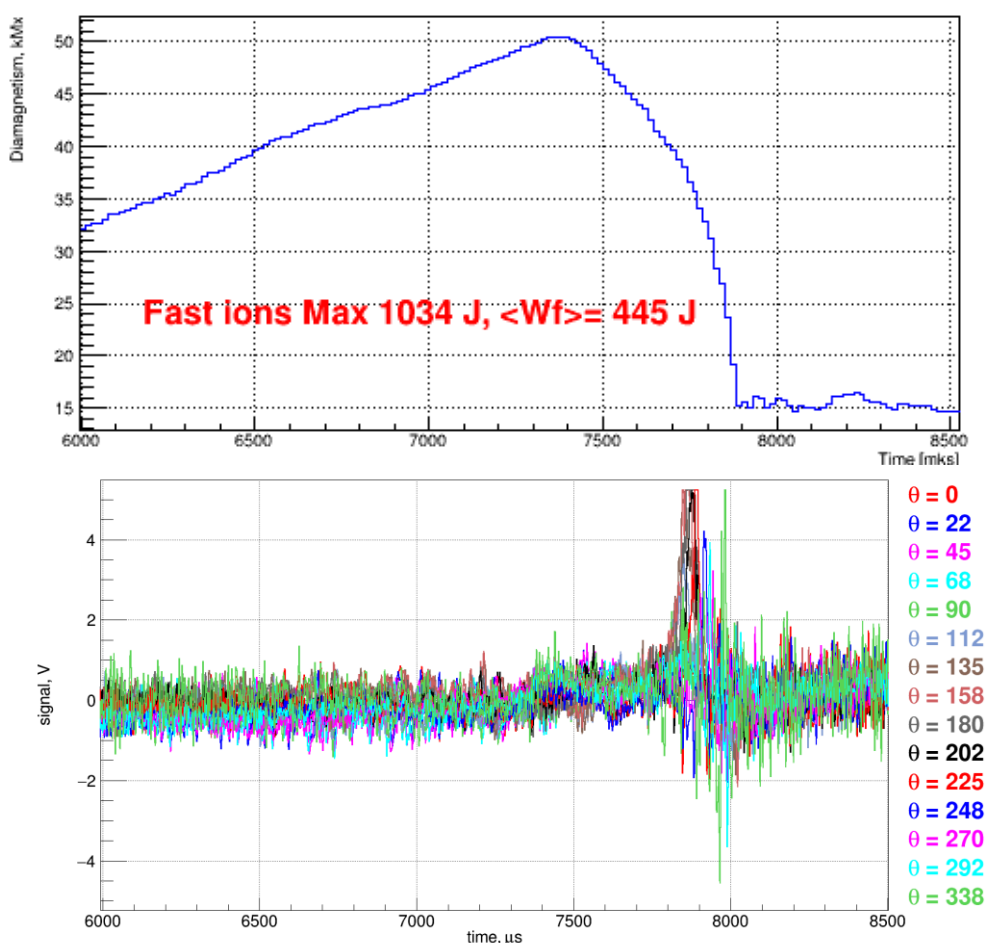


Рис.15 Сигнал магнитных зондов кольцевой сборки и диамагнетизм плазмы в выстреле без потенциала на плазмоприемнике

При этом видно, что некоторые из датчиков возмущаются сильнее других. Для более подробного исследования этого явления были построены диаграммы, где средний сигнал с датчика по промежутку времени отложен по радиусу, а полярный угол соответствует расположению датчика в установке. Далее из множества таких диаграмм по последовательным промежуткам времени была составлена анимация, для наблюдения зависимости показаний датчиков от времени. На этой анимации видно, что рост сигнала начинается во всех выстрелах с одной и той же стороны (датчиков с координатой 135^0 и 158^0), затем происходит вращение по часовой стрелке. (рис. 16).

