

УДК 533.9

СТРУКТУРА ФЛУКТУАЦИЙ В КРАЕВОЙ ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА В РЕЖИМАХ С ТРАНСПОРТНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

© 2023 г. Д. Г. Васильков^{a,b,*}, Н. Н. Скворцова^a, Н. К. Харчев^a^a Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия^b Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*e-mail: lhdlhd81@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

После доработки 23.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Представлена эволюция флуктуирующих сигналов электростатических и магнитных зондов и рефлектометрии на стеллараторе Л-2М. Установка Л-2М представляет собой квазистационарную тороидальную магнитную ловушку, в которой плазма создается и нагревается с помощью мощного импульсного СВЧ-излучения. Анализировались импульсы с переходами к режимам улучшенного удержания, сопровождающиеся увеличением энергии, ростом плотности плазмы и перестройкой периферийного электрического поля. Спектральный анализ сигналов проводится с использованием Фурье-анализа и различных вейвлетов. Рассмотрено возможное влияние магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей на развитие переходных процессов.

Ключевые слова: магнитное удержание, стелларатор, транспортные переходы, турбулентность, зондовые измерения, рефлектометрия

DOI: 10.31857/S0367292123600371, EDN: HFLUJY

1. ВВЕДЕНИЕ

Для достижения условий критерия Лоусона в термоядерных установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) необходимо не только экстенсивное увеличение габаритов установок, но и улучшение физических характеристик удержания – увеличение электронной плотности плазмы n_e , относительного плазменного давления β , энергетического времени жизни τ_E . Скачкообразно данные параметры могут измениться при переходе в режим улучшенного удержания ($L-H$).

С момента открытия H -режима в токамаке ASDEX [1] в различных экспериментах было обнаружено большое разнообразие режимов с улучшенным удержанием. В стеллараторах H -режим был впервые продемонстрирован в [2], а существенное увеличение энергии плазмы W было продемонстрировано, например, в [3]. Общеизвестными признаками $L-H$ -перехода являются снижение уровня флуктуаций краевых параметров плазмы (плотности, потенциала, электрического поля, потока частиц) и интенсивности излучения H_α , а также скачкообразное увеличение энергии плазмы W и параметра β .

Хорошо известно, что в тороидальных установках УТС рациональные магнитные поверхно-

сти низкого и среднего порядка могут играть важную роль в удержании плазмы. Например, в стеллараторах с малым широм (угла вращательного преобразования) можно достичь лучших условий удержания, если вращательное преобразование близко, но ниже рационального значения [4]. В системах с большим широм существование рациональных магнитных поверхностей низкого порядка может обеспечить снижение переноса [3].

Что касается рациональных магнитных поверхностей низкого и среднего порядка на границе плазмы, наиболее типичным их следствием является развитие краевых локализованных мод (ELM). ELM – это короткие периодические возмущения плазменного фронта, которые наблюдаются во многих экспериментах в токамаках и стеллараторах. Различные магнитогидродинамические (МГД) неустойчивости рассматриваются как движущий механизм ELM -активности (например, баллонные, перестановочные и пилинговые [5]).

Появление ELM было также отмечено в МГД-устойчивом гелиаке TJ-II [6]. Для объяснения этого эффекта потребовалось рассмотреть дрейфовые колебания в рамках двухжидкостной гидродинамики, и объяснение было найдено с учетом взаимодействия дрейфовых мод с альфвеновскими и акустическими волнами [7]. То есть

необходимо отметить, что физические явления, влияющие на процессы транспортных переходов, могут быть весьма сложными, и в первую очередь требуется анализ характерных частот и инкрементов возмущений.

Переход к режиму с лучшим удержанием обязательно сопровождается уменьшением турбулентного переноса, то есть стабилизацией плазменных неустойчивостей. Тем не менее, роли, которые играют неустойчивости, могут быть довольно разнообразными. Хорошо известно, что даже переход между тесно связанными состояниями не может произойти без какого-либо триггера. В частности, это может быть локальное возмущение профиля параметров плазмы в результате развития неустойчивости, а также изменения потока частиц со стенки камеры [8]. $L-H$ -переход в стеллараторе, сопровождающийся заметным ростом энергии плазмы и эволюцией краевых возмущений параметров, наблюдался, например, в ТЖ-II [9]. В большинстве тороидальных установок транспортный переход не сопровождается выраженными всплесками активности МГД, но, например, на токамаке HL-2A была обнаружена внутренняя МГД-мода как предвестник $L-H$ -перехода [10]. Транспортные переходы в тороидальных устройствах обычно демонстрируют особенности, типичные для бифуркаций [11]. Под этим подразумевается существование двух устойчивых стационарных состояний.

Статья организована следующим образом: в разд. 2 кратко описывается экспериментальная установка и характерные особенности удержания плазмы, в разд. 3 представлены экспериментальные данные и результаты вейвлет-анализа. В разд. 4 излагаются возможные теоретические объяснения наблюдаемых эффектов. В разд. 5 представлено заключение.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка Л-2М (ИОФ РАН) — классический стелларатор с большим широм магнитного поля и плоской геометрической осью. Полное число периодов винтового поля $N = 14$, заходность $l = 2$, большой радиус геометрической оси тора $R_0 = 1$ м, средний радиус сепаратрисы $a_p = 0.115$ м, максимальное (резонансное) магнитное поле на оси $B_0 = 1.34$ Т. За относительную координату малого радиуса принята $x = a/a_p$, где a — средний радиус эллиптической магнитной поверхности. Подробнее об установке см. [12]. Создание и нагрев плазмы осуществляется с помощью СВЧ-излучения в диапазоне мощностей 0.1–1 МВт методом электронно-циклотронного резонанса на 2-й гармонике гирочастоты (75 ГГц) [13].

