

УДК 533.9.07; 533.9.08

ДИНАМИКА УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ И СПЕКТРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ЭЦР НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М ПРИ МОЩНОСТЯХ НАГРЕВА ДО 1 МВт

А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина

На стеллараторе Л-2М в экспериментах по центральному ЭЦР нагреву с мощностью до 1 МВт исследована форма спектров мягкого рентгеновского излучения и динамика удержания энергии. Показано, что с увеличением мощности нагрева спектры остаются двухтемпературными. При этом возрастает средняя энергия электронов в надтепловой части спектра, достигая при мощности ЭЦР нагрева 950 кВт 25% от средней энергии по всему спектру. Показано, что на стеллараторе Л-2М при мощностях нагрева больше 700 кВт происходит постепенное ухудшение удержания энергии плазмы, связанное с возрастанием мощности радиационных потерь плазмы, вызванным накоплением примесей.

Ключевые слова: стеллараторы, магнитное удержание плазмы, спектры мягкого рентгеновского излучения, ЭЦР нагрев, энергетическое время жизни.

Введение. Время удержания плазмы в тороидальной магнитной ловушке зависит от функции распределения электронов по энергиям. Оно уменьшается, если функция распределения электронов по энергиям является немаксвелловской; наличие надтепловых электронов приводит к ухудшению удержания плазмы. Отличие функции распределения электронов по энергии от максвелловской функции может быть обнаружено по виду спектров мягкого рентгеновского излучения плазмы. В этой связи измерение спектров мягкого рентгеновского излучения (SXR), по которым можно восстановить функцию распределения электронов по энергии, является важной задачей.

Экспериментально было обнаружено, что при мощном электронном циклотронном резонансом (ЭЦР) нагреве плазмы в тороидальных магнитных ловушках формируются “двухтемпературные” спектры мягкого рентгеновского излучения. В спектрах наблюдается тепловая часть и надтепловой “хвост”, который может быть условно охарактеризован некоторой второй температурой. На стеллараторе Л-2М двухтемпературные спектры регистрируются в широком диапазоне мощностей нагрева [1]. Механизм формирования двухтемпературных спектров до сих пор до конца не выяснен. В работе [2] было экспериментально показано, что источником надтепловых электронов является область поглощения ЭЦР излучения.

Особенностью экспериментов по ЭЦР нагреву на стеллараторе Л-2М является возможность создавать высокие удельные мощности нагрева. Ранее на стеллараторе Л-2М уже проводились эксперименты с удельной вкладываемой мощностью до 3 МВт/м³ [3]. При этом не наблюдалось ухудшения удержания плазмы по сравнению со скейлингом для стелларатора Л-2М [4]. Поэтому возникает вопрос: существует ли предел по вкладываемой мощности, и при каких мощностях нагрева удержание плазмы уже не будет соответствовать скейлингу.

В данной статье описываются эксперименты по ЭЦР нагреву плазмы в стеллараторе Л-2М при мощностях нагрева до 1 МВт (удельная мощность нагрева до 4 МВт/м³), в которых исследовались изменение формы спектров мягкого рентгеновского излучения плазмы (SXR спектров) из области ЭЦР нагрева и динамика удержания энергии плазмы при росте вкладываемой мощности.

Экспериментальная установка. Эксперименты проводились на установке Л-2М – классическом двухзаходном стеллараторе (заходность $l = 2$, а число оборотов винтовой обмотки на длине тора $N = 7$) с большим радиусом тора 1 м, радиусом плазмы 0.115 м и тороидальным магнитным полем 1.34 Тл. Для создания и нагрева плазмы использовались два гиротрона суммарной мощностью до 1 МВт. В данной серии экспериментов область ЭЦР нагрева находилась в центре плазмы. SXR спектры регистрировались с помощью сканирующего спектрометра.

Спектры мягкого рентгеновского излучения в экспериментах с большой мощностью ЭЦР нагрева. В данной серии экспериментов SXR спектры измерялись по центральной хорде плазменного шнура. При этом в поле зрения прибора попадает область нагрева.