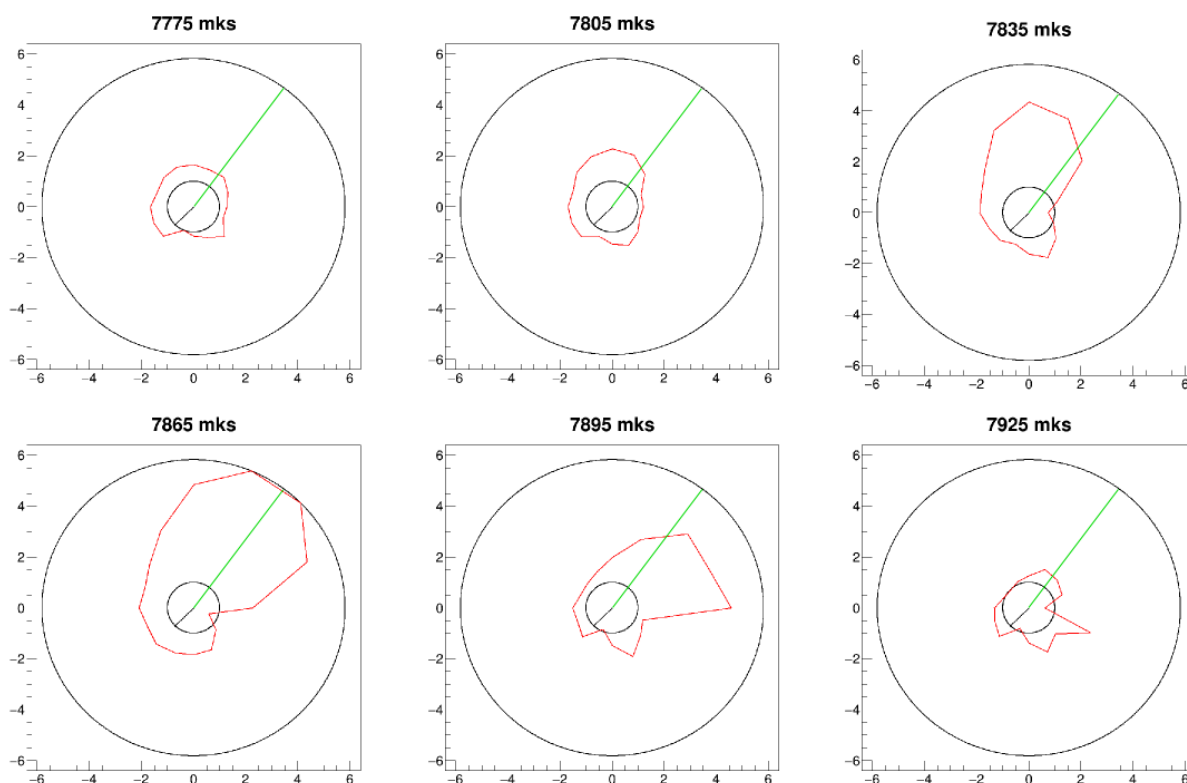


Рис.16 Сигнал зондов во время развала плазмы. Внутренняя окружность соответствует нулю сигнала, внешняя соответствует пределу напряжения, измеряемого АЦП (5.25 В).

Черная линия отмечает начало отсчета угла азимутальной сборки, зеленая отмечает положение ближайшего окна ввода гиротрона.

Такое поведение означает несимметричность установки относительно оси. Причиной несимметричности могут быть неточности в расположении элементов установки, а также влияние излучения нагревного гиротрона, положение которого указано на рисунке. Аналогичное поведение наблюдалось при потенциалах до -400 В.

При подаче потенциала -500 В характер наблюдаемых колебаний плазмы менялся. На рисунке 17 представлена зависимость Фурье образа сигнала одного из датчиков азимутальной сборки от времени. Для получения этого рисунка были взяты Фурье образы 400 отрезков сигнала длиной 400 мкс.

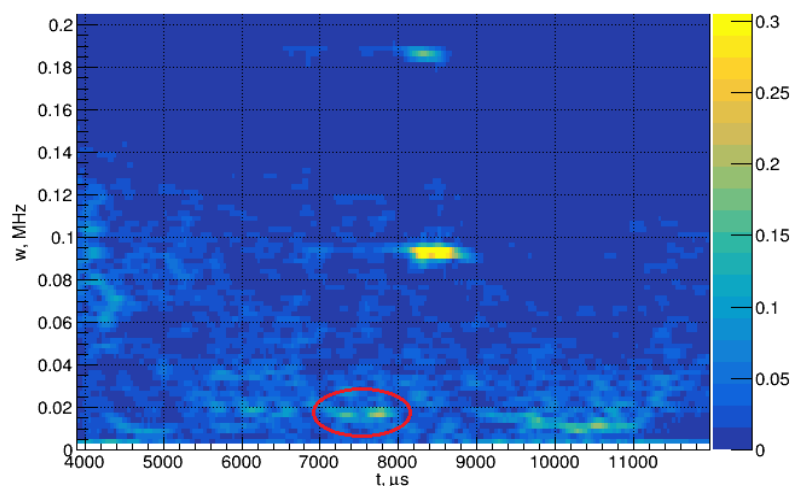


Рис.17 Зависимость Фурье образа сигнала одного из датчиков от времени в выстреле с потенциалом -500 В. Красным выделены колебания на частоте около 20 кГц

