ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2021, № 5, с. 73–77

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.043

К ВОПРОСУ О СУЩЕСТВОВАНИИ “РЕНТГЕНОВСКОЙ ЯМЫ” В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2021 г. А. И. Мещеряков[a],*, И. А. Гришина[a],, И. Ю. Вафин[a]**

[a] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38
**e-mail: meshch@fpl.gpi.ru*
***e-mail: grishina@fpl.gpi.ru*

Поступила в редакцию 26.03.2021 г.
После доработки 13.04.2021 г.
Принята к публикации 19.04.2021 г.

Предпринята попытка обнаружить путем прямых спектральных измерений явление “рентгеновской ямы” в различных режимах нагрева плазмы в стелларатore Л-2М. Явлением “рентгеновской ямы” называют аномально сильное поглощение мягкого рентгеновского излучения плазмы при его прохождении через бериллиевые фольги толщиной 90 мкм и более, которое наблюдалось на токамаке Т-11М и ряде других токамаков. В эксперименте использованы сканирующий спектрометр и многохордовая диагностика мягкого рентгеновского излучения. Показано, что при параметрах плазмы, близких к параметрам плазмы на токамаке Т-11М, на стелларатore Л-2М не удалось зарегистрировать явление “рентгеновской ямы” ни в режиме омического нагрева, ни в режиме электронного циклотронного резонансного нагрева плазмы.

DOI: 10.31857/S0032816221050104

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] описано явление возникновения “рентгеновской ямы” на токамаке Т-11М. Термином “рентгеновская яма” автор обозначил аномально сильное поглощение интенсивности мягкого рентгеновского излучения (м.р.и.) плазменного шнура при его прохождении через бериллиевые фольги толщиной 90 мкм и более. Это явление возникает в условиях сравнительно низкой электронной температуры плазмы (~200–400 эВ) и низкой электронной плотности ($n_e \sim 10^{19}$ м$^{-3}$). При этом автор ссылается на эксперименты на более старых токамаках Т-3М и Т-4, где подобные явления тоже наблюдались. В работе [1] приведена зависимость от плотности интенсивности м.р.и., прошедшего через бериллиевые фольги с толщинами 30 и 90 мкм. Согласно этой зависимости, при плотностях плазмы $n_e < 1.4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ поглощение в более толстой фольге становится непропорционально большим по сравнению с тонкой фольгой.

Автором для объяснения этого явления сделано предположение об “обеднении” максвелловского распределения электронов по энергии за счет электронов с энергией, превышающей тепловую в несколько раз. В качестве вероятной причины такого “обеднения” предложен аномальный перенос электронного тепла вдоль слабо возмущенного тороидального магнитного поля (модель “магнитного флаттера” [2]). Перенос энергии электронов вдоль силовых линий магнитного поля как вероятная причина возникновения аномальной теплопроводности плазмы в токамаках при наличии флуктуаций магнитного поля также активно обсуждался в работах [3, 4].

Подобный процесс обеднения функции распределения электронов в определенной области энергий неизбежно должен отразиться на виде спектра м.р.и. – в спектре должен появиться провал. Однако в статье [1] не приведено спектров, которые могли бы наглядно продемонстрировать обнаруженное явление возникновения “рентгеновской ямы” на токамаке Т-11М.

Стелларатор Л-2М является установкой, которая в режиме омического нагрева по таким параметрам плазмы, как электронная температура и плотность, достаточно близка к токамаку Т-11М [5]. Кроме того, на стелларатore Л-2М имеется комплекс диагностик м.р.и., состоящий из двух спектрометров м.р.и. и многохордовой диагностики м.р.и. В связи с этим авторами данной статьи была предпринята попытка обнаружить явление “рентгеновской ямы” путем непосредствен-

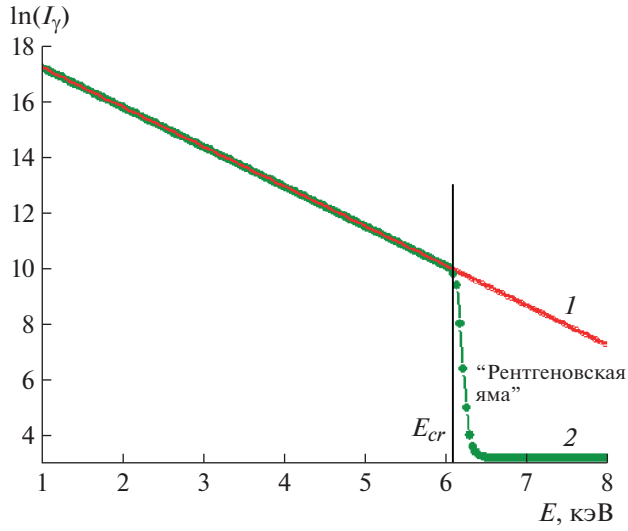

Рис. 1. Форма спектра м.р.и., использованная при моделировании "рентгеновской ямы". *1* – максвелловский спектр, *2* – спектр, использованный при моделировании.