Эксперименты, описанные здесь, проводились при $\langle \beta \rangle \leq 0.25\%$, где $\langle \beta \rangle$ есть отношение газо-

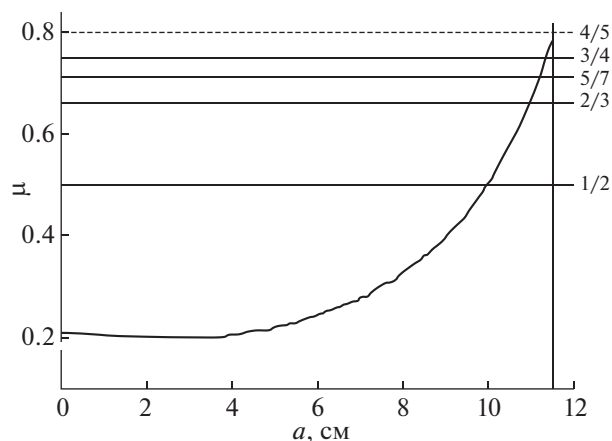


Рис. 1. Радиальное распределение угла вращательного преобразования μ при $\beta = 0.2\%$ и положение рациональных магнитных поверхностей.

кинетического давления плазмы к магнитному давлению, усредненное по объему плазменного шнура. В Л-2М плазма практически бестоковая, малый ток $I_p \sim 1$ кА (бустреп) не может заметно изменить геометрию магнитных поверхностей или повлиять на условия устойчивости.

Для анализа возможных периферийных возмущений нужно представление о положении резонансных поверхностей вблизи сепаратрисы — внутренних и внешних. Зависимость угла вращательного преобразования μ от среднего радиуса магнитных поверхностей и положение рациональных магнитных поверхностей невысокого порядка представлены на рис. 1. Диагностический комплекс установки позволяет определять глобальные и радиальные параметры плазмы (W , $T_e(a)$, $n_e(a)$), а также флуктуирующие значения электрического поля и плотности с помощью зондовых диагностик, рефлектометрии и рассеяния СВЧ-излучения гиротрона на флуктуациях плотности [14]. На рис. 2 представлена схема расположения высокочастотных диагностик на установке.

Для спектрального и корреляционного анализа высокочастотных сигналов применялись численные методы фурье-анализа и вейвлет-анализ (по базовым вейвлетам Морли и Хаара) [15].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В статье приведены исследования характеристик импульсов плазмы с транспортными переходами, которые наблюдались в двух экспериментальных сессиях. Анализировались импульсы № 16081 (с переходом) и № 16082 (без перехода) при мощности СВЧ-нагрева $P = 450$ кВт и средней линейной плотности $n_e = 2 \times 10^{19}$ м⁻³. Для сравнительного анализа был выбран импульс

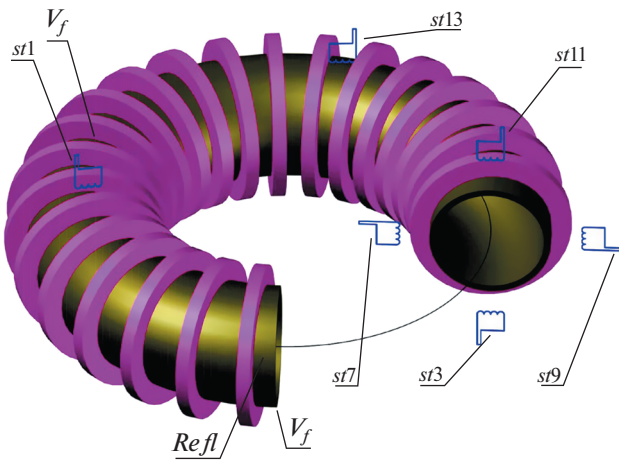


Рис. 2. 3D-модель установки и положения высокочастотных диагностических систем — магнитных зондов (st), ленгмюровских зондов (V_f) и рефлектометрии (Refl).

№ 57442 с быстрым транспортным переходом (БТП), для которого ранее подробно анализировалась структура и эволюция периферийного электрического поля; $P = 180$ кВт и $n_e = 1.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [16].

На рис. 3 представлены осциллограммы n_e , H_α и плавающего потенциала ленгмюровского зонда V_f в положении 1 см вглубь от сепаратрисы для импульса № 16081. Как видно, в разряде есть черты спонтанного $L-H$ -перехода; в момент времени около 57 мс наблюдается резкий рост n_e , более плавное падение H_α и уменьшение амплитуды колебаний электрического поля. Нужно отметить, что изменения в основных задаваемых параметрах — мощности СВЧ-нагрева P и режиме газонапуска нет, то есть переходы не вынужденные. На рис. 3г представлена мощность фурье-спектра сигнала V_f , где присутствует частотная полоса 10–30 кГц, практически исчезающая после перехода. Для сравнения представлены параметры сходного импульса № 16082, в котором перехода не наблюдается (рис. 4).

Далее анализировались экспериментальные результаты других диагностик, регистрирующие флуктуации параметров плазмы — магнитных (мирновских) катушек и доплеровской рефлектометрии. На рис. 5 представлены трехмерный Фурье (3d FFT) спектр и когерентность между сигналами магнитных зондов. Магнитные зонды разнесены на 13/14 вдоль тора (по тороидальной координате φ) и находятся в одном положении по полоидальной координате θ . Цветовая шкала соответствует различным значениям коэффициента Фурье и коэффициента когерентности. Видно возникновение возмущения с $f \sim 80$ кГц на 56-й мс, его исчезновение и возникновение

возмущения с $f \sim 30$ кГц при транспортном переходе. В импульсе без транспортного перехода (импульс № 16082) мода с $f \sim 80$ кГц также появляется на 56 мс и затухает при остывании плазмы на 61 мс. Важным является вопрос о причинах возникновения моды на 56 мс, поскольку на осциллограммах плотности и энергосодержания в этот момент времени нет соответствующих особенностей.

