

УДК 533.9.07; 533.9.08

СПЕКТРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМАХ ЭЦР НАГРЕВА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

А. И. Мещеряков, И. А. Гришина

Рассмотрено влияние индуцированного продольного (вдоль тороидального магнитного поля) электрического поля на форму спектров мягкого рентгеновского излучения в режиме электронного циклотронного нагрева (ЭЦР) плазмы в стеллараторе Л-2М. Проведен анализ причин возникновения немаксвелловских “двухтемпературных” спектров мягкого рентгеновского излучения, измеренных в режимах центрального ЭЦР нагрева плазмы при уровне вводимой СВЧ мощности 200–400 кВт. По мнению авторов, двухтемпературная форма спектров возникает вследствие того, что при измерениях спектров по центральной хорде в поле зрения спектрометра попадает излучение, приходящее из двух областей плазмы. Часть излучения приходит из центральной области плазмы, а часть – из области нагрева, которая в режимах центрального ЭЦР нагрева большой мощности находится не в центре плазмы, а примерно на половине ее радиуса.

Ключевые слова: стелларатор, ЭЦР нагрев плазмы, двухтемпературные спектры мягкого рентгеновского излучения, положение области нагрева.

1. Введение. В течение нескольких десятилетий электронно-циклотронный нагрев плазмы используется на многих тороидальных магнитных ловушках как для нагрева плазмы, так и для создания токов увлечения. На многих установках было экспериментально обнаружено, что при мощном ЭЦР нагреве плазмы в тороидальных магнитных ловушках формируются немаксвелловские спектры мягкого рентгеновского излучения

ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: meshch@fpl.gpi.ru.

(SXR спектры) [1–3]. Они имеют характерную двухтемпературную форму и в полулогарифмических координатах $\ln(I/I_0) = f(E)$ могут быть аппроксимированы двумя отрезками прямых линий. В частности, в плазме стелларатора Л-2М спектры такого вида также наблюдаются в режимах с высокой приведенной мощностью нагрева (рис. 1). При этом причины появления надтемпературного хвоста в этих спектрах до сих пор остаются невыясненными. Для стелларатора Л-2М было проведено моделирование ЭЦР нагрева плазмы на основе решения усредненного по тору уравнения Фоккера–Планка с коэффициентами, учитывающими неравномерность движения электронов в области резонансного взаимодействия и самосогласованное затухание микроволнового пучка [3]. При этом не удалось получить хорошего согласия с экспериментом.

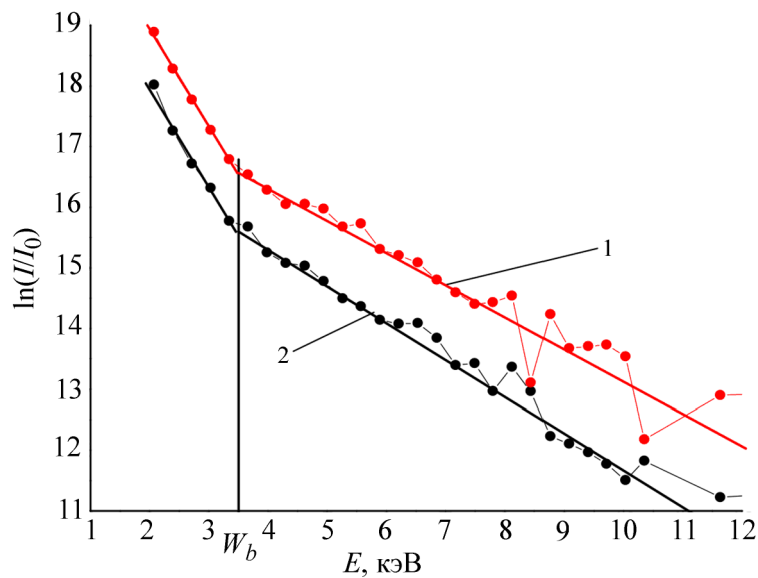


Рис. 1: Спектры SXR излучения плазмы в эксперименте с закорачиванием обмотки трансформатора. Спектры 1 и 2 соответствуют измерениям при закороченной и незакороченной обмотке трансформатора, соответственно. Мощность нагрева $P_{ECRH} \sim 240$ кВт, электронная плотность плазмы $n_e \sim 1.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

При исследовании плазмы, удерживаемой в стеллараторе Л-2М, на протяжении ряда лет ведутся работы по выяснению причин формирования двухтемпературных SXR спектров [3–6]. Эти исследования показали, что надтепловые электроны рождаются в области нагрева, в то время как SXR спектры, измеренные по хордам, не проходящим через область ЭЦР нагрева, остаются максвелловскими [5]. В данной статье на основании имеющихся у авторов данных будет показано, как именно формируются двухтем-

пературные спектры, и из каких областей плазмы приходит излучение, формирующее тепловую и надтепловую части спектра.