ного измерения спектров и интенсивности м.р.и. с помощью перечисленных выше диагностик.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на стеллараторе Л-2М в режимах омического [6] и электронного циклотронного резонансного (э.ц.р.) [7] нагрева плазмы. Л-2М – это классический двухзаходный стелларатор ($l = 2$, $N = 7$) с большим радиусом тора, $R = 1$ м, радиусом плазмы $a = 0.115$ м и тороидальным магнитным полем $B_0 = 1.34$ Тл. Угол вращательного преобразования, создаваемый магнитной системой, меняется от $\iota = 0.18$ на магнитной оси системы до $\iota = 0.78$ на границе плазмы. При измерениях спектров использовался сканирующий спектрометр м.р.и. [8] с разрешением 320 эВ и скоростью счета $1.5 \cdot 10^5$ импульсов/с. С его помощью можно регистрировать SXR-спектры в диапазоне энергий от 1 до 80 кэВ. В приборе использован кремниевый детектор, легированный литием Si(Li). Обработка сигналов осуществлялась с помощью процессора импульсных сигналов SBS-78 (производитель Green star). В спектрометре были использованы фильтры из бериллия. Помимо фильтра толщиной 100 мкм, экранирующего детектор, возможно использовать дополнительные входные бериллиевые фильтры с толщинами 100, 180, 530 и 670 мкм.

Интенсивность м.р.и. измеряли с помощью многохордовой диагностики м.р.и. [9]. Детектирование интенсивности м.р.и. плазмы осуществляли по семи хордам в поперечном сечении тороидальной камеры стелларатора. В диагностической системе использованы кремниевые поверхностно-барьерные диоды типа ORTEC. В состав системы входят: линейка детекторов, усилители и аналого-цифровой преобразователь. Детекторы и усилители размещены в едином корпусе и изолированы от вакуумной части стелларатора бериллиевой фольгой толщиной 30 мкм. Электронную температуру плазмы измеряли методом фильтров. На каждой хорде размещали по два детектора – открытый и закрытый дополнительной бериллиевой фольгой. Диагностическую систему откачивали автономно до давления $1 \cdot 10^{-2}$ Торр, с ее помощью непрерывно в течение импульса измеряли радиальные распределения интенсивности м.р.и. и температуры электронов в поперечном сечении плазмы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА "РЕНТГЕНОВСКОЙ ЯМЫ"

Наличие эффекта "рентгеновской ямы" предполагает, что в спектре м.р.и. имеется провал в области энергий, в несколько раз превышающих тепловую. Для того чтобы определить область энергий, где следует искать этот провал, было предпринято моделирование. При моделировании считалось, что спектр м.р.и. плазмы обрывается на некоторой критической энергии E_{cr} (рис. 1). При этом полагалось, что при энергиях $E < E_{cr}$ спектр излучения является максвелловским. Кроме того, при моделировании считалось, что энергия E_{cr} линейно меняется с увеличением плотности плазмы, а температура плазмы незначительно возрастает при уменьшении плотности, что обычно наблюдается в экспериментах в режиме омического нагрева на тороидальных магнитных ловушках. Моделирование было проведено для температуры плазмы $T_e = 300$ эВ при плотности $n_e = 4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$, что примерно соответствует условиям эксперимента на токамаке Т-11М в режиме омического нагрева [1].