Во время, когда работали только инжектора (с 4 мс до 7 мс) колебаний на определенной частоте и моде не наблюдалось. После включения гиротрона (в 7 мс) можно наблюдать колебания на частотах около 20 кГц (На рисунке выделены красным) , однако их амплитуды очень малы. После отключения инжекторов возникают колебания на нулевой моде на частоте около 90 кГц с большими амплитудами. В некоторых выстрелах амплитуда этих колебаний превышала динамический диапазон АЦП (рис. 18)

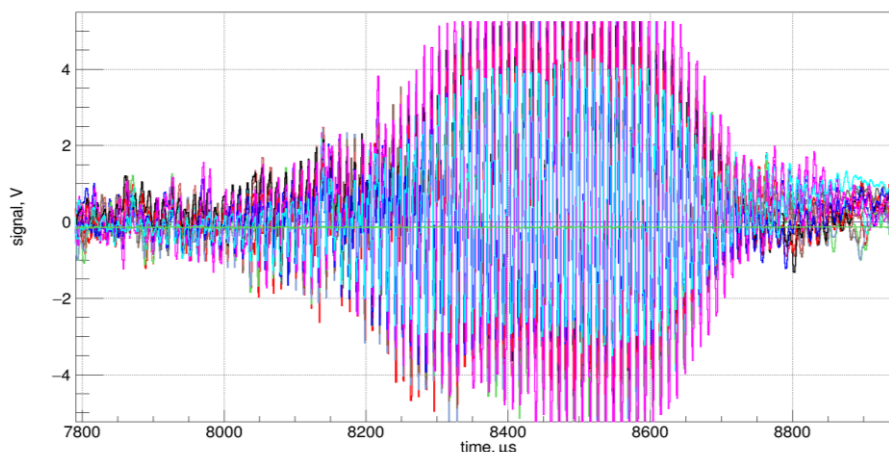


Рис.18 Пример сигнала кольцевой сборки после отключения инжекторов.

Вместе с 90 кГц на одиночном зонде были видны колебания на кратных частотах (рис. 19).

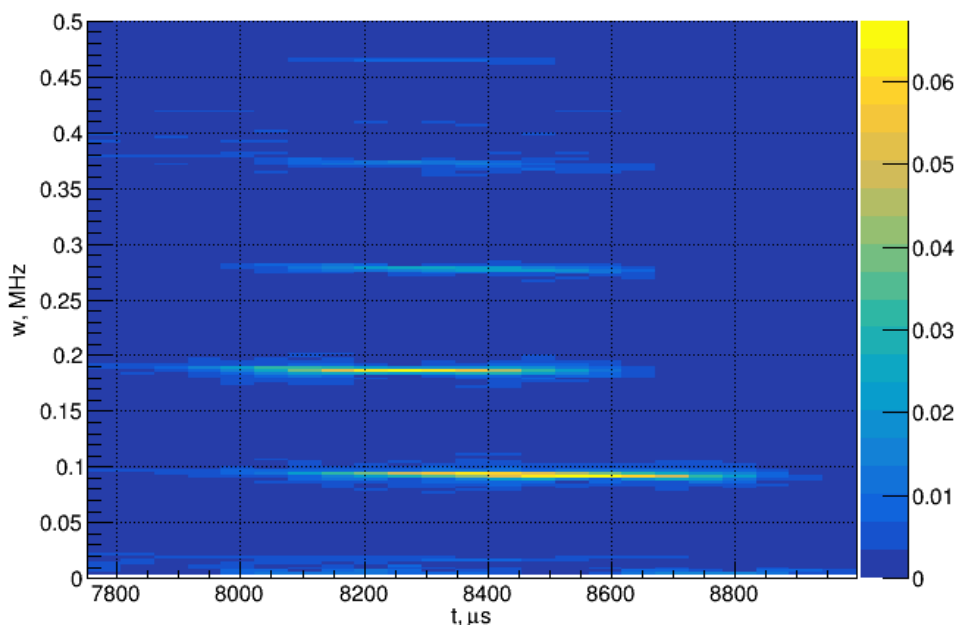


Рис.19 Зависимость Фурье образа сигнала одиночного зонда в том же выстреле.