На корреляциях между разными магнитными зондами обнаружен рост кросс-когерентности на $f \sim 30$ кГц. Полоса 80 кГц на некоторых зондах пропадает при переходе, на других трансформируется. Ранее в работе [17] было обнаружено при БТП затухание мод с частотой $f \sim 35$ кГц и структурой $m = 5$, $n = 4$; m и n — соответственно тороидальное и полоидальное волновые числа. Соответствующей рациональной магнитной поверхности внутри сепаратрисы нет, возможно, возмущение связано с внешним резонансом.

Рассмотрим импульс с быстрым транспортным переходом (БТП) № 57442 (рис. 6). На магнитных зондах зарегистрировано устойчивое возмущение с частотой около 30 кГц, затухающее при транспортном переходе. Ранее мода с $f \sim 30$ кГц была обнаружена в импульсах с БТП, при переходе она трансформировалась в электромагнитную моду с частотой $f \sim 10$ кГц, характерной для геодезической акустической моды (ГАМ), но обладающей трехмерной геометрией. До перехода эта частота есть на когерентности между двумя сигналами V_f с разных Ленгмюровских зондов или V_f и флуктуирующим магнитным полем. После перехода она пропадает там и появляется на когерентности между двумя магнитными зондами [17].

Кроме того, на картине когерентности между двумя магнитными зондами (рис. 6) наблюдается исчезновение возмущения с частотой 130 кГц и появление возмущения с частотой 110 кГц. На рис. 7 представлены результаты измерений доплеровского рефлектометра [18]. Для режима с транспортным переходом приведены один из сигналов диагностики в течение импульса плазмы и изменение вейвлет-спектра, построенного по базовым вейвлетам Морли.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим характерные времена переходных процессов на разных параметрах плазмы в течение импульса с транспортным переходом. Падение интенсивности H_α начинается на 56-й мс, вспышка на магнитных зондах возникает на 56.5-й мс, падение флуктуаций и начало роста n_e и флуктуаций V_f происходит на 57-й мс, падение огибающей V_f и окончание роста n_e — на 58-й мс. Задержка между током и потенциалом при пере-

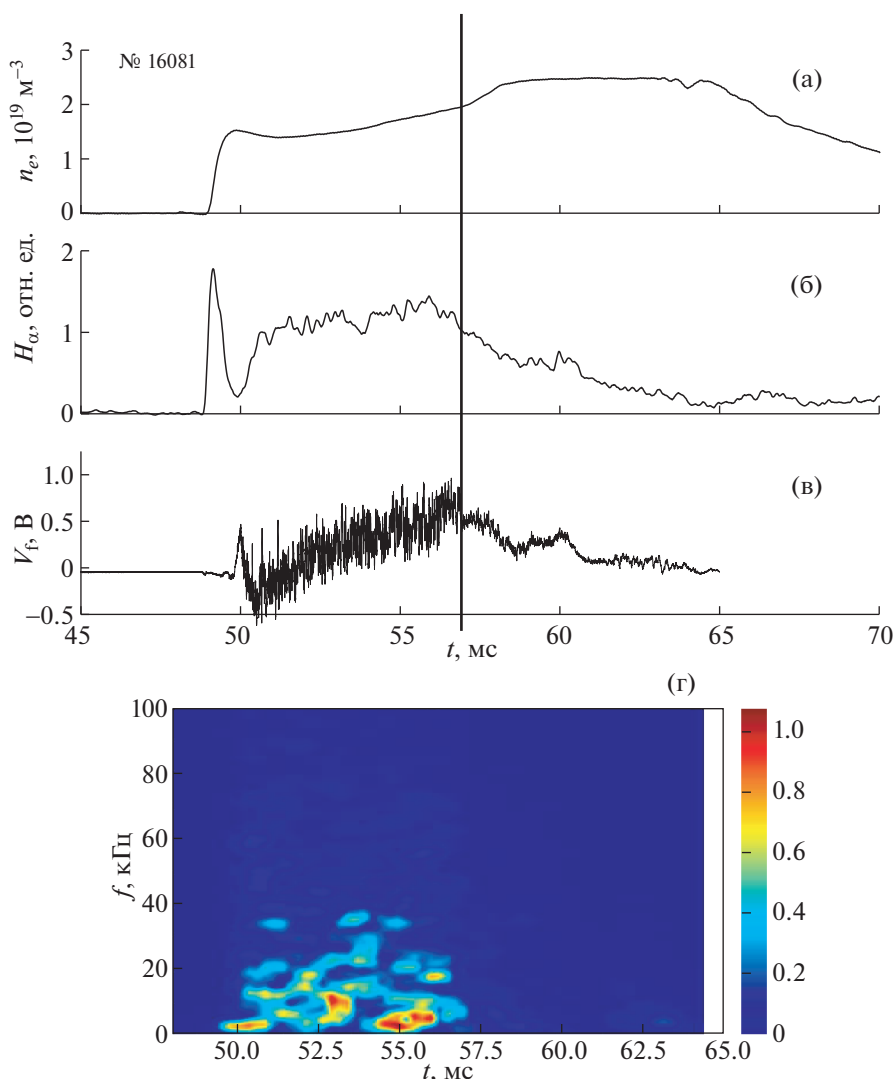


Рис. 3. Осциллограммы параметров плазмы в импульсе с транспортным переходом № 16081: а) средняя плотность плазмы n_e , б) сигнал интенсивности излучения H_α , в) плавающий потенциал V_f ленгмюровского зонда, г) мощность фурье-спектра V_f . Вертикальная линия отмечает момент начала транспортного перехода.