Было выполнено моделирование прохождения излучения с "провальным" спектром через фольги толщинами 30 и 90 мкм, рассчитывалась интегральная интенсивность, приходящаяся на соответствующий детектор. Построены зависимости от плотности плазмы интегрального излучения, нормированного на квадрат электронной плотности (поскольку в первом приближении можно считать, что интенсивность м.р.и. плазмы пропорциональна квадрату электронной плотности), для двух детекторов с различными фольгами (рис. 2). Эти зависимости аналогичны экспериментальным зависимостям из статьи [1]. Согласно рис. 2, интенсивности излучения, прошедшего через две различные фольги, начинают заметно отличаться при плотностях меньше $1.5 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$, что соответствует значению критической энергии порядка

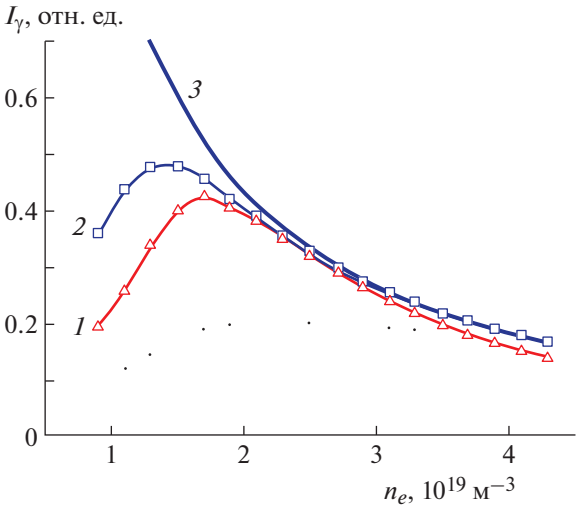

Рис. 2. Моделирование “рентгеновской ямы”. Зависимость интенсивности м.р.и., прошедшего через бериллиевые фольги толщинами 90 (*1*) и 30 мкм (*2*), от плотности. Кривая *3* – результаты моделирования интенсивности мягкого рентгеновского излучения, прошедшего через фольгу толщиной 30 мкм, при изменении электронной температуры плазмы от 300 эВ ($n_e = 4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$) до 400 эВ ($n_e = 1.4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$) .

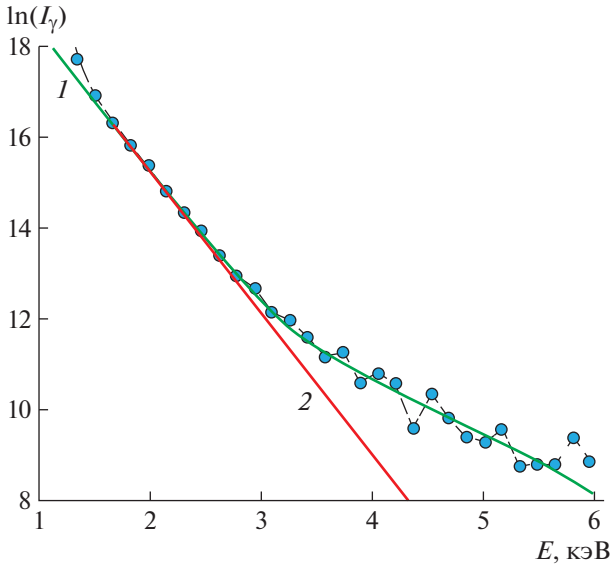

Рис. 3. Спектр м.р.и., измеренный на стеллараторе Л-2М в режиме омического нагрева при $T_e = 320$ эВ и $n_e = 1.1 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ (*1*). Прямая *2* соответствует максвелловскому спектру м.р.и.

2.5 кэВ. Таким образом, моделирование показывает, что для плотности ~$1.5 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и температуры плазмы ~330 эВ или чуть выше (это именно те значения параметров, при которых наблюдалось расхождение сигналов детекторов, закрытых фольгами 30 и 90 мкм в статье [1]) провал в спектре м.р.и. следует искать в области энергий вблизи 2.5 кэВ (~$7T_e$).

4. СПЕКТРЫ М.Р.И. В РЕЖИМЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

В режиме омического нагрева типичные параметры плазмы близки к соответствующим параметрам токамака Т11-М: T_e = 250–350 эВ, n_e = = (0.8–2.5) $\cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. До начала эксперимента была проведена процедура боронизации вакуумной камеры, которая позволила снизить содержание примесей в плазме и обеспечить низкие значения эффективного заряда плазмы, Z_{eff} ~ 1.5–2 [10]. Спектры м.р.и. измерялись по центральной хорде. На рис. 3 показан спектр м.р.и., измеренный при $T_e = 320$ эВ и $n_e = 1.1 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Параметры разряда были следующими: плазменный ток I_p = 20 кА, напряжение на обходе U_{loop} = 2.5 В, а мощность омического нагрева соответственно составляла $P_{он}$ = 50 кВт. Согласно рис. 3, в области энергий E = (5–7)T_e падения интенсивности излучения в спектре м.р.и. не наблюдается, а напротив, спектр начинает отклоняться от максвелловского в сторону увеличения интенсивности. Это отклонение связано с ускорением электронов в продольном электрическом поле [11]. Кроме того, в условиях омического нагрева возможно возбуждение плазменных волн и поглощение их электронами, что также приводит к отклонениям измеренного спектра от максвелловского в сторону увеличения его интенсивности [11].