Дополнительно в разделе 2 будет рассмотрен вопрос о влиянии электрического поля, создаваемого токами увлечения, на форму SXR спектров плазмы. Этот вопрос возник в связи с тем, что в плазме токамаков двухтемпературные спектры обычно наблюдаются в экспериментах по созданию токов увлечения с помощью микроволнового излучения [1, 2].

2. *Влияние продольного электрического поля на форму спектров мягкого рентгеновского излучения при ЭЦР нагреве.* Хорошо известно, что продольное вихревое электрическое поле, создающее ток омического нагрева плазмы в тороидальных установках, влияет на форму спектров мягкого рентгеновского излучения (SXR спектров), приводя к появлению немаксвелловских спектров [7–9]. В работе [10] по SXR спектрам, измеренным в омическом режиме нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, определялась энергия γ -квантов W_b , начиная с которой наблюдались заметные отклонения экспериментального SXR спектра от максвелловского. По этой энергии определялась величина продольного электрического поля в плазме с использованием следующей формулы [10]:

$$E_{\parallel} = 4\pi e^3 n_e \ln \Lambda \times T_e / (W_b)^2. \quad (1)$$

Здесь n_e и T_e – электронные плотность и температура плазмы, e – заряд электрона, а $\ln(\Lambda)$ – кулоновский логарифм. Таким образом, в режиме омического нагрева плазмы надтепловая часть SXR спектра формируется под действием продольного электрического поля, и по измеренному значению W_b можно оценить величину продольного электрического поля. Спектры плазмы, сформированные при разных значениях электрического поля, должны иметь различную надтепловую часть и различную энергию W_b .

При электронном циклотронном нагреве в плазме также возникают продольные электрические поля. Они создаются неиндукционными токами увлечения. Возникает вопрос, может ли немаксвелловская (двухтемпературная) форма SXR спектров при ЭЦР нагреве плазмы быть связана с воздействием этих продольных электрических полей на электроны (так же как это происходит при омическом нагреве плазмы). Для проверки этой гипотезы следует изменить условия эксперимента, создав в плазме продольное электрическое поле меньшей величины, и проследить за изменениями формы SXR спектров. Если энергия W_b , определяемая по измеренным спектрам, будет изменяться в соответствии с формулой (1), то это будет означать, что при ЭЦР нагреве надтепловая часть спектра формируется за счет того же механизма, что и в режи-

ме омического нагрева, а именно, за счет действия продольного электрического поля. Такой эксперимент и был проведен на стеллараторе Л-2М.

Каким образом можно изменить продольное электрическое поле, возникающее в плазме в режиме ЭЦР нагрева? Полный ток, протекающий по плазме, представляет собой сумму токов увлечения и токов обратного направления, создаваемых в тороидальной плазме с помощью ЭДС самоиндукции этого контура, включающего в себя тороидальный плазменный шнур, вакуумную камеру и трансформатор, используемый при омическом нагреве. Оценка величины индуктивности этого контура дает значение $L_k = 42 \mu\text{Гн}$, при этом суммарный ток (ток плюс противоток), протекающий по плазме, измеренный поясом Роговского, возрастает к концу импульса ЭЦР нагрева длительностью 10 мс до значений $I_p = 0.2 \text{ кА}$.

Если уменьшить индуктивность контура, закоротив первичную обмотку трансформатора, то в плазме будут создаваться меньшие ЭДС самоиндукции и, соответственно, будут возникать меньшие продольные электрические поля. Тогда можно ожидать, что спектры, измеренные в условиях закороченной и незакороченной обмотки трансформатора, будут отличаться по форме. Экспериментально измерено, что в условиях закороченной первичной обмотки трансформатора индуктивность контура плазменного шнура уменьшается до значений $L_k = 3.8 \mu\text{Гн}$, а ток, протекающий по плазме, возрастает к концу импульса ЭЦР нагрева до значений $I_p = 2.0 \text{ кА}$.

При центральном ЭЦР нагреве были измерены спектры SXR излучения плазмы в двух режимах с различными продольными электрическими полями, то есть при закороченной и незакороченной обмотках трансформатора. По оценкам закорачивание обмотки должно приводить к примерно десятикратному уменьшению индуктивности плазменного контура, и, соответственно, к значительному уменьшению продольного электрического поля, возникающего в плазме. Измеренные спектры показаны на рис. 1. Спектры 1 и 2 соответствуют измерениям при закороченной и незакороченной обмотке трансформатора. Из рисунка видно, что уменьшение продольного электрического поля не повлияло на форму SXR спектра. Спектры, измеренные при различных индуктивностях контура (но при одинаковых значениях мощности СВЧ нагрева и плотности плазмы, $P_{\text{ECRH}} \sim 240 \text{ кВт}$, $n_e^{\circ} \sim 1.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$), практически совпадают по форме. Характерные энергии W_b для обоих спектров одинаковы. Это означает, что в режиме ЭЦР нагрева формирование надтепловой части спектра происходит не под действием продольного электрического поля, а в результате действия другого механизма, который будет обсуждаться в следующем разделе.