ходном процессе составляет 2 мкс [19], что логично, поскольку перестройка зарядов и приводит к трансформации электрического поля.

Когерентность между сигналами высокочастотных диагностик имеет вспыхивающий характер. Характерные частоты возмущений, трансформирующихся при переходных процессах, находятся в полосах $f \sim 30, 70, 120$ кГц.

В качестве механизмов, стимулирующих переходные процессы, могут быть рассмотрены локальные МГД-моды, дрейфовые неустойчивости и тиринг-моды, связанные с неиндукционным током, а также их возможные комбинации. За сброс энергии вблизи границы плазмы могут быть, в принципе, ответственны как приграничная внутренняя, так и внешняя моды (относи-

тельно сепаратрисы). Исследование приграничной плазмы при помощи ленгмюровских зондов позволило исключить влияние внутренней моды $m = 4, n = 3$. Возмущение внешней моды может быть связано с поведением частиц в стохастическом слое, в частности, с попаданием частиц бороуглеродной смеси, которой покрыта внутренняя поверхность камеры, в краевую плазму. Поэтому важным является вопрос о причинно-следственной связи явлений, сопровождающих спонтанный переходный процесс.

Ранее в качестве механизма, стимулирующего переходные процессы, рассматривались локальные МГД-возмущения. Для случая, рассматриваемого в данной работе (ЭЦР-разрядам без индукционного тока), плазма стабильна по отношению

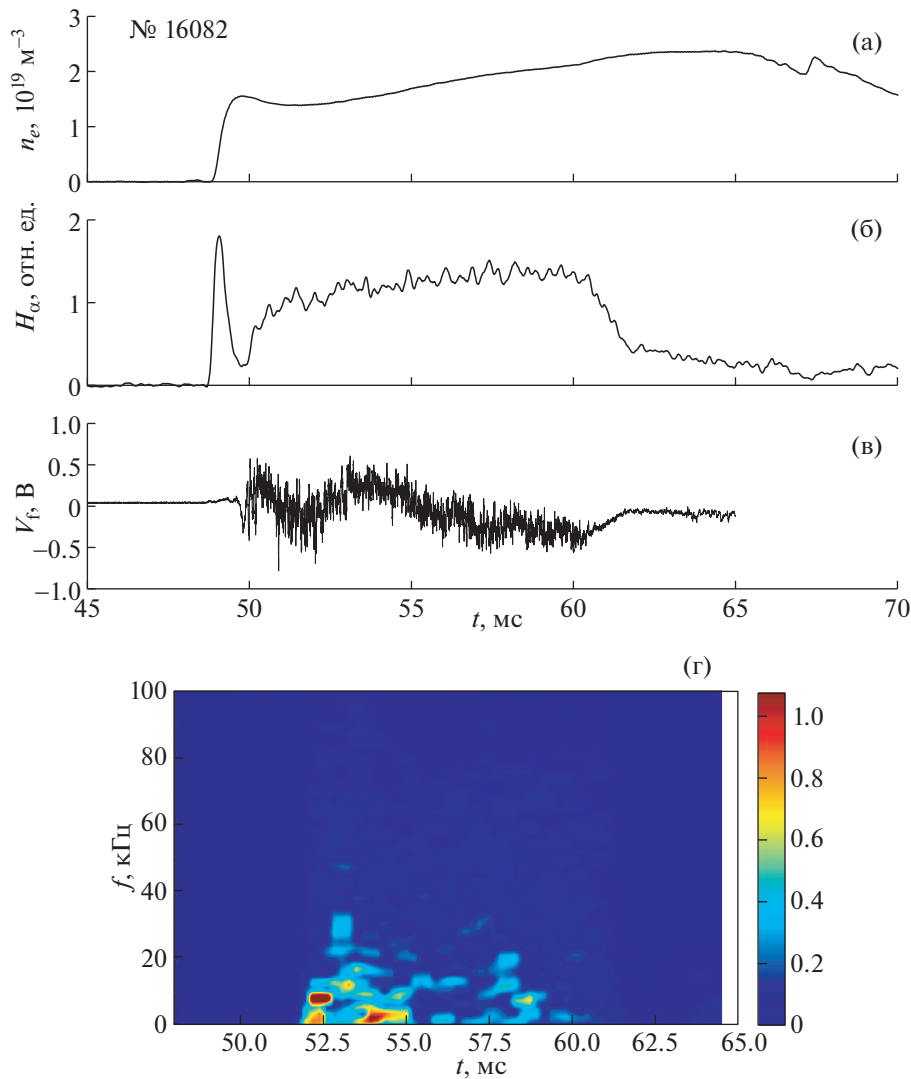


Рис. 4. Осциллограммы параметров плазмы в импульсе без транспортного перехода № 16082. Параметры аналогичны представленным на рис. 3.

к крупномасштабным идеальным МГД-модам. Вакуумная магнитная конфигурация обладает максимумом усредненного магнитного поля B , который оказывает сильное дестабилизирующее влияние на плазменную конфигурацию даже при малых β (так называемым магнитным горбом), однако в центральной части плазменного шнура существует магнитная яма, стабилизирующая крупномасштабные внутренние МГД-моды (перестановочные и баллонные). Во внешней области их устойчивость обеспечивается за счет высокого шира. Однако на краю плазменного шнура ($x > 0.6$) расположена зона магнитного бугра, и в данной области неустойчивы резистивные перестановочные МГД-моды, не стабилизирующиеся за счет шира [20]. В качестве триггера БТП, при которых происходит быстрый кратковременный сброс на диамагнитном сигнале dW/dt , имеющий

сходство с *ELM*, была предложена модель внешних локальных МГД-неустойчивостей (пилинг-мод) [21].