Подобные колебания наблюдались в течение всего выстрела в работе [7], однако в данных режимах они возникали только после отключения нейтральной инжекции и длились всего 0.4 мс. Помимо этого с 10 до 11 мс наблюдались колебания на второй моде на частоте 10 кГц. Аналогичные явления наблюдались при потенциалах -600, -700, -800 и -1000 В. Такой набор колебаний соответствовал выстрелам, в которых диамагнетизм спадал медленно (рис. 20)

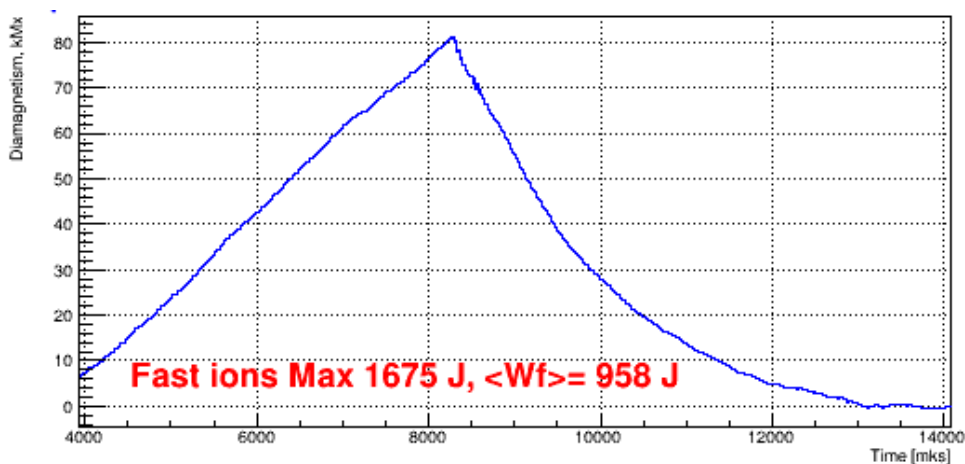


Рис.20 Пример диамагнетизма плазмы в выстреле с большим потенциалом на плазмодриемнике.

В нескольких выстрелах, вне зависимости от потенциала, после

выключения нагревного гиротрона наблюдались колебания на первой моде на частоте около 3 кГц. (Рис.21). Так как количество выстрелов, в которых наблюдались подобные колебания мало, связи их возникновения с режимом работы установки найти не удалось.