На рис. 1 приведены спектры мягкого рентгеновского излучения, измеренные при трех мощностях ЭЦР нагрева плазмы. Спектры 1, 2 и 3 соответствуют суммарным

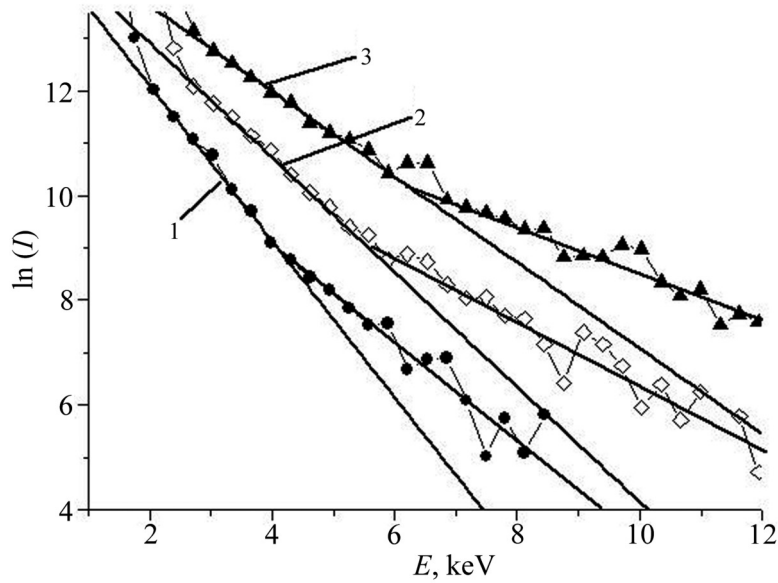


Рис. 1: Спектры мягкого рентгеновского излучения, измеренные при трех мощностях ЭЦР нагрева. 1 – 200 кВт, 2 – 500 кВт, 3 – 900 кВт.

мощностям нагрева 200, 500 и 950 кВт, соответственно. Сплошными линиями показаны соответствующие максвелловские спектры, аппроксимирующие тепловые и надтепловые участки спектров. Из рис. 1 видно, что с ростом вкладываемой мощности до 1 МВт двухтемпературная форма спектров сохраняется. В табл. 1 приведены параметры, характеризующие условия эксперимента, и параметры измеренных SXR спектров: P_{ECRH} – мощность ЭЦР нагрева, n_e – средняя по центральной хорде плотность плазмы, T_e^{bulk} и T_e^{tail} – электронные температуры, соответствующие тепловой и надтепловой частям спектра, W_{cross} – энергия, соответствующая точке пересечения прямых, аппроксимирующих тепловую и надтепловую части спектра, N_e^{tail}/N_e – доля электронов с энергиями, соответствующими надтепловой части спектра, и $\langle W_e^{\text{tail}} \rangle / \langle W_e \rangle$ – отношение средней энергии электронов надтепловой части спектра к полной средней энергии электронной компоненты плазмы. Из табл. 1 видно, что с ростом мощности нагрева температуры тепловой и надтепловой частей спектра возрастают. Отношение надтепловой “температуры” к тепловой немного возрастает. При этом форма SXR спектров меняется таким образом, что происходит смещение в сторону больших энергий точки W_{cross} . Видно, что с увеличением мощности нагрева возрастает доля электронов с энергиями, приходящими на надтепловую часть спектра. Соответственно увеличивается средняя энергия электронов в надтепловой части спектра. При мощности ЭЦР нагрева 950 кВт, сред-

няя энергия надтепловых электронов достигает 25% от средней энергии электронов по всему спектру.