Идеальная пилинг-мода жестко привязана к границе плазмы, но у основного возмущения имеются тороидальные сателлиты. Для моды $m = 5$ и $n = 4$ сателлитом является мода $m = 6$ и $n = 4$, локализованная на поверхности с $\mu = 2/3$. Неустойчивые возмущения почти постоянны вдоль силовой линии магнитного поля. При этом многочисленные участки с благоприятной и неблагоприятной кривизной на силовой линии усредняются. Таким образом, за счет сателлитов характерный размер возмущения увеличивается до толщины порядка 1 см, что и принято за максимальную глубину проникновения ленгмюровского зонда вглубь плазмы от сепаратрисы.

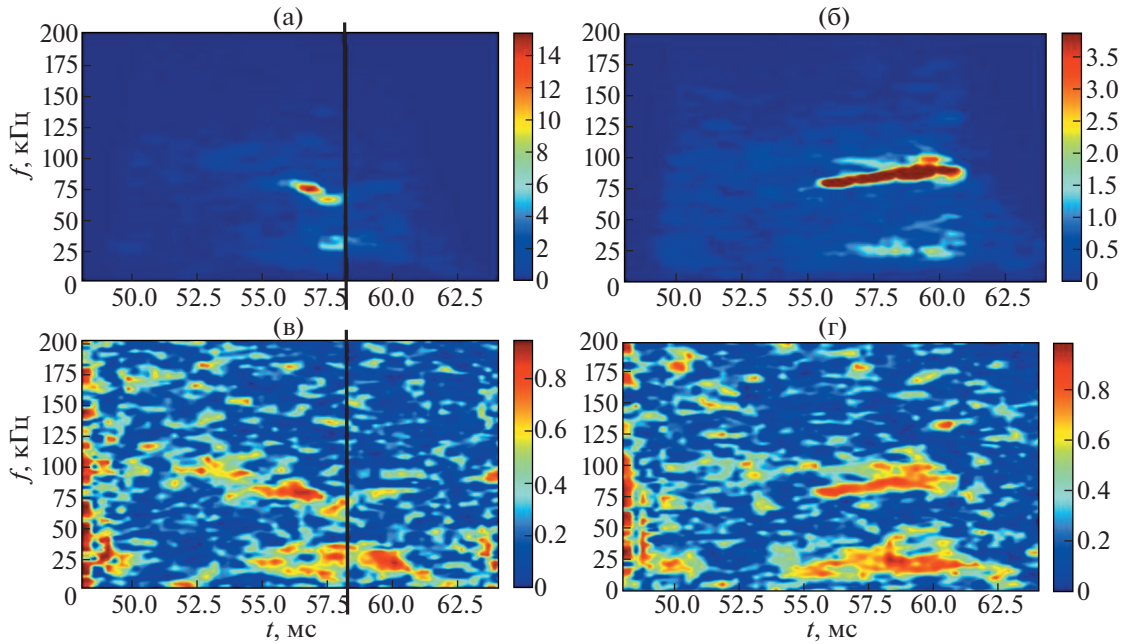


Рис. 5. Фурье-спектр сигналов магнитных зондов в импульсах с транспортным переходом № 16081 (а) и без № 16082 (б) и когерентность между сигналами магнитных зондов для них (в, г).

Необходимо также проанализировать возможное влияние дрейфовых неустойчивостей. Ограничимся рассмотрением ионно-температурных градиентных (ITG) и электронно-температурных градиентных (ETG) мод. В классических работах характерные параметры ITG и ETG мод определяются следующим образом: для ITG частота $\omega \sim \omega_{*i}$, поперечное (по отношению к магнитному полю) волновое число $k_{\perp} \sim 1/\rho_{Ti}$; для ETG $\omega \sim \omega_{*e}$, $k_{\perp} \sim 1/\rho_{Te}$; где ω_{*i} и ω_{*e} — частоты диамагнитного дрейфа ионов и электронов, ρ_{Ti} и ρ_{Te} — циклотронные радиусы ионов и электронов, рассчитанные в соответствии с их тепловыми скоростями [22].

В зависимости от условий конкретных магнитных конфигураций параметры мод и направления их распространения могут существенно отличаться от приведенных выше. Также не всегда существует четкая граница между диапазонами ионных и электронных мод, поскольку возможно их перекрытие [23].

Из анализа рефлектометрических измерений видно, что доплеровский сдвиг, оцененный по максимуму спектров, изменяется почти на порядок величины на установившейся стадии разряда. Это может указывать на то, что доплеровский сдвиг частоты определяется не только полой скоростью вращения, но и ее сложением с фазовыми скоростями турбулентных флуктуаций (при условии, что скорости имеют одинаковый порядок величины). Обнаружено, что в стеллара-

торе Л-2М режимы ITG и ETG могут наблюдаться одновременно [24].

Теоретически показано, что развитие неустойчивостей ETG и ITG на границе плазмы стелларатора для режимов с высокой мощностью нагрева и формированием провала на профиле плотности в центре плазменного шнура (эффект *rip-out* / “откачки плотности”) возможны. Локальные измерения спектров с использованием диагностики доплеровской рефлектометрии позволяют не только измерить скорость вращения плазмы, но и описать развитие низкочастотных плазменных неустойчивостей.

Характерные частоты различных возмущений, полученные аналитически, следующие:

1. Оценка характерной частоты ГАМ по формуле $\omega_{\text{ГАМ}} = (2\gamma p / \rho R_0^2)(1 + \mu^2/2)$, где p и ρ — соответственно давление и плотность плазмы, дает $f \approx 11$ кГц (при показателях адиабаты $\gamma = 1$ для электронов для ионов $\gamma = 5/3$, $T_e + T_i = 20$ эВ, $\mu = 0.7$) [15].

