

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЦ-НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2020 г. Г. М. Батанов^а, В. Д. Борзосеков^{а,*}, Л. В. Колик^а, Е. М. Кончечков^а,
Д. В. Малахов^а, А. Е. Петров^а, К. А. Сарксян^а, Н. Н. Скворцова^а,
В. Д. Степахин^а, Н. К. Харчев^а, А. А. Харчевский^а

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принята к публикации 26.03.2020 г.

Продолжено исследование изменения во времени параметров турбулентных флуктуаций плотности плазмы при многоимпульсном электронно-циклотронном нагреве на стеллараторе Л-2М. Флуктуации плотности с различными значениями волновых векторов ($k = 30 \text{ см}^{-1}$, $k = 20 \text{ см}^{-1}$, $k = 2 \text{ см}^{-1}$, $k = 1 \text{ см}^{-1}$) и в различных пространственных областях плазменного шнура измерялись с помощью методики коллективного рассеяния микроволнового излучения. Проанализирован временной ход интенсивности флуктуаций плотности плазмы, имеющий вспышечный характер, в том числе в рядах со смещением области гирорезонанса из центра плазмы во внутрь тора на 3–4 см. Проведено сравнение особенностей эволюции интенсивности флуктуаций плотности в стеллараторе с эволюцией их статистических характеристик. Выявлено существование отклонений величины куртозиса (М4) от значения 3, также происходящее в виде вспышек. В течение импульса ЭЦ-нагрева существуют три группы с различными вспышками (как интенсивности, так и куртозиса их приращений). Выполнен автокорреляционный анализ флуктуаций плотности и их приращений, показавший изменения полуширины автокорреляционных функций в течение многоимпульсного электронно-циклотронного нагрева. Обсуждается вопрос о возможной инициации вспышечных процессов возмущениями в пристеночной области плазмы.

Ключевые слова: стелларатор, высокотемпературная плазма, турбулентность, флуктуации плотности плазмы, электронно-циклотронный резонансный нагрев, импульсный нагрев, куртозис

DOI: 10.31857/S0367292120100029

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы о нелокальности коэффициентов переноса и негауссовости функции распределения турбулентных потоков в высокотемпературной плазме магнитных ловушек являются принципиальными вопросами физики плазмы. В последнее время этим вопросам было посвящено несколько исследований [1–3]. Нестационарные процессы при импульсном ЭЦ-нагреве плазмы являются удобным объектом для изучения изменения как макрохарактеристик плазмы, так и характеристик ее микротурбулентности. Для изучения таких нестационарных процессов на стеллараторе Л2-М был предложен и использован режим последовательности импульсов ЭЦ-нагрева длительностью несколько миллисекунд и с такими же интервалами между импульсами [4]. Показано, что эволюция мощности потерь в течение импульса ЭЦ-нагрева состоит из трех стадий: стадии низких потерь за фронтом импульса ЭЦ-нагрева (стадия I),

стадии быстрого роста потерь (стадия II) и стадии квазистационарных потерь (стадия III) [5]. Иллюстрация разбиения длительности импульса ЭЦ-нагрева на стадии относительно эволюции потерь представлена на рис. 1. Установлено, что временной ход интенсивности турбулентных флуктуаций плотности представляет собой хаотическую последовательность всплесков продолжительностью 0.1–0.3 мс.

Было показано, что уже за передним фронтом импульса ЭЦ-нагрева возникает достаточно интенсивный всплеск флуктуаций, вслед за которым с интервалом 0.5–0.8 мс возникает серия интенсивных всплесков на стадии быстрого роста потерь. Дальнейшая эволюция уровня флуктуаций плотности, как правило, характеризуется понижением уровня флуктуаций.

Возникает вопрос, насколько скоррелированы во времени эти всплески флуктуаций из разных областей плазменного шнура, разнесенных в ра-

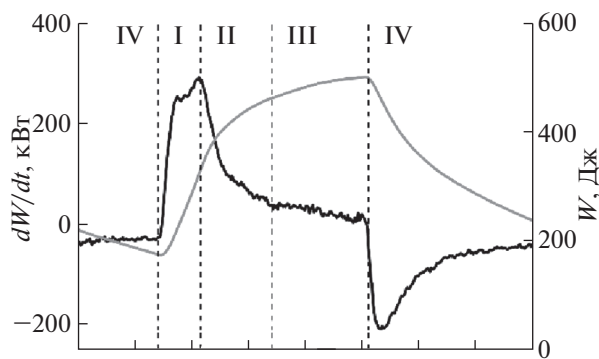


Рис. 1. Стадии эволюции потерь энергии в плазме стелларатора Л-2М при многоимпульсном ЭЦ-нагреве (разряд 21375). Производная диамагнитного отклика dW/dt (черная кривая, левая ось) и энергия плазмы W (серая кривая, правая ось).

диальном направлении с изменениями интегральных характеристик плазмы. А также вопрос об изменении других характеристик турбулентных флуктуаций на трех разных стадиях импульса ЭЦ-нагрева. Возбуждение коротковолновых флуктуаций плотности ($k = 20\text{--}30\text{ см}^{-1}$) в центральных областях плазменного шнура Л-2М при ЭЦ-нагреве связано электронно-температурной градиентной дрейфовой неустойчивости (ETG-моды) [6–8]. Анализ условий возбуждения такой неустойчивости в экспериментах последних лет на Л-2М проделан в работах [8, 9], и показано соответствие спектров турбулентных флуктуаций плотности спектрам, получаемым при теоретических расчетах. Ранее в экспериментах на токамаке DIII-D было показано, что уровень коротковолновых флуктуаций, возбуждаемых при ЭЦ-нагреве в результате развития ETG-моды и неустойчивости на запертых электронах (TEM-моды), пропорционален величине инкремента неустойчивости [10, 11]. Также показано, что, меняя профиль ЭЦ-нагрева смещением области гирорезонанса электронов по радиусу плазменного шнура, можно локально подавить развитие неустойчивости. В дальнейшем в экспериментах на Л-2М по дополнительному ЭЦ-нагреву плазмы была обнаружена задержка в повышении уровня коротковолновых турбулентных флуктуаций плотности относительно начала импульса дополнительного ЭЦ-нагрева [12] и выявлено кратковременное превышение 4-го момента приращения флуктуаций значения 3, что свидетельствовало об отклонении функции распределения вероятности (PDF) приращений флуктуаций от нормального закона (Гаусса).

До последнего времени статистические характеристики турбулентности в магнитных ловушках изучались для стационарных условий удержания. При этом в основном изучались процессы в пристеночной плазме. Результаты такого исследова-

ния изложены в обзоре [13]. Авторы обзора делают вывод, что “турбулентность плазмы ТПС у магнитосферы и в пристеночной плазме термоядерных установок характеризуется перемежаемостью, обобщенным самоподобием, мультифрактальностью и анизотропным каскадным процессом”. Подход авторов [13] к анализу стационарной турбулентности основывается на идеях обобщенного самоподобия возмущений с использованием функции распределения флуктуаций. Нестационарные хаотические процессы оказываются возможным анализировать в рамках формализма для обобщенных дважды стохастических пуассоновских процессов (обобщенных процессов Кокса) [14–16]. В рамках этой модели разработана методика описания турбулентного процесса с помощью разделения дисперсии приращений флуктуаций на диффузионную и динамическую компоненты. Применение той же модели к анализу переходного процесса при включении импульса дополнительного ЭЦ-нагрева на Л-2М, вызвавшего со стенок вакуумной камеры поток десорбированных атомов покрытия стенок [17], продемонстрировало отклонение PDF приращений флуктуаций от нормального закона, коррелирующее во времени с поступлением примесей во внутренние слои плазменного шнура Л-2М. При этом было установлено, что коэффициент эксцесса (M4-3) четко реагирует на отклонение PDF от нормального закона.