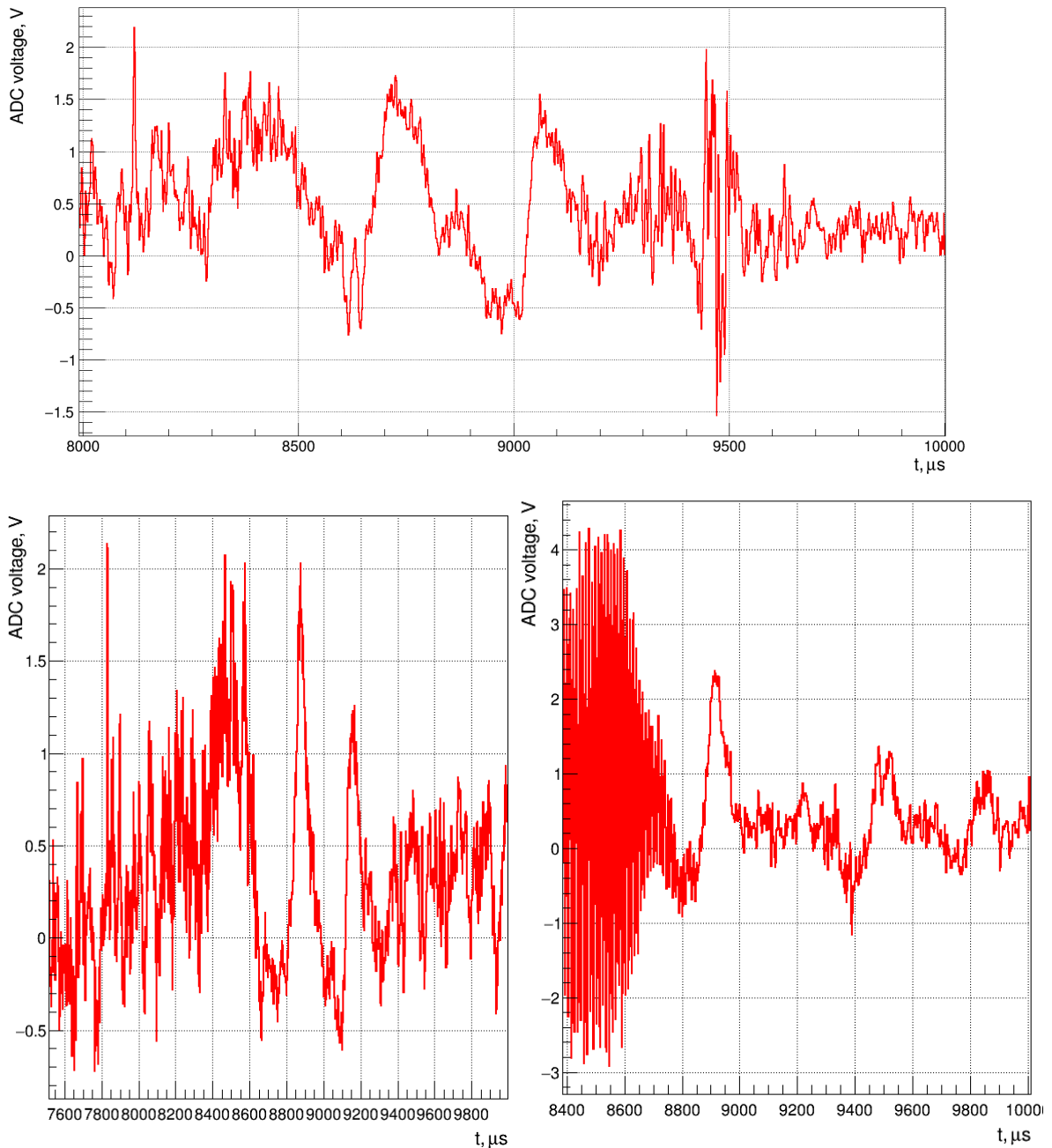


Рис.21 Примеры низкочастотных колебаний в выстрелах с потенциалом на плазмоприемнике -300 В (вверху), -500 В (внизу слева) и -1000 В (внизу справа).

На высокочастотных датчиках вне зависимости от потенциала на плазмоприемнике наблюдаются колебания на частотах от 24 МГц до 65 МГц в виде параллельных «линий» на диаграмме Фурье образа от времени с 5,5 мс и до 8,5 мс (рис. 22). Линии отличаются по частоте на 5-6 МГц, и

частота каждой линии падает со временем. Частота этих колебаний не совпадает с оценочными характерными частотами колебаний плазмы возле высокочастотных датчиков. Наклон полос не совпадает с производной магнитного поля установки в данный промежуток времени. Для дополнительной проверки зависимости этих колебаний от магнитного поля было сделано несколько выстрелов со сдвинутым по времени магнитным полем. Зависимости от магнитного поля обнаружено не было.