5. СПЕКТРЫ М.Р.И. В РЕЖИМЕ Э.Ц.Р.-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

В режиме э.ц.р.-нагрева также были предприняты попытки обнаружить провал в спектрах м.р.и. плазмы. Эксперименты проводились в условиях предварительной боронизации вакуумной камеры, что обеспечивало эффективный заряд плазмы Z_{eff} = 1.5–2.5 [12]. Спектры измерялись по хорде, проходящей через область нагрева плазмы [13]. Сбор данных проводился в течение нескольких импульсов установки. На рис. 4 показан типичный спектр м.р.и., измеренный в режиме центрального э.ц.р.-нагрева при мощности нагрева $P_{ECRH} = 250$ кВт. Параметры плазмы были следующими: $n_e = 1.7 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и $T_e = 750$ эВ. В области E = (5–7)T_e падения интенсивности излучения в SXR-спектре также не обнаружено. Спектр м.р.и. имеет искривленную форму в диапазоне энергий от 2 до 12 кэВ, причем отклонение от максвелловского спектра происходит в сторону увеличения интенсивности излучения.

С помощью многохордовой диагностики м.р.и. в режиме э.ц.р.-нагрева была измерена зависи-

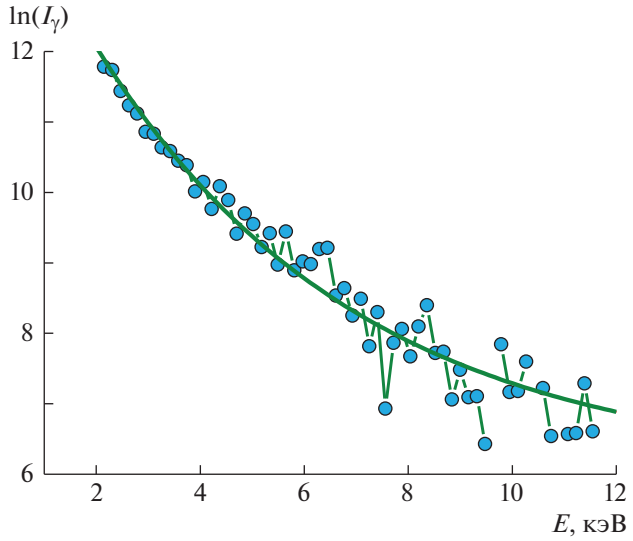

Рис. 4. Спектр м.р.и., измеренный на стеллараторе Л-2М в режиме центрального э.ц.р.-нагрева при мощности нагрева $P_{ECRH} = 250$ кВт. Параметры плазмы: $n_e = 1.7 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и $T_e = 750$ эВ. Сплошная линия – аппроксимация экспериментальных точек.

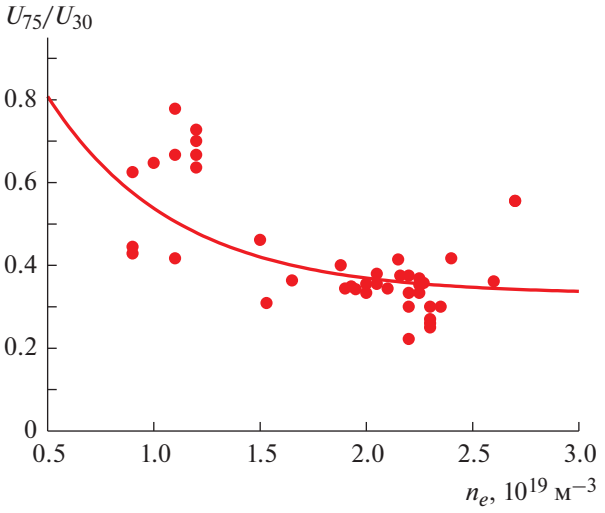

Рис. 5. Зависимость отношения сигналов двух детекторов, измеряющих интенсивности м.р.и. плазмы после прохождения излучения через две фольги с толщинами 75 и 30 мкм, от плотности в режиме э.ц.р.-нагрева. Сплошная линия – аппроксимация экспериментальных точек.