В связи с изложенным, в настоящем исследовании в качестве параметра, характеризующего турбулентность, была выбрана величина коэффициента эксцесса, т.е. отклонения величины куртозиса (M4) от значения 3, поскольку это отклонение означает отклонение функции распределения вероятностей от нормального (гауссова) закона, т.е. классического [18, 19] представления о турбулентности с описанием турбулентного переноса с помощью обобщенного закона Фика. Превышение M4 значения 3 может указывать на существование тяжелых хвостов в функции распределения вероятностей, что подразумевает появление неких крупномасштабных событий (функция влияния). Эти крупномасштабные события могут приводить к существенному увеличению переноса. Ранее [20] было обращено внимание на то, что турбулентные флуктуации наиболее чувствительны к внешним возмущениям в области высоких частот флуктуаций. Вследствие этого нами использовано вычисление коэффициента эксцесса для приращений флуктуаций плотности, т.к. именно приращения флуктуаций чувствительны к высоким частотам. Помимо этого, использование именно приращений является стандартным методом математической статистики для получения однородной и независимой временной выборки случайного процесса. Дополнительным средством анализа турбулентно-

сти в нашей работе послужил автокорреляционный анализ.

2. УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Стелларатор Л-2М является классическим двухзаходным стелларатором с 14 полными периодами винтового поля. Большой радиус тороидальной вакуумной камеры $R_0 = 100$ см. Средний радиус граничной магнитной поверхности $a_0 = 11.5$ см, стандартное значение магнитного поля на оси плазменного шнура $B(0) = 1.34$ Тл. Эксперименты были выполнены при длительности импульсов ЭЦ-нагрева и интервалов между ними ~ 2 мс и 4 мс. ЭЦ-нагрев осуществлялся на второй гармонике гирочастоты электронов (75 ГГц) при мощности линейно-поляризованного излучения гиротрона 0.2 МВт и 0.4 МВт, что соответствовало удельной мощности нагрева 0.8 МВт/м³ и 1.6 МВт/м³. Средняя плотность плазмы, измеренная по центральной хорде сечения плазмы с помощью СВЧ-интерферометра в серии разрядов находилась вблизи 2.0×10^{13} см⁻³. В течение каждого отдельного разряда средняя плотность изменялась не более чем на 10%. Температура электронов, измеренная по электронно-циклотронному излучению на частоте 74 ГГц в центре плазмы, достигала 0.7–1.0 кэВ и падала в интервалах между импульсами ЭЦ-нагрева до 0.1–0.3 кэВ. Характерная картина эволюции макропараметров плазмы представлена на рис. 2.

Турбулентные флуктуации плотности регистрировались с помощью коллективного рассеяния излучения гиротрона, обеспечивающего ЭЦ-нагрев плазмы, поэтому все диагностики, основанные на данном подходе, установленные в полоидальном сечении ЭЦ-нагрева (рис. 3). Линейно-поляризованное излучение гиротрона на границе плазменного шнура испытывает расщепление на Х- и О-моды [21]. Х-волна обеспечивает ЭЦ-нагрев. С помощью квазиоптического ответвителя измерялось обратное рассеяние Х-волны на коротковолновых ($k = 30$ см⁻¹) флуктуациях плотности [6]. Область рассеяния в этом случае захватывает весь радиус плазмы от граничной магнитной поверхности до области гирорезонанса. Методом брэгговского рассеяния О-волны на угол $\sim \pi/2$ измерялись коротковолновые флуктуации плотности с $k = 20$ см⁻¹ вблизи оси плазменного шнура ($R = 100$ см) и из области, смещенной от центра на 2 см ($R = 102$ см). Рассеянное излучение в этом случае регистрировалось рупорами в верхней полуплоскости тороидальной камеры стелларатора [22]. Рассеяние на $\pi/2$ в нижнюю полуплоскость регистрировалось коллимированной детекторной головкой через нижний патрубок. В этом случае были выполнены измерения с обоими типами поляризации рассеянного излучения, как для Х-волны (разряды 21362–21365), так и для О-волны (разряды 21372–

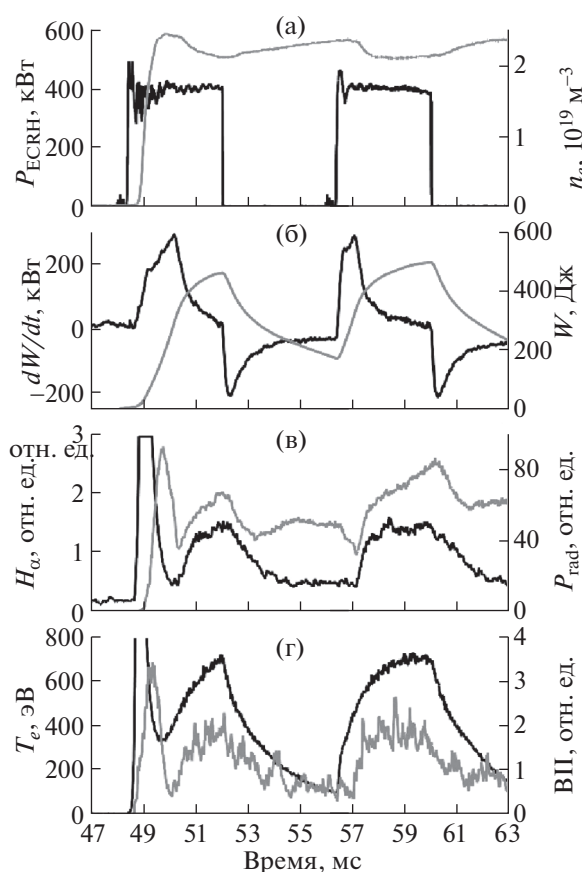


Рис. 2. Эволюция макропараметров плазмы в разряде 21375 стелларатора Л-2М при многоимпульсном ЭЦ-нагреве. а) – мощность ЭЦ-нагрева P_{CRHE} (черная кривая, левая ось) и средняя электронная плотность плазмы n_e (серая кривая, правая ось); б) – производная диамагнитного отклика dW/dt (черная кривая, левая ось) и энергия плазмы W (серая кривая, правая ось); в) – интенсивность излучения на линии $H\alpha$ (черная кривая, левая ось) и мощность радиационных потерь P_{rad} (серая кривая, правая ось); г) – электронная температура в центре плазменного шнура (черная кривая, левая ось) и интенсивность излучения на линии HII (серая кривая, правая ось).

21378). Область рассеяния в этих измерениях охватывала всю центральную область плазменного шнура ($98 \text{ см} \leq R \leq 102 \text{ см}$). В диагностике обратного рассеяния использовалась гомодинная регистрация сигналов, а в диагностиках брэгговского рассеяния на углы близкие к $\pi/2$ было использовано прямое детектирование рассеянного излучения. Гомодинное детектирование также реализовано и в диагностике малоуглового рассеяния [23], которая по рассеянию О-волны измеряет длинноволновые флуктуации ($k = 1$ см⁻¹) по всей длине центральной хорды. Продетектированные сигналы рассеянного излучения усиливались широкополосными усилителями и поступали на АЦП с частотой оцифровки 25 МГц. Представление о форме сигналов рассеянного излучения и их приращений можно получить из рис. 4. Длинноволновые флуктуации ($k = 2$ см⁻¹)