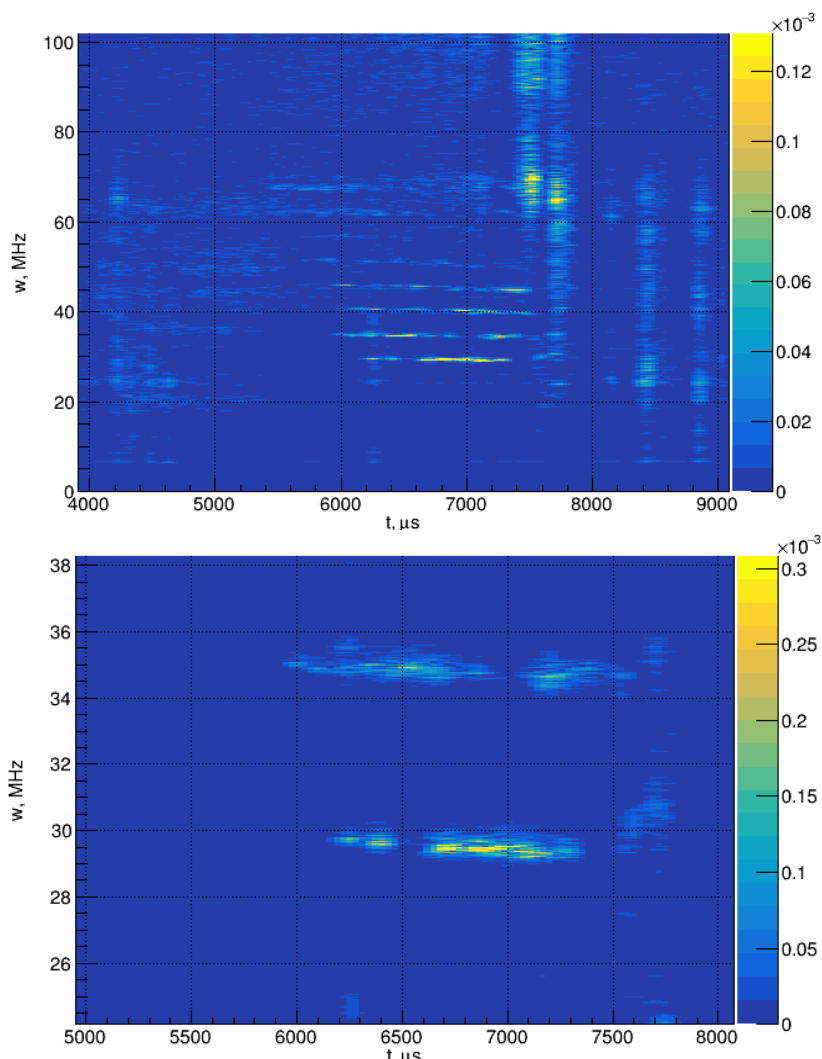


Рис.22 Пример высокочастотных «линий». Сверху – полный набор линий. Снизу – две нижних линии в приближении.

Можно также отметить отсутствие в течение всего выстрела колебаний на частоте порядка 1-2 МГц, соответствующих развитию Альфеновской ионно-циклотронной неустойчивости, которая наблюдалась в прежних экспериментах [8].

Выводы

В данной работе:

- Показано, что в режимах без напуска газа возникают колебания магнитного поля на частотах 5-20 кГц с первой азимутальной модой. Показано, что амплитуды колебаний снижаются при подаче потенциала на плазмоприемник, а их частота увеличивается.
- Показано, что напуск газа в расширитель приводит к снижению амплитуд колебаний сигналов магнитных зондов на частотах 5-20 кГц до уровня шумов. При подаче потенциала -500 В и ниже распад плазмы начинался не раньше отключения нагревных инжекторов.
- Обнаружена несимметричность процесса распада плазмы в неустойчивых режимах.
- Наблюдались несколько типов колебаний, возникавших при медленном распаде плазмы в устойчивых режимах на частотах 3-10 кГц и на частотах, кратных 90 кГц.
- Наблюдались колебания на частотах 20-80 МГц, которые начинались через 1,5 мс после начала атомарной инжекции и продолжались до начала распада плазмы.

Список литературы

1. P.A. Bagryansky, A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, et al., *Physical Review Letters*, 114, 205001 (2015).
2. P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, G.G. Denisov, et al., *Nuclear Fusion*, 55 (2015) 053009
3. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы М.: Бином 2013.
4. M. N. Rosenbluth, C. L. Longmire *Stability of Plasmas Confined by Magnetic Fields Annals of Physics*: 1, 120-140 (1957).
5. Аникеев А. В. Равновесие, устойчивость и продольное удержание плазмы в Газодинамической Ловушке: дис. ... канд. физ-мат наук: 01.04.08. Новосибирск 1996. – 92 с.
6. Солдаткина Е.И. Поперечное удержание плазмы при дифференциальном вращении в Газодинамической Ловушке: дис. ... канд. физ-мат наук: 01.04.08. Новосибирск 2009 – 127 с.
7. D. I. Skovorodin, K. V. Zaytsev, A. D. Beklemishev *Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure Physics of Plasmas* 20, 102123 (2013); doi: 10.1063/1.4827265
8. K. V. Zaytsev, A. V. Anikeev, P. A. Bagryansky, et al., *Physica Scripta*, T161 (2014) 014004