Т а б л и ц а 1

Параметры, характеризующие условия эксперимента,
и параметры измеренных SXR спектров

P_{ECRH} , кВт	n_e , 10^{19} м^{-3}	T_e^{bulk} , эВ	T_e^{tail} , эВ	$T_e^{\text{tail}}/T_e^{\text{bulk}}$	W_{cross} кэВ	N_e^{tail}/N_e	$\langle W_e^{\text{tail}} \rangle / \langle W_e \rangle$
200	1.9	680	1080	1.6	4.2	0.048	0.14
500	1.7	920	1650	1.8	5.5	0.077	0.20
950	1.9	1220	2150	1.8	6.4	0.114	0.25

Динамика энергетического времени жизни плазмы при росте мощности ЭЦР нагрева. Для стелларатора Л-2М существует скейлинг [5], построенный на основе собственной базы данных, который представляет собой экспериментальную функциональную зависимость, которая связывает между собой энергетическое время жизни τ_E (отношение запасенной в плазме энергии к мощности нагрева) и основные параметры установки, такие как мощность нагрева P_{ECRH} , электронную плотность n_e , и параметры магнитной конфигурации установки. Этот скейлинг выглядит следующим образом:

$$\tau_E^{\text{L-2M}} \sim \text{const} \times P_{\text{ECRH}}^{-0.7} \times n_e^{0.7}.$$

Если при изменении параметров эксперимента экспериментально измеренное время жизни τ_E^{exp} соответствует скейлингу этой установки, значит, в этих экспериментах не наблюдается ухудшения удержания плазмы. В работе [3] было показано, что при увеличении мощности ЭЦР нагрева вплоть до 700 кВт, на стеллараторе Л-2М не наблюдалось заметного ухудшения удержания плазмы. Приведенные ниже результаты получены в экспериментах при дальнейшем увеличении мощности ЭЦР нагрева.

На рис. 2 показана зависимость отношения экспериментально измеренного энергетического времени жизни τ_E^{exp} к энергетическому времени жизни $\tau_E^{\text{L-2M}}$, оцененному из скейлинга для стелларатора Л-2М, от мощности ЭЦР нагрева. На рис. 2 горизонтальная прямая соответствует совпадению экспериментального времени удержания энергии со скейлингом Л-2М. Видно, что при мощностях нагрева больше 700 кВт происходит постепенное ухудшение удержания энергии плазмы. Кривая линия, аппроксимирующая экспериментальные точки, все больше отклоняется от прямой линии, соответствующей скейлингу Л-2М.

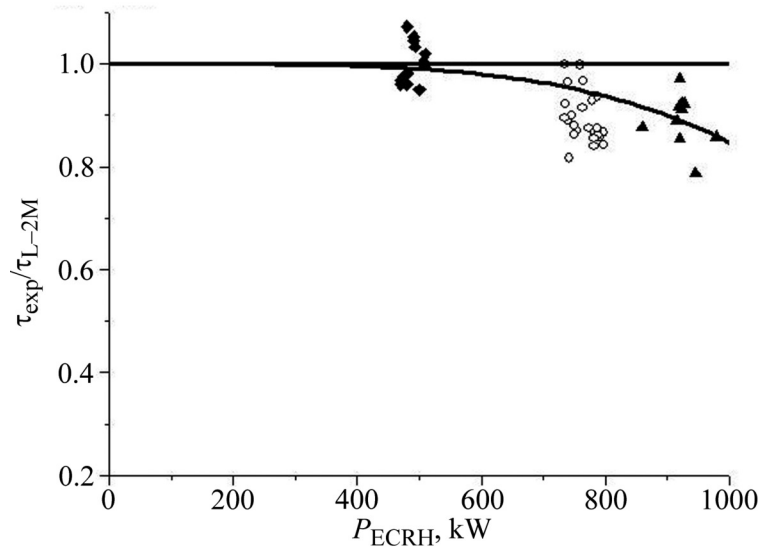


Рис. 2: Зависимость отношения экспериментально измеренного энергетического времени жизни τ_E^{exp} к энергетическому времени жизни $\tau_E^{\text{L-2M}}$, оцененному из скейлинга для стелларатора Л-2М, от мощности ЭЦР нагрева.