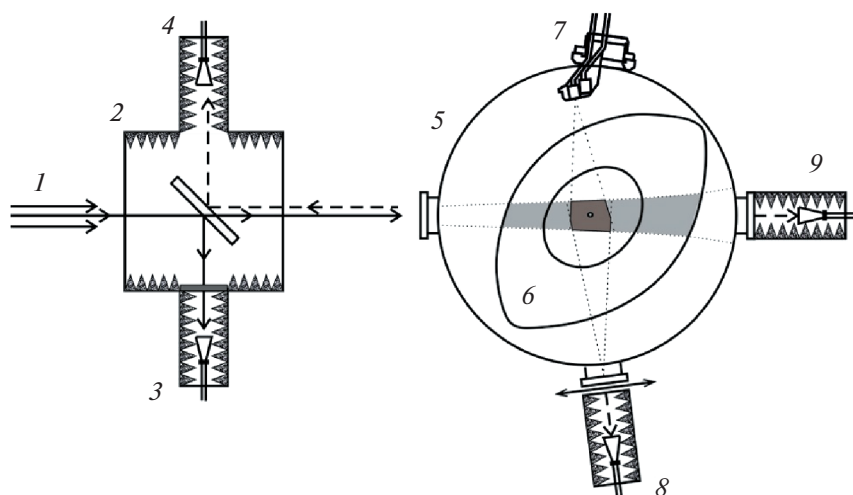


Рис. 3. Схема установки диагностик коллективного рассеяния в полоидальном сечении ЭЦ-нагрева на стеллараторе Л-2М. Ось тора находится справа. Закрашенные серым цветом области являются рассеивающими объемами для диагностик. 1 – микроволновый пучок, создаваемый мощным гиротроном; 2 – квазиоптический ответвитель; 3 – измерение уровня подаваемой мощности ЭЦ-нагрева; 4 – измерение обратного рассеяния Х-волны на коротковолновых ($k = 30 \text{ см}^{-1}$) флуктуациях плотности плазмы по половине центральной хорды (серый фон); 5 – торoidalная вакуумная камера; 6 – две магнитные поверхности (эллиптические черные линии); последняя замкнутая поверхность и поверхность на середине радиуса; 7 – измерение рассеяния О-волны вверх на коротковолновых флуктуациях ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) в центре плазмы (темно-серый фон) с помощью двух рупорных антенн смещенных на 2 см друг от друга параллельно экваториальной плоскости; 8 – измерение рассеяния как Х-волны (разряд 21363), так и О-волны (21375) вниз на коротковолновых флуктуациях ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) плотности в центре плазмы (темно-серый фон); 9 – измерение малоуглового рассеяния О-волны на длинноволновых ($k = 1 \text{ см}^{-1}$) флуктуациях плотности по всей длине центральной хорды (серый фон).

плотности плазмы на краю плазменного шнура регистрировались доплеровским рефлектометром [24], расположенным на удалении $5\pi/7$ по тору от полоидального сечения ЭЦ-нагрева. Частота оцифровки также составляла 25 МГц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные, наиболее подробные измерения выполнены при мощности 0.4 МВт при длительности импульсов ЭЦ-нагрева 4 мс и при такой же длительности интервалов между импульсами (рис. 1 и рис. 4). Для получения интенсивности флуктуаций плотности при обработке сигналов была использована постоянно применяемая нами процедура [25]. Результирующий сигнал, в случае рассеяния из области вблизи оси плазменного шнура, представляет собой широкие полосы протяженностью 0.4–0.8 мс с провалами уровня флуктуаций между ними такой же продолжительности (рис. 5б). Первая группа пиков привязана к переднему фронту импульса нагрева. Вторая группа всплесков наблюдается в районе 57.2–57.8 мс, что соответствует началу роста мощности потерь (стадия II) и началу падения плотности, регистрируемой по центральной хорде (рис. 2). Падение средней плотности, по всей видимости, вызвано эффектом откачки плотности (density pump-out) [26–29], регулярно наблюдающимся при ЭЦ-нагреве большой мощности и состоящем в уходе частиц из области нагрева на край плазмы.

Данный эффект на Л-2М регистрируется благодаря измерениям хордового HCN интерферометра [30], показывающим уменьшение плотности по центральной хорде и увеличение плотности по краевой хорде в течение импульса ЭЦ-нагрева [5]. Третья группа всплесков наблюдается в районе 58.4–58.6 мс. Наиболее интенсивной группой всплесков, как правило, является вторая. Для флуктуаций из области, смещенной на 2 см от оси наружу тора ($R > 102 \text{ см}$), эволюция квадрата флуктуаций аналогична, но повышен уровень в первой группе, так что между первой и второй группой всплесков регистрируется провал (рис. 5а). Уровень третьей группы оказывается значительно ниже уровня второй группы. Аналогичная ситуация и для флуктуаций, регистрируемых с помощью рассеяния О-волны в нижнюю полуплоскость (рис. 5в).

Укорочение интервала между импульсами не приводит к принципиальному изменению картины эволюции (рис. 6). Однако возникает возможность наблюдать эволюцию флуктуаций при смещении области гирорезонанса внутрь тора на 3–4 см ($R = 96\text{--}97 \text{ см}$). Это соответствует началу 3-го импульса нагрева на 60-й мс. Уровень флуктуаций в 3-м импульсе ($R = 100 \text{ см}$) примерно вдвое выше, чем во втором, наблюдается значительный провал между первой и второй группой всплесков (60.6–61.6 мс), и максимум во второй группе наблюдается на 62.6 мс. Такое замедление в эволюции уровня флуктуаций коррелирует с за-

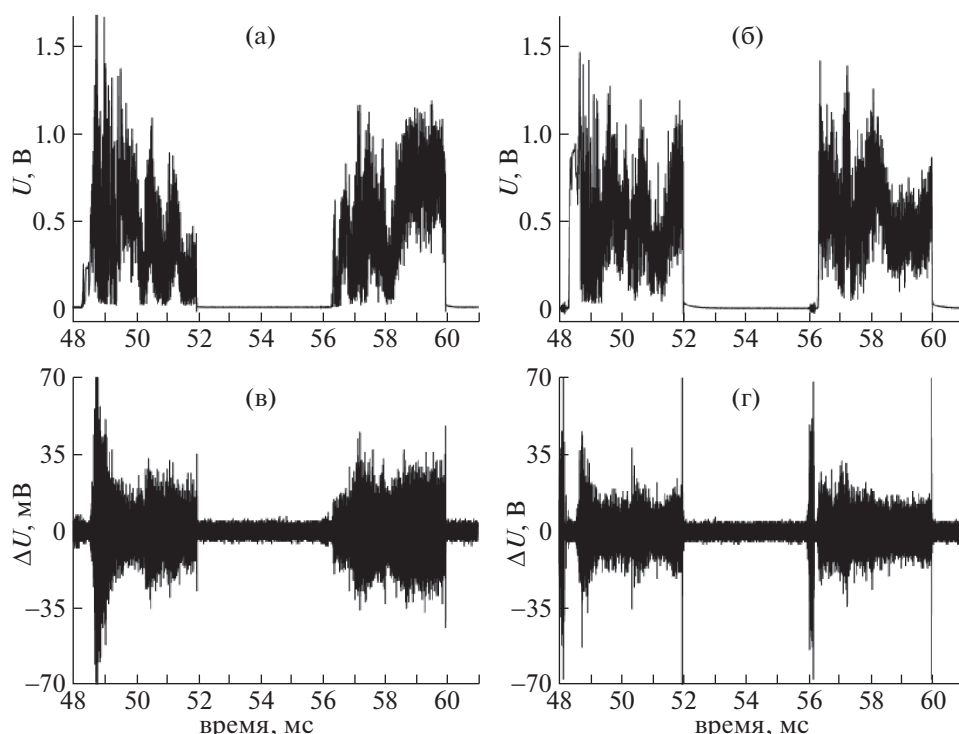


Рис. 4. Характерный вид сигналов рассеяния микроволнового излучения на флуктуациях плотности при импульсном ЭЦ-нагреве. а) – рассеяние О-волны вверх на коротковолновых флуктуациях плотности в центре плазменного шнура и в) – приращения этого сигнала; б) – малоугловое рассеяние О-волны на длинноволновых флуктуациях вдоль центральной хорды и г) – приращения этого сигнала.

медлением падения плотности, измеряемой по центральной хорде (рис. 7), по сравнению с эволюцией в импульсах нагрева при положении гирорезонанса на $R = 100$ см.