2. Двухжидкостная МГД с учетом диамагнитного дрейфа дает частоты возмущений $f_{2d} = k_{\parallel 2} V_{Ti} / 2\pi \approx 9$ кГц и $f_{3d} = k_{\parallel 3} V_{Ti} / 2\pi \approx 136$ кГц, где $k_{\parallel 2}$ и $k_{\parallel 3}$ соответствуют тороидальным и винтовым сателлитам основной моды.

3. Оценка характерных частот по рефлектометрическим измерениям в стеллараторе Л-2М составляет: для ETG неустойчивости около 1 МГц и для ITG около 100 кГц [22].

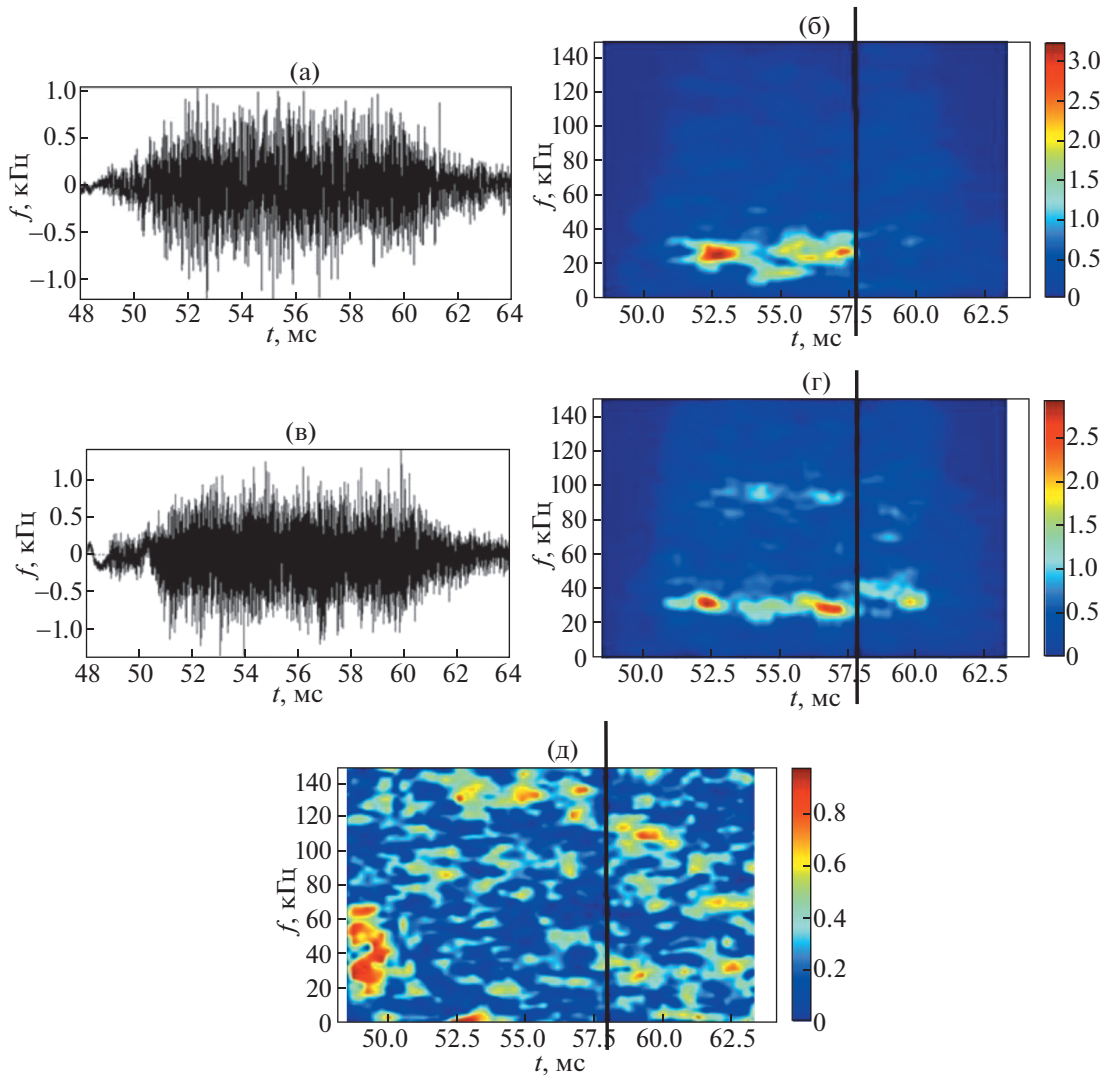


Рис. 6. Сигналы магнитных зондов в импульсе с БТП № 57442 (а, б), их фурье-спектры (в, г) и когерентность между сигналами (д).

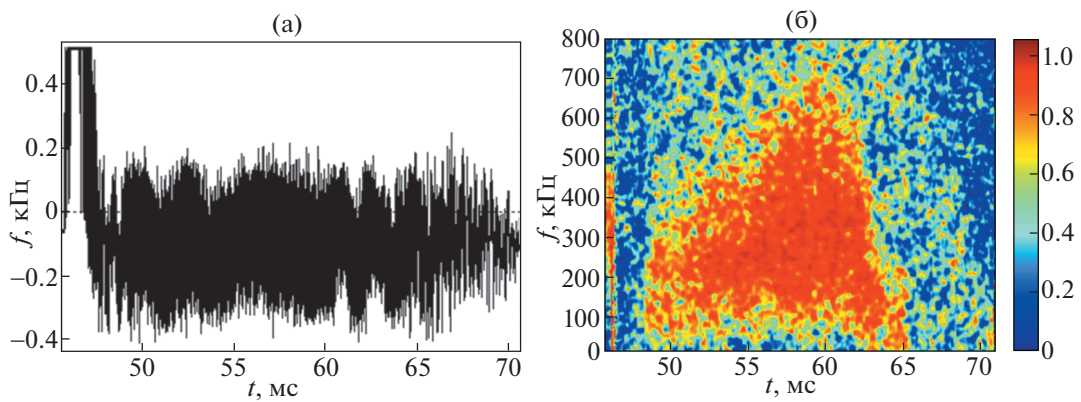


Рис. 7. Сигнал рефлектометра (а) и его фурье-спектр (б).