Рассмотрим возможные причины наблюдаемого ухудшения удержания энергии в плазме стелларатора Л-2М. Дело в том, что во всех импульсах стелларатора Л-2М при

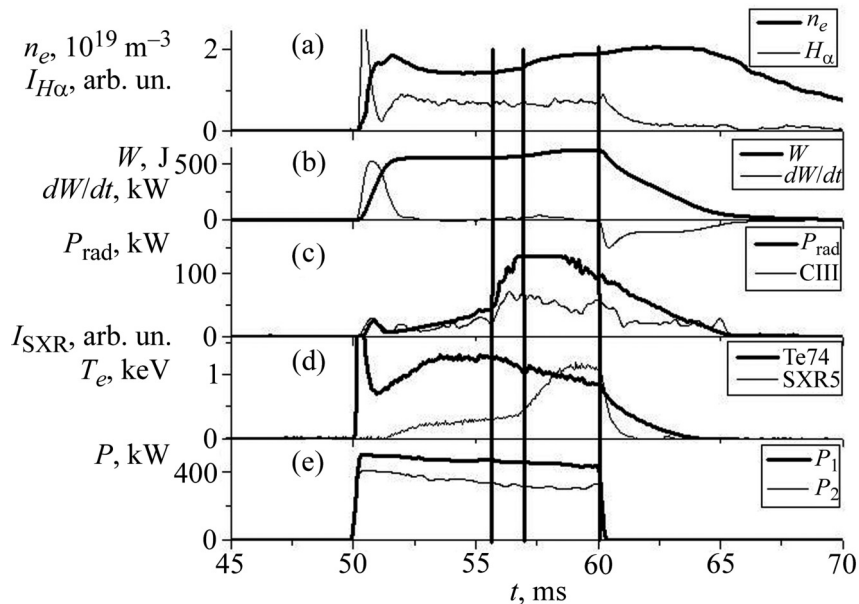


Рис. 3: Временная эволюция параметров плазмы в импульсе #19225 с транспортным переходом. Пояснения в тексте.

мощности ЭЦР нагрева, превышающей 700 кВт, наблюдаются транспортные переходы. С ростом мощности нагрева на всех тороидальных магнитных ловушках наблюдаются спонтанные транспортные переходы. Это явление достаточно хорошо изучено. Оно сопровождается возникновением транспортного барьера для частиц и энергии и, соответственно, улучшением удержания плазмы в установке. Временная эволюция параметров плазмы в импульсе стелларатора Л-2М с транспортным переходом показана на рис. 3. На рис. 3 сверху вниз показаны осциллограммы следующих параметров плазмы: средняя по центральной хорде плотность плазмы, интенсивность свечения линии H_α , энергосодержание плазмы, производная энергосодержания плазмы, мощность радиационных потерь, интенсивность свечения линии СII, электронная температура, измеренная по циклотронному излучению из центральной области плазмы, интенсивность мягкого рентгеновского излучения по центральной хорде и мощности двух гиротронов. Две левые вертикальные линии отмечают начало и конец транспортного перехода, длительность которого составляет ~ 2 мс. Правая вертикальная линия соответствует окончанию импульса ЭЦР нагрева. Транспортный переход на Л-2М сопровождается небольшим увеличением плотности плазмы при приблизительно постоянной интенсивности свечения линии H_α (рис. 3(a)). Это означает улучшение удержания рабочего газа водорода в плазме. Кроме того, происходит увеличение в несколько раз интенсивности свечения линий примесей (напр., линия СII на рис. 3(c)), что указывает на улучшение удержания также и примесей. За время перехода также в несколько раз увеличивается суммарное излучение из плазмы, измеряемое болометром. Это излучение возрастает столь сильно, что происходит насыщение сигнала болометра (сигнал P_{rad} на рис. 3(c)). Значительно возрастает интенсивность излучения плазмы в SXR диапазоне (сигнал I_{SXR} на рис. 3(d)) при слегка падающей электронной температуре. Это свидетельствует об увеличении концентрации примесей в центральной области плазмы. Также немного (на $\sim 15\%$) возрастает энергосодержание плазмы (сигнал W на рис. 3(b)). Таким образом, на стеллараторе Л-2М в импульсах с очень высокой удельной мощностью нагрева происходит образование транспортного барьера и, как следствие, накопление примесей в центральной области плазмы. При этом радиационные потери из центральной области плазмы сильно возрастают, и вследствие этого энергосодержание падает. В условиях транспортного перехода время удержания энергии должно было бы возрасти, но, как видно из рис. 2, оно уменьшается на 10–15% по сравнению со скейлингом стелларатора Л-2М. При мощностях ЭЦР нагрева меньше 700 кВт транспортные переходы происходят редко. В отсутствие транспортных переходов экспериментальное время жизни