Аналогичная эволюция уровня флуктуаций регистрируется для области, смещенной наружу тора на 2 см ($R = 102$ см), и для флуктуаций, регистрируемых с помощью рассеяния Х-волны в нижнюю полуплоскость. Особенностью в последнем случае является на порядок меньшая величина интенсивности флуктуаций во втором импульсе ($R = 100$ см) по сравнению с третьим импульсом ($R = 102$ см). Такое различие уровня флуктуаций может быть связано как с особенностями распространения Х-волны в условиях характерных профилей плотности плазмы в стеллараторе Л-2М [31], так и с увеличением рассеивающего объема. Увеличение объема происходит за счет смещения области гирорезонанса, а значит, и области поглощения Х-волны (от $R = 100$ см к $R = 96-97$ см, т.е. к внутренней стороне тора) в третьем импульсе ЭЦ-нагрева. Для малоуглового рассеяния, т.е. для длинноволновых флуктуаций плотности, для третьего импульса нагрева характерным является существование интенсивной группы, начинающей с 61.7 мс. Как видно из рис. 6д, начало этой группы смещено относительно рассеяния из приосевой ($R = 100$ см) области на 0.3 мс. Стоит отметить, что работа [31] также показала уменьшение поглощения микро-

волнового излучения при смещении гирорезонанса во внутрь тора. При смещении на половину радиуса в области резонанса поглощается всего 50% падающего пучка, а это неминуемо должно приводить к увеличению мощности “шумового” излучения на частоте волны накачки, выходящего из вакуумной камеры после многократных переотражений от стенок камеры. Такое увеличение мы наблюдаем и экспериментально (рис. 8) с помощью системы регистрации микроволнового излучения, выходящего из экваториального наружного патрубка, смещенного на $2\pi/7$ по тору от сечения ЭЦ-нагрева. Хотя в разряде 21363 смещение гирорезонанса и не такое существенное, но эффект уже может начинать сказываться на поглощении микроволнового пучка.

При обратном рассеянии Х-волны (рис. 6г) также наблюдаются некоторые отличия от О-волн: регистрируется только одна интенсивная первая группа на переднем фронте второго импульса, также как и для рассеяния Х-волны в нижнюю полуплоскость из приосевой области плазмы ($R = 100$ см). Интересно отметить, что при смещении области гирорезонанса внутрь к $R = 96-97$ см в третьем импульсе при $t \geq 60$ мс наблюдается задержка начала второй группы на 0.3–0.4 мс для излучения, рассеянного из области $R = 102$ см, а также для излучения, рассеянного в нижнюю полуплоскость и излучения, регистрируемого при малоугловом рассеянии вперед О-волны, по

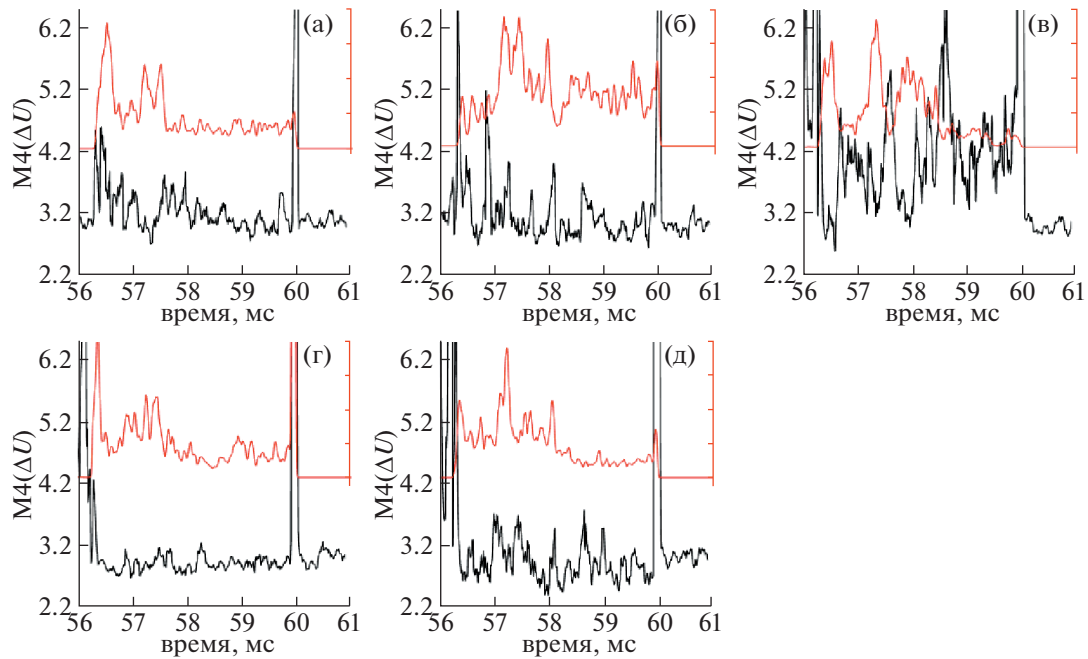


Рис. 5. Четвертый статистический момент $M_4(\Delta U)$ приращений флуктуаций плотности (черная кривая и левая ось) и интенсивность флуктуаций плотности (красная кривая и правая ось) при многоимпульсном ЭЦ-нагреве в разряде 21375. а) – коротковолновые ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности в области, смещенной от центра на 2 см ($R = 102 \text{ см}$), рассеяние О-волны; б) – коротковолновые ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности вблизи оси плазменного шнура ($R = 100 \text{ см}$), рассеяние О-волны вверх; в) – коротковолновые ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности в центре плазмы, рассеяние О-волны вниз; г) – коротковолновые ($k = 30 \text{ см}^{-1}$) флуктуации вдоль половины центральной хорды до области гирорезонанса, обратное рассеяние Х-волны; д) – длинноволновые ($k = 1 \text{ см}^{-1}$) флуктуации вдоль всей центральной хорды, малоугловое рассеяние О-волны.

сравнению с излучением, рассеянным из области на оси ($R = 100 \text{ см}$), и с излучением, регистрируемым при обратном рассеянии Х-волны. По-видимому, мы регистрируем задержку в развитии флуктуаций в областях, смещенных от центра плазменного шнура.

Аналогичную рассмотренной мы имеем и эволюцию рассеянных сигналов при мощности нагрева 0.2 МВт. Основное заключение, которое можно сделать из приведенного выше описания эволюции рассеянного излучения, состоит в том, что первая серия всплесков за фронтом импульса нагрева и провал в уровне флуктуаций между первой серией всплесков и второй серией соответствует периоду роста температуры и низкому уровню мощности потерь (стадия I). Вторая серия всплесков происходит во время роста мощности потерь (стадия II) и прогрессирующего падения плотности в центральной области плазменного шнура. Третья и, как правило, наиболее низкая по уровню серия всплесков соответствует квазистационарному уровню мощности потерь (стадия III) и слабо меняющейся плотности в центральной области плазменного шнура.

Какую же эволюцию демонстрирует куртозис (M_4) или коэффициент эксцесса (M_4-3) во всех рассмотренных выше случаях эволюции уровня флуктуаций? Отметим, что расчет куртозиса (M_4)

выполнялся по скользящему временному окну 100 мкс (2500 точек данных), а стандартное отклонение куртозиса, полученное аналогично [32], составило 0.098. В случае, когда длительность импульса нагрева и интервала между импульсами составляла 4 мс, результаты расчетов куртозиса (M_4) приращений флуктуаций в случае рассеяния из области вблизи оси плазменного шнура представлены на рис. 5б. Отклонение куртозиса от его значения при нормальном распределении, т.е. от $M_4 = 3$, носит характер резких всплесков продолжительностью более 50 мкс. При этом каждой группе всплесков флуктуаций плотности соответствует группа $M_4 > 3.5$. Наибольшее отклонение от нормального распределения имеет место для второй группы флуктуаций плотности. По времени первая группа и вторая группы всплесков M_4 приходятся на начало первой и второй групп всплесков флуктуаций. Более слабая третья группа всплесков M_4 приходится на широкий минимум уровня флуктуаций и предшествует третьей группе всплесков уровня флуктуаций. Аналогичная эволюция M_4 наблюдается и для флуктуаций, регистрируемых при рассеянии О-волны в нижней полуплоскости тора на рис. 5в и для области, смещенной от оси плазмы наружу на 2 см ($R = 102 \text{ см}$) на рис. 5а. Для флуктуаций, регистрируемых с помощью обратного рассеяния Х-волны (рис. 5г), отклонения M_4 от 3 практически нет,