4. В стеллараторах наряду с GAM на средней кривизне возможно существование трехмерной акустической моды с $\omega \sim \omega_{\text{GAM}} N \mu / l$, где N — число периодов магнитного поля, l — заходность стелларатора. Оценка для Л-2М дает $f \approx 110$ кГц.

Для магнитных измерений наблюдались две характерных частоты флуктуаций: 75 и 32 кГц. Наиболее близкое к измеряемой в характерной частоте $f \sim 75$ кГц значение получается, если мы вычислим характерную частоту геодезической акустической моды, где в качестве кривизны используется средняя кривизна магнитного поля:

$$f = C_s \sqrt{2 + \mu^2} \sim 64 \text{ кГц}, \mu \approx 0.47 - \text{угол вращательного преобразования, где скорость звука } C_s = \sqrt{\gamma p / \rho} \approx 2.7 \times 10^7 \text{ см/с.}$$

В области частот $f \sim 30$ кГц простая аналитика не позволила получить оценки, возможно, требуется рассмотрение комбинации характерных процессов. Что касается возможного влияния тиринг-неустойчивостей, то в [25] обнаружено, что профиль n_e на глубину 1 см от сепаратрисы монотонный, что может говорить об отсутствии магнитных островов на данном участке (это не исключает их образования в более глубокой области). Однако требуется более подробный теоретический анализ.

В последующих работах предполагается представить аналитическое исследование кинетических неустойчивостей, а также возможность их комбинации с МГД (пилинг и тиринг) модами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена эволюция флуктуирующих сигналов электростатических и магнитных зондов и доплеровской рефлектометрии в плазме на стелларатора Л-2М. Установка Л-2М представляет собой тороидальную магнитную ловушку, в которой плазма создается и нагревается с помощью мощного импульсного СВЧ-излучения. Анализировались импульсы с переходами к режимам улучшенного удержания, сопровождающиеся увеличением плотности и давления плазмы и перестройкой периферийного электрического поля. Спектральный анализ сигналов проводится с использованием Фурье-анализа и различных вейвлетов. Рассмотрено возможное влияние магнитогиродинамических (МГД) и кинетических неустойчивостей на развитие переходных процессов, оцениваются характерные частоты различных возмущений в режимах с транспортными процессами.

Показано, что причиной быстрого транспортного перехода (БТП) может быть пилинг-мода, а для объяснения другого вида переходов, возможно, требуется привлечь модели кинетических неустойчивостей или их комбинацию с локальными

МГД-модами. Данное теоретическое исследование планируется провести в дальнейшем.

Авторы благодарны Ю.В. Хольнову и А.А. Харчевскому за предоставленные экспериментальные данные, В.С. Раковскому за 3D-модель установки, а также командам стелларатора Л-2М и гиротронных комплексов МИГ-2 и МИГ-3 за участие в экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagner F, Becker G., Behringer K., Campbell D., Eberhagen A., Engelhardt W., Fussmann G., Gehre O., Gernhardt J., Gierke G.V., Haas G., Huang M., Karger F., Keilhacker M., Kluber Q., Kornherr M., Lackner K., Lisitano G., Lister G.G., Mayer H.M., Meisel D., Miller E.R., Murmann H., Niedermeyer H., Poschenrieder W., Rapp H., Bohr H., Schneider F., Siller G., Speth E., Stabler A., Steuer K.H., Venus G., Vollmer O., Yuet Z. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 1408–1412.
2. Wagner F, Baldzuhn J., Brakel R., Burhenn R., Erckmann V., Estrada T., Grigull P., Hartfuss H.J., Herre G., Hirsch M., Hofmann J.V., Jaenicke R., Rudyj A., Stroth U., Weller A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. A61.
3. Toi K., Ohdachi S., Yamamoto S., Nakajima N., Sakakibara S., Watanabe K.Y., Inagaki S., Nagayama Y., Narushima Y., Yamada H., Narihara K., Morita S., Akiyama T., Ashikawa N., Ding X., Emoto M., Funaba H., Goto M., Ida K., Idei H., Ido T., Ikeda K., Imagawa S., Isobe M., Itoh K., Kaneko O., Kawahata K., Kobuchi T., Komori A., Kubo S., Kumazawa R., Li J., Liang Y., Masuzaki S., Mito T., Miyazawa J., Morisaki T., Murakami S., Muto S., Mutoh T., Nagaoka K., Nakamura Y., Nakaniishi H., Nishimura K., Nishizawa A., Noda N., Notake T., Ohkubo K., Ohtake I., Ohyabu N., Oka Y., Okamura S., Ozaki T., Peterson B.J., Sagara A., Saida T., Saito K., Sakamoto R., Sasao M., Sato K., Sato M., Satow T., Seki T., Shimozuma T., Shoji M., Sudo S., Tanaka M.Y., Tamura N., Tanaka K., Tsumori K., Uda T., Watari T., Weller A., Xu Y., Yamada I., Yokoyama M., Yoshimura S., Yoshimura Y., Yamazaki K., Matsuoka K., Motojima O., Hamada Y. and Fujiwara M. // Nucl. Fusion. 2004. V. 44. 217.
4. Hirsch M., Amadeo P., Anton M., Baldzuhn J., Brakel R., Bleuel J., Fiedler S., Geist T., Grigull P., Hartfuß H.J., Holzhauer E., Jaenicke R., Kick M., Kisslinger J., Koponen J., Wagner F., Weller A., Wobig H., Zolotnik S. and the W7-AS team. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1998. V. 40. 631.
5. Hirsch M., Grigull P., Wobig H., Kisslinger J., McCormick K., Anton M., Baldzuhn J., Fiedler S., Fuchs Ch., Geiger J., Giannone L., Hartfuss H.-J., Holzhauer E., Hirsch M., Grigull P., Wobig H., Kisslinger J., McCormick K., Anton M., Baldzuhn J., Fiedler S., Fuchs Ch., Geiger J., Giannone L., Hartfuss H.-J., Jaenicke R., Kick M., Maassberg H., Wagner F., Weller A. and the W7-AS Team. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2000. V. 42. A231.
6. Garcia-Cortes I., Luna E. de la, Castejón F., Jiménez J.A., Ascasibar E., Brañas B., Estrada T., Herranz J., López-Fraguas A., Pastor I., Qin J., Sánchez J., Tabarés F.L.,