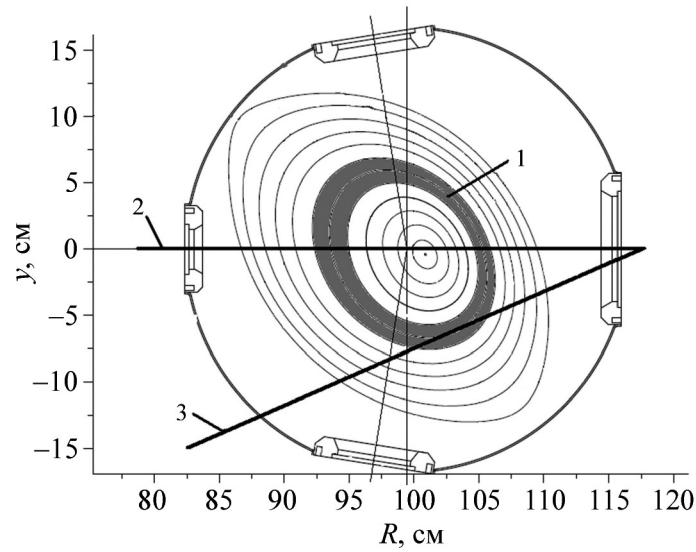


Рис. 2: (1) Кольцевая область плазмы, нагретая за счет поглощения СВЧ излучения; (2) хорда, проходящая через центр плазмы; (3) хорда, проходящая через нагретую область.

3. *Механизм формирования надтепловой части спектра мягкого рентгеновского излучения в режиме центрального ЭЦР нагрева.* В работе [11] было показано, что в экспериментах по центральному ЭЦР нагреву на стеллараторе Л-2М в зависимости от величины приведенной мощности нагрева ($p = P_{\text{ECRH}}/n_e$) реализуется один из двух механизмов поглощения микроволнового излучения. При приведенных мощностях нагрева менее $120 \text{ кВт}/10^{19} \text{ м}^{-3}$ происходит резонансное электронное циклотронное поглощение необыкновенной волны в центральной области плазменного шнура. При этом наблюдаются острые пикированные профили электронной температуры. При высоких приведенных мощностях нагрева (свыше $120 \text{ кВт}/10^{19} \text{ м}^{-3}$) на стационарной стадии разряда происходит формирование “провальных” в центральной части плазменного шнура профилей плотности. При этом в плазме появляются области с обратным градиентом плотности, где плотность возрастает от центра к краю плазменного шнура. В этих областях могут происходить каскадные процессы распада необыкновенной волны, сопровождающиеся появлением электронных Бернштейновских волн. Основным механизмом поглощения становится циклотронное поглощение электронных Бернштейновских волн, которое происходит уже не в центре плазмы, а в области существования обратного градиента плотности (для стелларатора Л-2М это примерно половина радиуса плазменного шнура). При этом, за счет движения вдоль силовых линий магнитного поля,

нагретые электроны будут находиться в кольцевой области 1 (см. рис. 2). В результате этого формируются профили электронной температуры, плоские в центральной части плазменного шнура. Другими словами, складывается парадоксальная ситуация, когда в условиях центрального ЭЦР нагрева (резонансная магнитная поверхность проходит через центр плазмы) на квазистационарной стадии разряда область поглощения СВЧ излучения находится уже не в центре плазмы, а примерно на половине радиуса плазменного шнура. По мнению авторов, именно это обстоятельство в конечном итоге приводит к формированию двухтемпературной формы измеряемых SXR спектров.