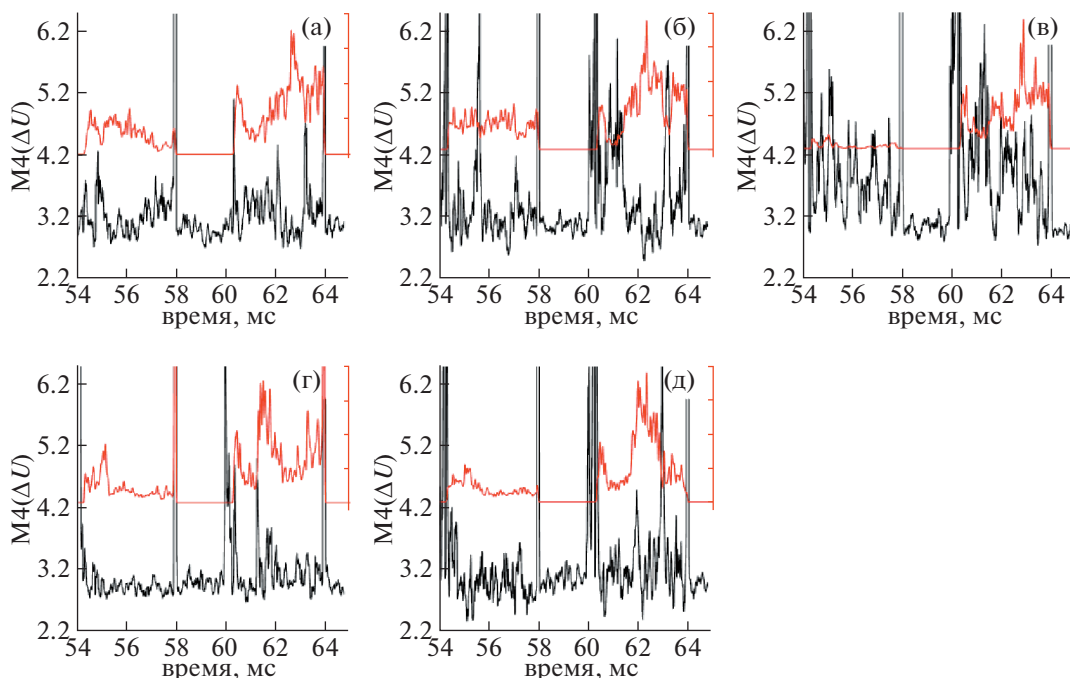


Рис. 6. Четвертый статистический момент $M4(\Delta U)$ приращений флуктуаций плотности (черная кривая и левая ось) и интенсивность флуктуаций плотности (красная кривая и правая ось) при многоимпульсном ЭЦ-нагреве в разряде 21363 со смещением области гирорезонанса внутрь тора на 3–4 см ($R = 96\text{--}97$ см) в третьем импульсе нагрева. а) – коротковолновые ($k = 20\text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности в области, смещенной от центра на 2 см ($R = 102$ см), рассеяние О-волны; б) – коротковолновые ($k = 20\text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности вблизи оси плазменного шнура ($R = 100$ см), рассеяние О-волны вверх; в) – коротковолновые ($k = 20\text{ см}^{-1}$) флуктуации плотности в центре плазмы, рассеяние Х-волны вниз; г) – коротковолновые ($k = 30\text{ см}^{-1}$) флуктуации вдоль половины центральной хорды до области гирорезонанса, обратное рассеяние Х-волны; д) – длинноволновые ($k = 1\text{ см}^{-1}$) флуктуации вдоль всей центральной хорды, малоугловое рассеяние О-волны.

что, возможно, связано с малой амплитудой флуктуаций регистрируемого сигнала, а значит, и с еще меньшими значениями приращений, недостаточными для проведения подобного анализа. Для длинноволновых флуктуаций, регистрируемых малоугловым рассеянием О-волны вперед, значение $M4 > 3.5$ регистрируется в начале импульса нагрева до момента роста мощности потерь, т.е. начала падения плотности по центральной хорде.

Характерно, что в случае обратного рассеяния Х-волны значение куртозиса превышает величи-

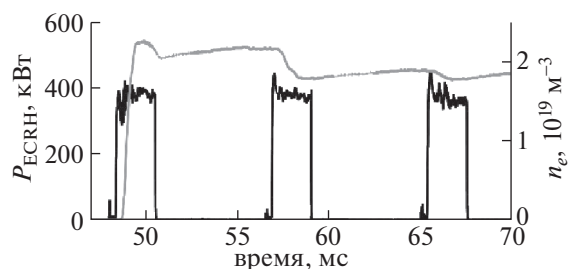


Рис. 7. Характерная эволюция средней плотности (серая кривая, правая ось) в разряде 21354 со смещением области гирорезонанса внутрь тора в третьем импульсе ЭЦ-нагрева (черная кривая, левая ось).

ну 3.5 и достигает 4 только на переднем фронте второго импульса нагрева ($R = 100$ см). В разряде 21363 в третьем импульсе нагрева ($R = 96\text{--}97$ см) интенсивный пик ($M = 4.5$) возникает и в начале второй группы всплесков флуктуаций (рис. 6г). Безусловно, было бы интересно выяснить поведение флуктуаций и $M4$ в центральных областях плазменного шнура в интервалах между импуль-

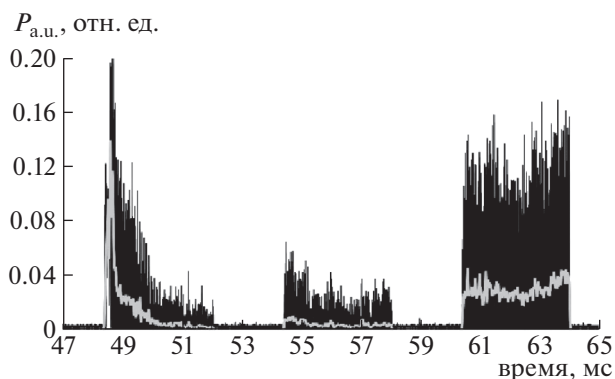


Рис. 8. Регистрация мощности микроволнового излучения $P_{n.a.}$ (“непоглощенная” мощность), выходящего из экваториального наружного патрубка, смещенного на $2\pi/7$ по тору от сечения ЭЦ-нагрева. Серая кривая – усреднение сигнала 50 мкс скользящим окном.

сами нагрева. Однако диагностики, результаты которых представлены выше, могут давать результат только в течение импульса ЭЦ-нагрева, поскольку микроволновое излучение, греющее плазму, для них является зондирующим. Авторы надеются, что этот недостаток будет возможно устранить после ремонта второго гиротрона комплекса ЭЦ-нагрева на Л-2М. Тогда один гиротрон будет греть плазму в импульсном режиме, а второй, работая на малой мощности постоянно в течение всего разряда, будет являться диагностическим. В этом случае также станет возможным использовать в качестве зондирующего излучения О-волну, т.к. в квазиоптическом тракте гиротрона имеется поляризатор излучения [33].

В рассматриваемых выше режимах удержания можно получить представление об изменении характеристик микротурбулентности в интервалах между импульсами ЭЦ-нагрева по рефлектометрическим и зондовым измерениям, но только на периферии плазменного шнура. В работе [5] в спектрах рассеяния излучения рефлектометра было установлено появление полос, смещенных от основной частоты излучения рефлектометра на $\pm(0.6-0.7)$ МГц спустя 0.5–0.7 мс от переднего фронта микроволнового импульса и их затухание спустя 1–2 мс после завершения импульса ЭЦ-нагрева. На рис. 9 представлена эволюция уровня флуктуаций плотности и куртозиса (M4) для приращений флуктуаций в разряде 21375, а на рис. 10 можно найти эволюцию второго момента (M2) приращений. Аналогичные результаты регистрируются и в других разрядах данной серии измерений. Прежде всего следует отметить четкую корреляцию в эволюции M2 для приращений флуктуаций с эволюцией спектров рассеянного излучения рефлектометра: высокие значения M2 совпадают по времени с существованием в спектрах рассеянного излучения полос $\pm(0.6-0.7)$ МГц. Эволюция коэффициента эксцесса (M4-3) приращений флуктуаций плотности на периферии плазменного шнура повторяет эволюцию коэффициента эксцесса для приращений флуктуаций плотности в центре (рис. 5а–в). Вместе с тем, после окончания первого и второго микроволновых импульсов (52-я мс и 60-я мс) регистрируются всплески высоких значений коэффициента эксцесса (52.1 мс и 60.1 мс). Кроме того, в моменты пауз между импульсами ЭЦ-нагрева также регистрируются всплески высоких значений куртозиса (M4 \approx 4–4.5), свидетельствующие о возникновении отклонений функции распределения вероятностей от нормального закона.