- Tafalla D., Tribaldos V., Zurro B., TJ-II Team and Shchepetov S.V.* // Nucl. Fusion. 2000. V. 40. 1867.
7. *Shchepetov S.V., Kuznetsov A.B., Jimenez J.A.* // 2003 Proc. 30th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics (St Petersburg, 2003) V. 27A (Geneva: European Physical Society) p 4.6.
 8. *Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Вафин И.Ю., Гребенищikov С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Мещеряков А.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Харчевский А.А., Хольнов Ю.В., Щенетов С.В.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 666.
 9. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Estrada T., Ascasibar E., Alonso A., Chmyga A.A., Hidalgo C., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Liniers M., Lysenko S.E., de Pablos J.L., Pastor I., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Ufimtsev M.V., Tashchev Yu.I.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. 092002
 10. *Cheng J., Xu Y., Hidalgo C., Yan L.W., Liu Yi, Jiang M., Li Y.G., Yu L.M., Dong Y.B., Li Y.B., Liu L., Zhong W.L., Xu J.Q., Huang Z.H., Ji X.Q., Song S.D., Yu D.L., Xu M., Shi Z.B., Pan O., Yang Q.W., Ding X.T., Duan X.R., Liu Yong and the HL-2A team.* // Phys. Letters A. 2016. V. 380. P. 3897.
 11. *Fujisawa A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. R1.
 12. *Abrakov V.V., Akulina D.K., Andryukhina E.D., Batanov G.M., Berezhetkskij M.S., Danilkin I.S., Donskaya N.P., Fedyanin O.I., Gladkov G.A., Grebenshchikov S.E., Harris J.H., Kharchev N.K., Kholnov Yu.V., Kolik L.V., Kovrizhnykh L.M., Larionova N.F., Letunov A.A., Likin K.M., Lyon J.F., Meshcheryakov A.I., Nechaev Yu.I., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Sbitnikova I.S.* // Nucl. Fusion. 1997. V. 37. P. 233.
 13. *Kharchev N.K., Batanov G.M., Berezhetkskii M.S., Borzosekov V.D., Fedyanin O.I., Grebenshchikov S.E., Grishina I.A., Khol'nov Yu.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kovrizhnykh L.M., Larionova N.F., Malakhov D.V., Meshcheryakov A.I., Petrov A.E., Pleshkov E.I., Sarksyian K.A., Shchepetov S.V., Skvortsova N.N., Stepankhin V.D., Vafin I.Yu., Vasilkov D.G., Voronov G.S.* // Plasma and Fusion Research. V. 2011. V. 6. 2402142.
 14. *Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Коврижных Л.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 511.
 15. *Скворцова Н.Н., Шестаков О.В., Малахов Д.В.* Методы численного анализа стохастических сигналов. Лекции по курсу "Прикладная радиофизика". М.: Изд-во МИРЭА, 2011. 108 с.
 16. *Shchepetov S.V., Kholnov Yu.V., Fedyanin O.I., Kuznetsov A.B., Vasilkov D.G., Akulina D.K., Batanov G.M., Gladkov G.A., Grebenshchikov S.E., Meshcheryakov A.I.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. 045001 (16 pp).
 17. *Vasilkov D.G., Kholnov Yu.V., Shchepetov S.V.* // Plasma Physics Reports. 2013. V. 39. P. 615–623.
 18. *Kharchevskii A.A., Bogachev N.N., Belukhov S.P., Malakhov V.D.V., Skvortsova N.N., Gusein-zade N.G.* // Journal of Instrumentation. 2020. Т. 15. C01038.
 19. *Maslov S.A., Vasilkov D.G., Kholnov Yu.V., Skvortsova N.N.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 666. 012009.
 20. *Мухайлов М.И., Щенетов С.В., Нюренберг К., Нюренберг Ю.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 1096.
 21. *Shchepetov S.V., Vasilkov D.G.* // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43. P. 720–725.
 22. *Jenko F., Dorland W., Kotschenreuther M., Rogers B.N.* // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. 1904.
 23. *Chirkov A.Yu.J.* // Fusion Energy. 2011. V. 33. 139.
 24. *Skvortsova N.N., Chirkov A.Yu., Kharchevsky A.A., Malakhov D.V., Gorshenin A.K., Korolev V.Yu.* // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 666. 012007.
 25. *Shchepetov S.V., Kholnov Yu.V., Vasilkov D.G.* // JETP Letters. 2010. V. 91. P. 170–173.