мость отношения сигналов двух детекторов, измеряющих интенсивности м.р.и. плазмы, от плотности. При этом один детектор был закрыт фольгой толщиной 75 мкм, а другой – 30 мкм (рис. 5). Оба детектора измеряли интенсивность м.р.и. плазмы по хорде, проходящей через область нагрева плазмы. Параметры плазмы были следующими: $n_e = (0.8–2.8) \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и $T_e = 650–900$ эВ. Как следует из [1], при наличии “рентгеновской ямы” отношение сигналов детекторов должно уменьшаться при плотности плазмы меньше $n_e = 1.4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Однако, согласно рис. 5, с уменьшением плотности плазмы отношение сигналов двух детекторов непрерывно возрастает. Это означает, что в этих экспериментальных условиях эффекта “рентгеновской ямы” также не наблюдается.

6. ВЫВОДЫ

В статье исследованы спектры мягкого рентгеновского излучения плазмы в различных режимах работы стелларатора Л-2М на предмет наличия “рентгеновской ямы”. По экспериментальным данным токамака Т-11М проведено моделирование эффекта “рентгеновской ямы”, которое позволило определить возможный энергетический диапазон существования этого эффекта. Моделирование показало, что при температуре плазмы в разряде $T_e = 400$ эВ и плотности $n_e = 1.4 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ падение интенсивности в спектре м.р.и. следует искать в области энергий $(5–7)T_e$.

В режиме омического нагрева в области $E = (5–7)T_e$ падения интенсивности излучения в спектре м.р.и. обнаружено не было, т.е. наблюдать эффект “рентгеновской ямы” не удалось. Напротив, в этой области энергий в спектре м.р.и. начинается отклонение экспериментальных спектров от максвелловского в сторону увеличения интенсивности. Это отклонение связано с ускорением электронов в продольном вихревом электрическом поле, создающем ток омического нагрева.

В режиме э.ц.р.-нагрева в области энергий $E = (5–7)T_e$ падения интенсивности излучения в спектре м.р.и. из области нагрева также не было обнаружено. Спектр м.р.и. имеет искривленную форму во всем диапазоне энергий от 2 до 12 кэВ, причем отклонение от максвелловского спектра происходит в сторону увеличения интенсивности излучения.

Таким образом, на стеллараторе Л-2М не удалось наблюдать эффект “рентгеновской ямы” ни в режиме омического нагрева, ни в режиме э.ц.р.-нагрева. Возможно, эксперименты на токамаке Т-11М проводились в некоторых специфических условиях, которые не были воспроизведены в экспериментах на стеллараторе Л-2М. Эти специфические условия не были описаны в статье [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mirnov S.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 045017. https://doi.org/10.1088/1361-6587/abe21e

2. *Callen J.D.* // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 39. P. 1540.
3. *Stix T.* // Nucl. Fusion. 1978. V. 18. P. 353.
4. *Kadomtsev B.B., Pogutse O.P.* // in Proc. of the 7th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. (IAEA, Vienna, 1979) Innsbruck, 1978. V. 1. P. 649.
5. *Прохоров А.С., Алексеев А.Г., Белов А.М., Лазарев В.Б., Мирнов С.В.* // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 155.
6. *Акулина Д.К., Андрюхина Э.Д., Бережецкий М.С., Гребенщиков С.Е., Воронов Г.С., Сбитникова И.С., Федянин О.И., Хольнов Ю.В., Шпигель И.С.* // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1022.
7. *Федянин О.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Васильков Д.Г., Вафин И.Ю., Воронов Г.С., Воронова Е.В., Гладков Г.А., Гребенщиков С.Е., Коврижных Л.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малых Н.И. и др.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 880.
8. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А.* // ПТЭ. 2018. № 6. С. 84. https://doi.org/10.1134/S0032816218050233
9. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю.* // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 5.
10. *Мещеряков А.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Воронов Г.С., Гладков Г.А., Гребенщиков С.Е., Гринчук В.А., Гришина И.А., Колик Л.В., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Петров А.Е., Пшеничников А.А. и др.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 496.
11. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А.* // ПТЭ. 2020. № 5. С. 82. https://doi.org/10.31857/S0032816220050195
12. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю.* // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 42.
13. *Мещеряков А.И., Гришина И.А.* // Краткие сообщения по физике. 2021. № 1. С. 36.