Существенным моментом после включения импульса ЭЦ-нагрева является задержка в изменении характеристик пристеночной плазмы. Это видно как по рефлектометрическим и зондовым измерениям флуктуаций, так и по измерениям радиационных потерь, плавающего потенциала

зондов и лимитера, интенсивности излучения линий нейтрального водорода H α и иона бора ВII. Можно предположить, что эта задержка вызвана задержкой распространения теплового возмущения от центра (из области ЭЦ-нагрева) и повышения температуры периферийной плазмы. Повышение температуры неизбежно должно вести к возникновению униполярных дуг на стенках вакуумной камеры, протекающих в форме кратковременных локальных микровзрывов, вызывающих кратковременные локальные выбросы плазмы с высокой концентрацией. Выключение импульса ЭЦ-нагрева прекращает этот процесс с временной задержкой, определяемой временем затухания энергии плазменного шнура. Всплески куртозиса выше значения 3.5 означают повышение вероятности возникновения больших амплитуд в приращении флуктуаций. Можно предположить, что это наблюдение отражает возникновение флуктуаций на высоких частотах. Ранее в [17] при включении/выключении импульса дополнительного ЭЦ-нагрева для коротковолновых флуктуаций было показано импульсное возрастание M4 выше значения 4–5. В [12] показано, что возмущения плотности, вызванные выбросом примесей со стенок вакуумной камеры при включении импульса дополнительного нагрева, вызывают, по измерениям спектров, появление флуктуаций плотности в центре плазменного шнура на частотах выше 0.3 МГц. Возможно, что и при импульсном нагреве мы сталкиваемся с аналогичным явлением, поскольку, как уже было сказано, моменту роста мощности потерь (стадия II) соответствует фронт роста плавающего потенциала на периферии плазмы [4] и рост радиационных потерь после их падения за фронтом импульса нагрева (рис. 2в), а также рост интенсивности излучения линий нейтрального водорода H α и иона бора ВII (рис. 2в и рис. 2д соответственно) и потенциала на лимитере. Однако по измерениям рефлектометра на краю плазменного шнура всплески M4 приращений флуктуаций плотности регистрируются и в паузах между импульсами нагрева, т.е. когда температура плазмы достаточно снизилась и вероятность возникновения униполярных дуг должна сильно уменьшиться. С другой стороны, и моделирование, и эксперименты на других установках (см. раздел III обзора [1] и ссылки там) показывают существование транспортных событий, которые могут распространяться в радиальном направлении как к краю (положительные амплитуды), так и к центру (отрицательные амплитуды) плазменного шнура. Такие транспортные явления в литературе принято называть лавинами, а их объяснение возможно на основе подхода самоорганизованной критичности. Очевидно, что природа всплесков M4 приращений флуктуаций плотности на стеллараторе Л-2М требует дальнейшего тщательного изучения.

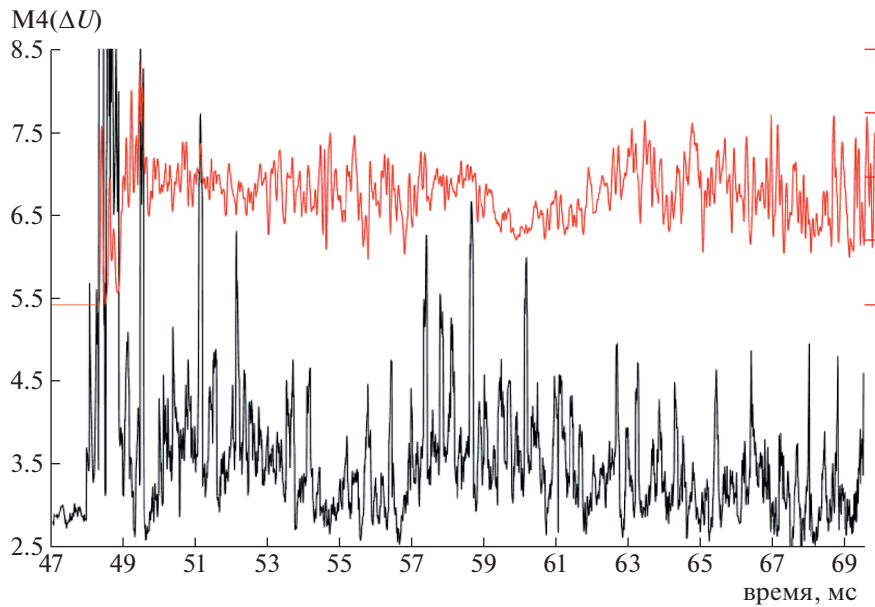


Рис. 9. Четвертый статистический момент $M_4(\Delta U)$ приращений флуктуаций плотности (черная кривая и левая ось) и интенсивность длинноволновых ($k = 2 \text{ см}^{-1}$) флуктуаций плотности (красная кривая и правая ось) на краю плазменного шнура при многоимпульсном ЭЦ-нагреве в разряде 21375.

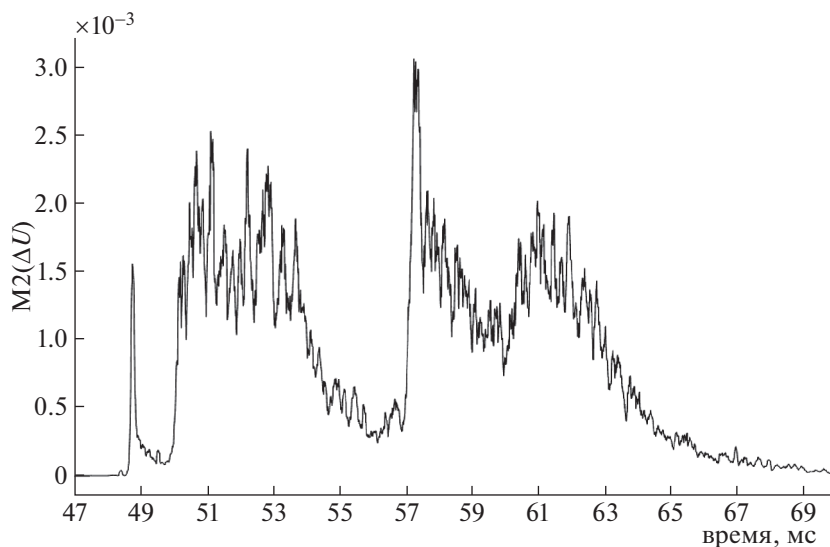


Рис. 10. Второй статистический момент приращений флуктуаций плотности на краю плазменного шнура, полученных с помощью доплеровской рефлектометрии.

Характеристикой турбулентного состояния плазмы является автокорреляционная функция (АКФ) флуктуаций плотности или их приращений. На рис. 11–14 представлены АКФ флуктуаций плотности плазмы, измеренных на разных интервалах разряда в Л-2М, а также АКФ приращений флуктуаций. Как известно, чем меньше полуширина АКФ на полувысоте, тем более широкополосным является процесс. Увеличение ширины АКФ показывает сужение спектра, что может указывать на появление в турбулентности

квазирегулярной составляющей. Также АКФ близкая к периодической функции указывает на квазирегулярную составляющую. На рисунках видно как уширение первого пика АКФ, так и квазипериодической долгоживущей составляющей, что характерно для турбулентности с функцией влияния (структурной турбулентности [14]). Рассмотрим изменение полуширины первого пика и уровня квазипериодической компоненты АКФ при импульсном включении ЭЦР-нагрева. Проведенный корреляционный анализ для раз-

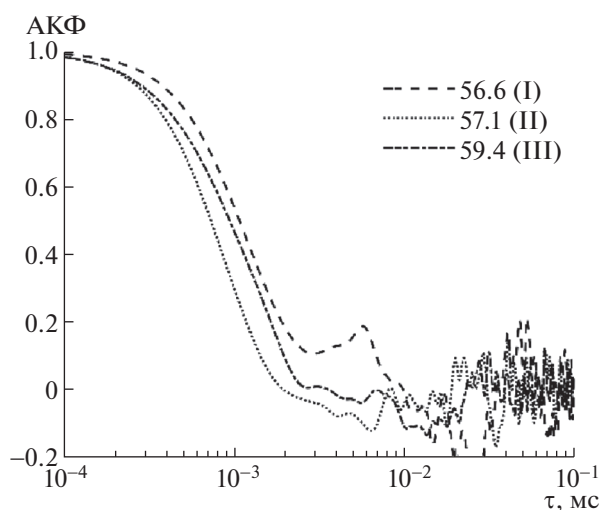


Рис. 11. Автокорреляционная функция коротковолновых ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуаций плотности в центре плазменного шнура в разряде 21375, полученная по рассеянию О-волны вверх, во время трех характерных стадий эволюции потерь энергии: стадия I – штриховая линия; стадия II – пунктирная линия; стадия III – штрихпунктирная линия.