энергии совпадает со временем жизни энергии, определяемым по скейлингу стелларатора Л-2М (см. точки, соответствующие мощности нагрева 500 кВт, на рис. 2).

Подтверждением того, что ухудшение удержания плазмы в стеллараторе Л-2М наступает в результате сильного возрастания излучения из плазмы, является рис. 4. На нем показана зависимость отношения экспериментально измеренного энергетического времени жизни τ_E^{exp} к энергетическому времени жизни $\tau_E^{\text{L-2M}}$, оцененному из скейлинга стелларатора Л-2М, от плотности плазмы (кривая 2 аппроксимирует экспериментальные точки). На графике приведены экспериментальные данные, которые соответствуют мощности нагрева приблизительно 1 МВт. Видно, что ухудшение удержания энергии по сравнению со скейлингом стелларатора Л-2М связано не только с ростом мощности нагрева (рис. 2), но и с ростом плотности плазмы. Этот результат не вполне понятен. Однако его можно объяснить, если вспомнить, что в плазме стелларатора Л-2М при больших мощностях нагрева происходят транспортные переходы, которые сопровождаются как ростом плотности плазмы, так и увеличением накопления примесей и ростом радиационных потерь. Покажем, что ухудшение удержания плазмы связано именно с накоплением примесей и ростом радиационных потерь. Оценить рост радиационных потерь можно по диамагнитному сигналу dW/dt (рис. 4 кривая 3, полые треугольники). Значение dW/dt бралось в момент времени в интервале с 61 по 62 мс (см. рис. 3(b)).

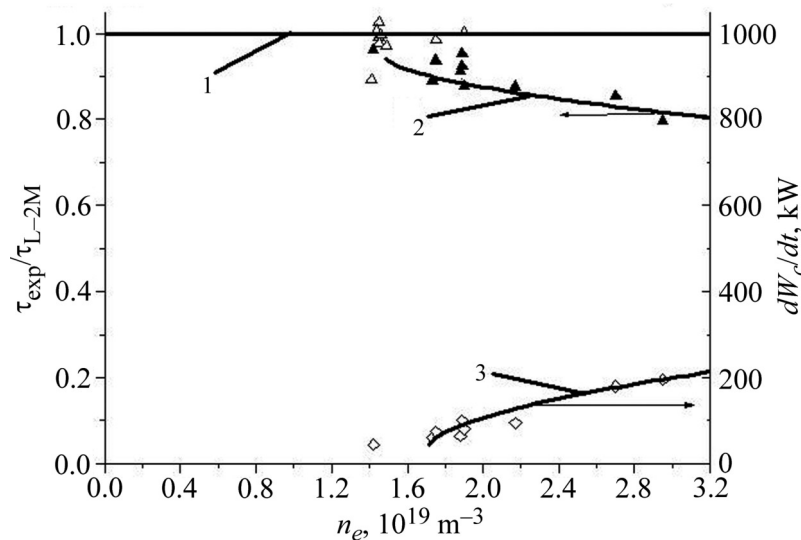


Рис. 4: (1) линия равенства энергетических времен жизни τ_E^{exp} и $\tau_E^{\text{L-2M}}$; (2) зависимость отношения $\tau_E^{\text{exp}}/\tau_E^{\text{L-2M}}$ от плотности плазмы; (3) зависимость dW/dt от плотности плазмы после выключения ЭЦР нагрева.