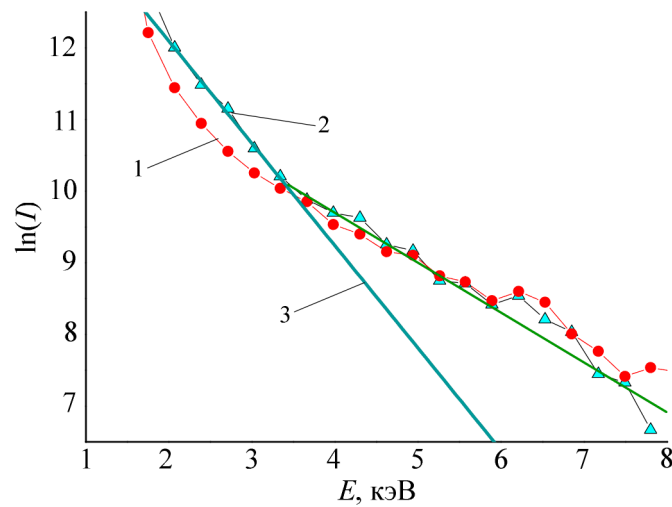


Рис. 3: SXR спектры, измеренные (1) по хорде, проходящей через область нагрева, и (2) по центральной хорде. Прямая (3) аппроксимирует максвелловский спектр из центральной области плазмы.

В режиме центрального ЭЦР нагрева с мощностью $P_{\text{ECRH}} \sim 240$ кВт и электронной плотностью $n_e \sim 1.9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на квазистационарной стадии разряда были измерены SXR спектры по хордам, проходящим через центр плазмы (хорда 2 на рис. 2) и через область 1 (хорда 3 на рис. 2). Полученные спектры приведены на рис. 3. Кружками показан спектр излучения, приходящего из области 1, то есть из области нагрева (рис. 3, спектр 1). Видно, что этот спектр не является максвелловским. Треугольниками показан спектр, измеренный по центральной хорде (спектр 2). Часть излучения, дающего вклад в этот спектр, приходит из центральной области плазмы, а часть – из тех сегментов области нагрева (рис. 2, область 1), которые попадают в поле зрения прибора, в условиях измерения по центральной хорде. В области энергий $E > 3.5$ кэВ спектр 2 совпадает со спектром излучения из области нагрева (спектром 1), что говорит о том,

что в этой области энергий центральная область плазмы дает малый вклад в суммарный спектр. А в области энергий $E < 3.5$ кэВ вклад излучения из центральной области плазмы в спектр 2 является определяющим. Поскольку область поглощения микроволнового излучения находится вне центральной части плазмы, то спектр излучения из этой области является максвелловским, и в полулогарифмическом масштабе может быть аппроксимирован прямой линией (рис. 3, прямая 3).

Таким образом, по мнению авторов, двухтемпературная форма спектров возникает вследствие того, что при измерениях по центральной хорде в поле зрения спектрометра попадает как излучение, приходящее из центральной области плазмы, так и излучение из области нагрева, совпадающей с областью, где формируется обратный градиент на профиле плотности плазмы (рис. 2, область 1). При этом прибор регистрирует суммарный спектр, который оказывается двухтемпературным.

4. *Заключение.* В статье показано, что продольное электрическое поле, создаваемое токами увлечения в режиме ЭЦР нагрева, не является причиной формирования двухтемпературных спектров SXR излучения плазмы.

Установлено, что наблюдаемая двухтемпературная форма SXR спектров излучения плазмы возникает вследствие того, что спектральный прибор регистрирует излучение, приходящее из двух различных областей плазмы: из центральной области плазмы и из области нагрева (совпадающей с областью, где формируется обратный градиент на профиле плотности плазмы), которая в режимах с большой приведенной мощностью нагрева находится примерно на половине радиуса плазмы. Таким образом, найдено объяснение явления, которое уже десятки лет наблюдается на тороидальных магнитных ловушках в режимах центрального ЭЦР нагрева большой мощности и создания токов увлечения.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Ю. В. Есипчук, Н. А. Кирнева, А. А. Мартынов, В. М. Трухин, Физика плазмы **21**(7), 577 (1995).
- [2] P. Blanchard, S. Alberti, S. Coda, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **44**, 2231 (2002).
- [3] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина и др., Физика плазмы **43**, 497 (2017).

- [4] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, Приборы и техника эксперимента, № 6, 84 (2018).
- [5] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(12), 11 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1068335619120029>.
- [6] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(1), 17 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620010042>.
- [7] Equipe TFR, Nucl. Fusion **16**, 473 (1976).
- [8] A. E. Shevelev, I. N. Chugunov, V. K. Gusev, et al., Plasma Phys. Rep. **30**, 159 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.1648942>.
- [9] V. V. Parail and O. P. Pogutse, in *Reviews of Plasma Physics*, Ed. by M. A. Leontovich and V. B. Kadomtsev (Consultants Bureau, New York, 1986), Vol. 11, p. 26.
- [10] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, Приборы и техника эксперимента, № 5 (2020), (в печати).
- [11] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина и др., Физика плазмы **46**(12), (2020), (в печати).

Поступила в редакцию 3 ноября 2020 г.

После доработки 26 ноября 2020 г.

Принята к публикации 27 ноября 2020 г.