ряда 21375 показал слабое изменение в течение импульса ЭЦ-нагрева полуширины АКФ флуктуаций плотности по измерениям в центре плазмы и по интегральным измерениям (рис. 11). Зато существенно (в ~ 2 раза) уменьшается полуширина АКФ приращений флуктуаций плотности плазмы к концу импульса ЭЦ-нагрева (рис. 12). Немного другой результат получен при корреляционном анализе краевых флуктуаций плотности (рис. 13) и их приращений (рис. 14). Полуширина АКФ самих флуктуаций уменьшается значительно в течение импульса нагрева, имея самое малое значение сразу после начала быстрых потерь (стадия II), а полуширина АКФ приращений тоже уменьшается, но довольно слабо. Хотя в сигналах доплеровской рефлектометрии уменьшение полуширины АКФ может быть вызвано появлением доплеровского сдвига, но в целом, благодаря изменению АКФ приращений флуктуаций, выявленному по всем диагностикам, можно говорить об отличии характера турбулентности на разных стадиях многоимпульсного ЭЦ-нагрева. Однако общим свойством всех полученных АКФ является существование хвостов на уровне 10–20%, возможно, указывающее на существование процессов с памятью. Данное обстоятельство, коррелирует с тем фактом, что выбросы М4 приращений флуктуаций были обнаружены на всех стадиях ЭЦ-нагрева.

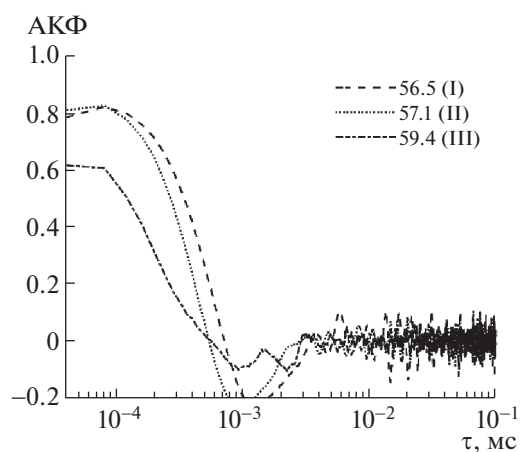


Рис. 12. Автокорреляционная функция приращений коротковолновых ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуаций плотности в центре плазменного шнура в разряде 21375, полученная по рассеянию О-волны вверх, во время трех характерных стадий эволюции потерь энергии: стадия I – штриховая линия; стадия II – пунктирная линия; стадия III – штрихпунктирная линия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При импульсном ЭЦ-нагреве бестоковой плазмы на стеллараторе Л-2М отмечаются три стадии потерь энергии: низкий уровень мощности потерь за передним фронтом импульса ЭЦ-нагрева, стадия быстрого роста мощности потерь

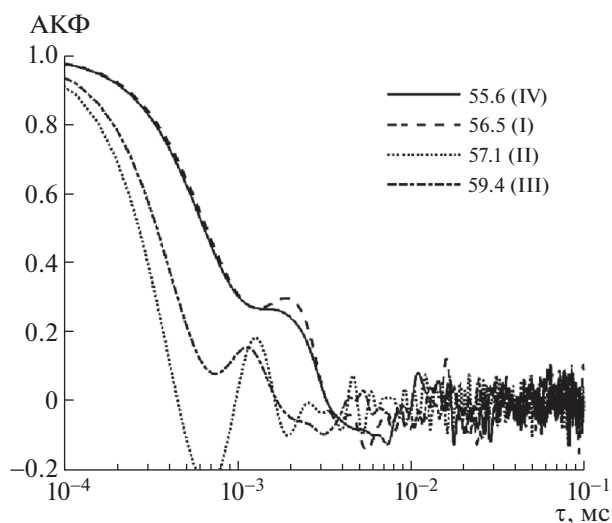


Рис. 13. Автокорреляционная функция коротковолновых ($k = 20 \text{ см}^{-1}$) флуктуаций плотности на краю плазменного шнура в разряде 21375, полученная с помощью доплеровской рефлектометрии, во время всех четырех характерных стадий эволюции потерь энергии: стадия I – штриховая линия; стадия II – пунктирная линия; стадия III – штрихпунктирная линия; IV – сплошная линия.

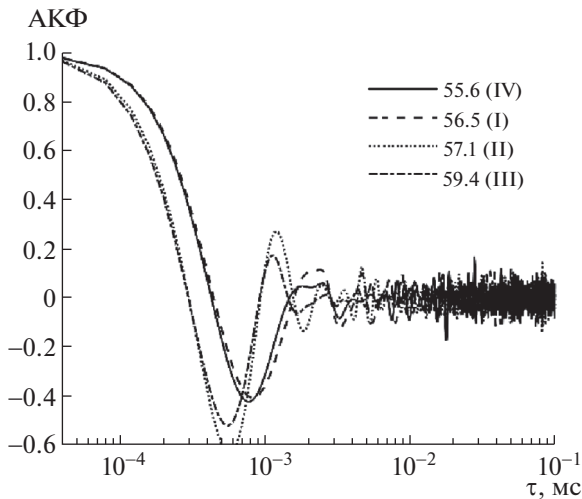


Рис. 14. Автокорреляционная функция приращений длинноволновых ($k = 2 \text{ см}^{-1}$) флуктуаций плотности на краю плазменного шнура в разряде 21375, полученная с помощью доплеровской рефлектометрии, во время всех четырех характерных стадий эволюции потерь энергии: стадия I – штриховая линия; стадия II – пунктирная линия; стадия III – штрихпунктирная линия; IV – сплошная линия.

и стадия квазистационарных потерь. Эти три стадии сопровождаются понижением плотности плазмы в центре и ростом плотности на периферии шнура. Показано, что трем стадиям потерь мощности соответствуют три группы пиков (всплесков) турбулентных флуктуаций плотности в центральных областях плазмы. Из них, как правило, более интенсивной является вторая группа, соответствующая стадии быстрого роста мощности потерь и наибольшей скорости падения плотности в центре плазмы. Установлено, что каждой группе всплесков флуктуаций предшествует всплеск коэффициента эксцесса (M4-3) приращений флуктуаций, т.е. всплеск вероятности в функции распределения скорости роста больших амплитуд флуктуаций по сравнению с распределением Гаусса. Высказано предположение, что инициация турбулентного процесса вызвана возникновением высокочастотных возмущений в пристеночной области плазменного шнура вследствие развития на стенках вакуумной камеры униполярных дуг, которое требует дальнейшего изучения. Проведенный корреляционный анализ показал уменьшение полуширины АКФ приращений флуктуаций плотности в течение импульса ЭЦ-нагрева, более ярко выраженное для центральных областей и хордовых измерений, чем для краевых.

Авторы выражают благодарность научному коллективу стелларатора Л-2М (в лице Д.Г. Василькова, И.Ю. Вафина, Е.В. Вороновой, С.Е. Гребенщикова, И.А. Гришиной, А.А. Летунова, В.П. Лог-

виненко, А.И. Мещерякова, Ю.В. Хольнова) за предоставленные результаты измерений основных макропараметров плазмы и содержательные беседы о специфике многоимпульсного ЭЦ-нагрева.