После выключения ЭЦР нагрева диамагнитный сигнал представляет собой мощность полных потерь энергии плазмы. В работе [6] было показано, что на стеллараторе Л-2М после выключения ЭЦР нагрева определяющими становятся потери за счет излучения. Таким образом, приведенная на рис. 4 зависимость $dW/dt(n)$, измеренная по величине диамагнитного сигнала в интервале с 61 по 62 мс, представляет собой зависимость именно радиационных потерь плазмы от плотности. Поэтому можно сделать вывод, что с ростом плотности плазмы происходит значительное увеличение радиационных потерь на квазистационарной стадии разряда. Таким образом, видно, что ухудшение удержания плазмы при больших мощностях нагрева связано с возрастанием мощности радиационных потерь. А возрастание мощности радиационных потерь, в свою очередь, вызвано накоплением примесей в результате образования транспортного барьера при транспортных переходах, которые при больших мощностях нагрева происходят в стеллараторе Л-2М практически в каждом импульсе. Для сравнения на рис. 4 показано отношение $\tau_E^{\text{exp}}/\tau_E^{\text{L-2M}}$ (полые ромбы), измеренное в тех же импульсах, по данным которых была построена кривая 2 на рис. 4, но до начала транспортного перехода. Эти точки показывают, что до начала транспортного перехода ухудшения удержания энергии не происходит.

Заключение. На стеллараторе Л-2М проведены эксперименты по ЭЦР нагреву плазмы при мощностях нагрева до 1 МВт (удельная мощность нагрева до 4 МВт/м³). Измерены спектры мягкого рентгеновского излучения по центральной хорде, проходящей через область поглощения ЭЦР излучения (область нагрева). Показано, что с ростом мощности нагрева тепловая и надтепловая температуры, определенные по этим спектрам, возрастают. Отношение надтепловой “температуры” к тепловой немного возрастает. С увеличением мощности нагрева возрастает доля электронов с энергиями, приходящими на надтепловую часть спектра. Соответственно увеличивается средняя энергия электронов в надтепловой части спектра, достигая при мощности ЭЦР нагрева 950 кВт 25% от средней энергии по всему спектру.

Исследована динамика энергетического времени жизни плазмы при росте мощности ЭЦР нагрева. Показано, что на стеллараторе Л-2М при мощностях нагрева больше 700 кВт происходит постепенное ухудшение удержания энергии плазмы в импульсах с транспортными переходами, число которых значительно возрастает. Анализ экспериментальных зависимостей времени удержания энергии плазмы от мощности нагрева и плотности показал, что ухудшение удержания плазмы при больших мощностях ЭЦР нагрева связано с возрастанием мощности радиационных потерь плазмы, вызванных

накоплением примесей в результате образования транспортного барьера при транспортных переходах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-18-00609).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина и др., *Физика плазмы* **43**, 497 (2017).
- [2] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**, 11 (2019).
- [3] А. И. Мещеряков, И. А. Гришина, *Прикладная физика* № 6, 10 (2018).
- [4] A. I. Meshcheryakov, G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **907**, 012016 (2017); doi:10.1088/1742-6596/907/1/012016.
- [5] О. И. Федянин, Д. К. Акулина, Г. М. Батанов и др., *Физика плазмы* **33**, 880 (2007).
- [6] A. I. Meshcheryakov, I. A. Grishina and V. I. Koryaka, *Journal of Physics: Conference Series* **1094**, 012009 (2018); doi:10.1088/1742-6596/1094/1/012009.

Поступила в редакцию 27 сентября 2019 г.

После доработки 20 декабря 2019 г.

Принята к публикации 23 декабря 2019 г.