Работа выполнена за счет средств проекта РФФИ № 18-02-00621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haehn T.S., Diamond P.H.* // J. Korean Phys. Soc. V. 73. № 6. P. 747.
<https://doi.org/10.3938/jkps.73.747>
2. *Anderson J., Imadera K., Kishimoto Y., Li J.Q., Nordman H.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 066013.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6866>
3. *Garland S., Reuther K., Ramisch M., Manz P.* // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. 112307.
<https://doi.org/10.1063/1.4991609>
4. *Batanov G.M., Berezhetkii M.S., Borzosekov V.D., Grebenshchikov S.E., Grishina I.A., Ivanov V.A., Kharchev N.K., Kharchevsky A.A., Kholnov Yu.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Malakhov D.V., Meshcheryakov A.I., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Vasilkov D.G., Vafin I.Yu.* // 44th EPS Conf. on Plasma Phys., Belfast, Northern Ireland, 2017. P. 2.154.
<http://ocs.ciemat.es/EPS2017PAP/pdf/P2.154.pdf>
5. *Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Гребенщиков С.Е., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Летунов А.А., Петров А.Е., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Харчевский А.А.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 685. [G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, D.G. Vasilkov, S.E. Grebenshchikov, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, A.A. Letunov, A.E. Petrov, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, and A.A. Kharchevskii // Plasma Phys. Rep. 2019. V. 45 (8). P. 732].
<https://doi.org/10.1134/S1063780X19080014>
6. *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. [G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, L.M. Kovrizhnykh, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, D.V. Malakhov, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin, and N.K. Kharchev // Plasma Phys. Rep. V. 39 (6). P. 444. DOI: 10.1134/S1063780X13060019]
<https://doi.org/10.7868/S0367292113060012>
7. *Skvortsova N.N., Akulina D.K., Batanov G.M., Kharchev N.K., Kolik L.V., Kovrizhnykh L.V., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Malakhov D.V., Petrov A.E., Pshenichnikov A.A., Sarksyian K.A., Voronov G.S.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V. 52. 055008 (11pp).
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/5/055008>
8. *Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Вафин И.Ю., Летунов А.А., Малахов Д.В., Мещеряков А.И., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К., Хвезюк В.И., Чирков А.Ю.* // XLI Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС, 2014. Тезисы докладов. С. 111.
9. *Skvortsova N.N., Chirkov A.Yu., Kharchevsky A.A., Malakhov D.V., Gorshenin A.K., Korolev V.Yu.* //

- J. Phys. Conf. Series. 2016. V. 666. 012007.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/666/1/012007>
10. Rhodes T.L., Peebles W.A., Van Zeeland M.A., deGrassie J.S., Bravenec R.V., Burrell K.H., DeBoo J.C., Lohr J., Petty C.C., Nguyen X.V., Doyle E.J., Greenfield C.M., Zeng L., Wang G. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. 056117 (10 pp).
<https://doi.org/10.1063/1.2714019>
 11. Rhodes T.L., Peebles W.A., DeBoo J.C., Prater R., Kinsey J.E., Staebler G.M., Candy J., Austin M.E., Bravenec R.V., Burrell K.H., deGrassie J.S., Doyle E.J., Gohil P., Greenfield C.M., Groebner R.J., Lohr J., Makowski M.A., Nguyen X.V., Petty C.C., Solomon W.M., St John H.E., Van Zeeland M.A., Wang G., Zeng L. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2007. V. 49. P. B183.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/49/12B/S17>
 12. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Сарксян К.А., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. С. 245. [G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, D.G. Vasil'kov, E.M. Konchekov, D.V. Malakhov, K.A. Sarksyian, N.K. Kharchev, Yu.V. Khol'nov // JETP Lett. 2015. V. 102. P. 217.
<https://doi.org/10.1134/S0021364015160043>
 13. Будаев В.П., Савин С.П., Зелёный Л.М. // УФН. 2011. Т. 181. С. 905.
 14. Korolev V.Yu., Skvortsova N.N. Modern probability and statistics. Stochastic models of structural plasma turbulence. VSP, Leiden, Boston, 2006. ISBN 9067644498, 9789067644495
 15. Королев В.Ю. Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. М.: Изд. Московского университета, 2011. ISBN: 978-5-211-05863-7
 16. Горшенин А.К., Королев В.Ю., Турсунбаев А.М. // Информатика и ее применения URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12855466>.
 17. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Gorshenin A.K., Kharchev N.K., Korolev V.Yu., Sarksyian K.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. V. 61. 075006 (7pp).
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab1117>
 18. Колмогоров А.Н. // Доклады АН СССР. 1941. Т. 30. № 4. С. 299.
 19. Kraichnan R.H. // Phys. Fluids. 1967. V. 10. P. 1417.
<https://doi.org/10.1063/1.1762301>
 20. Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Вафин И.Ю., Гребенчиков С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Мецераков А.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Харчевский А.А., Хольнов Ю.В., Щепетов С.В. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 666. [G.M. Batanov, M.S. Berezhetskii, V.D. Borzosekov, D.G. Vasil'kov, I.Y. Vafin, S.E. Grebenshchikov, I.A. Grishina, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, N.F. Larionova, A.A. Letunov, V.P. Logvinenko, D.V. Malakhov, A.I. Meshcheryakov, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, A.A. Kharchevskii, Y.V. Kholnov, S.V. Shchepetov // Plasma Phys. Rep. 2017. V. 43. P. 818.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X17080049>
 21. Суворов Е.В., Фрайман А.А. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 1161. [E.V. Suvorov, A.A. Fraiman // Sov. J. Plasma Phys. 1980. V. 6 (5). P. 639].
 22. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Малахов Д.В., Степахин В.Д. // XLIV Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2017. Сб. тезисов докладов. С. 119. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Mu/gu/CM-Batanov.docx> [G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, D.V. Malakhov, and V.D. Stepakhin // XLIV Zvenigorod Int. Conf. Plasma Phys. Control. Fusion, Zvenigorod, Russia, 2017. M-14.]
 23. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Малахов Д.В., Петров А.Е., Пшеничников А.А., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К. // ВАИТ. Серия: термоядерный синтез. 2011. Вып. 2. С. 70.
 24. Пшеничников А.А., Колик Л.В., Малых Н.И., Петров А.Е., Терещенко М.А., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 604. [A.A. Pshenichnikov, L.V. Kolik, N.I. Malykh, A.E. Petrov, M.A. Tereshchenko, N.K. Kharchev, Yu.V. Khol'nov // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31 (7). P. 554.
<https://doi.org/10.1134/1.1992582>
 25. Батанов Г.М., Борзенков В.Д., Конченков Е.М., Малахов Д.В., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Инженерная физика. 2013. № 10. С. 56.
 26. Itoh K., Itoh S.I., Fukuyama A. // J. Phys. Soc. Japan. 1989. V. 58 (2). P. 482.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.58.482>
 27. Stroth U., Geist T., Koponen J.P.T., Hartfuß H.-J., Zeiler P. and ECRH and W7-AS team // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82 (5). P. 928.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.928>
 28. Erckmann V., Gasparino U. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36 (12). P. 1869.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/12/001>
 29. Andreev V.F., Borshegovskij A.A., Chistyakov V.V., Dnestrovskij Yu.N., Gorbunov E.P., Kasyanova N.V., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Myalton T.B., Roy I.N., Sergeev D.S., Zenin V.N. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58 (5). 055008 (12 pp).
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/5/055008>
 30. Князев А.В., Летунов А.А., Логвиненко В.П. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 105. [A.V. Knyazev, A.A. Letunov, V.P. Logvinenko // Instrum. Experim. Techniques. 2004. № 2. P. 230.
<https://doi.org/10.1023/B:INET.0000025207.63359.48>
 31. Сахаров А.С. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 291. [A.S. Sakharov // Plasma Phys. Rep. 2019. V. 45(4). P. 289. DOI: 10.1134/S1063780X19030085]
 32. Duncan C. Fundamental Statistics for Social Research. Routledge, London and New York, 1998. P.81. ISBN 0-415-17203-9, ISBN 0-415-17204-7
 33. Kharchev N.K., Batanov G.M., Belousov V.I., Borzosekov V.D., Kalynova G.I., Kolik L.V., Konchekov E.M., Malakhov D.V., Petrov A.B., Sarksyian K.A., Stepakhin V.D., Terschenko M.A. // Proc. 10th Int. Workshop "Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications", Nizhny Novgorod—Moscow, 2017. P. 173.