

УДК 533.9.07; 533.9.08

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ОБЛАСТИ ЭЦР НАГРЕВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ НАДТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

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

На стеллараторе Л-2М в экспериментах по центральному и нецентральному ЭЦР нагреву были измерены спектры мягкого рентгеновского излучения, приходящего из области ЭЦР нагрева плазмы, не искаженные влиянием взаимодействия плазмы со стенкой вакуумной камеры. В обоих случаях измеренные спектры мягкого рентгеновского излучения оказались немаксвелловскими. Было установлено, что электроны, формирующие надтепловую часть спектра, рождаются в области нагрева, а не приходят из области взаимодействия плазмы со стенкой.

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

Введение. Целью данных экспериментов являлось измерение спектров мягкого рентгеновского излучения (SXR) плазмы из области электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева. По этим спектрам можно восстановить функцию распределения электронов по энергии в области нагрева, которая влияет на время удержания плазмы в магнитной ловушке. Время удержания плазмы уменьшается, если функция распределения электронов по энергиям является немаксвелловской, так как наличие надтепловых электронов приводит к ухудшению удержания плазмы. В этой связи изучение надтепловых электронов представляет большой интерес, в том числе и для крупных установок, в перспективе рассчитанных на создание термоядерного реактора.

Эксперименты проводились на стеллараторе 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 $a_p = 0.115$ м и тороидальным

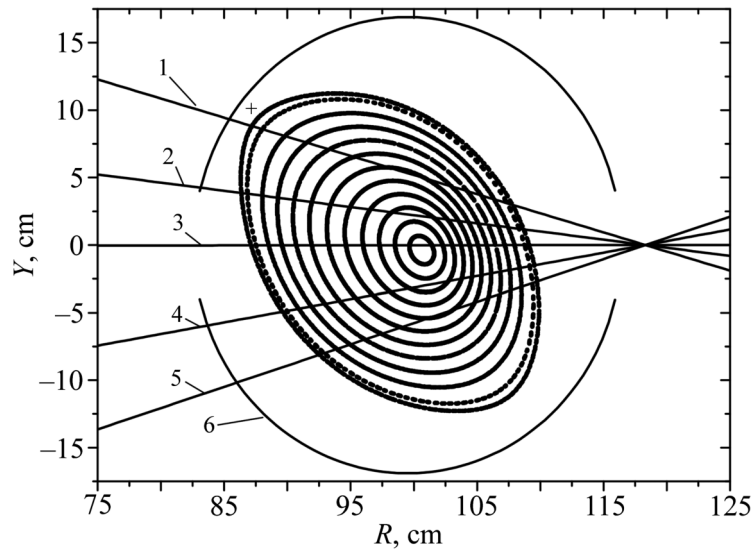


Рис. 1: Поперечное сечение вакуумной камеры (6) стелларатора Л-2М. На рисунке показаны расчетные магнитные поверхности и хорды, по которым измерялись SXR спектры (1–5). + – X-точка.

магнитным полем 1.34 Тл [1]. Для создания и нагрева плазмы использовался гиротрон, работающий на второй гармонике гирочастоты электронов (75 ГГц) [2]. В описываемых экспериментах мощность гиротрона изменялась в диапазоне 200–400 кВт. При этом средняя по центральной хорде плотность плазмы в данной серии экспериментов составляла $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В этих условиях на стеллараторе Л-2М наблюдался ряд специфических явлений, одно из которых – формирование немаксвелловских двухтемпературных спектров SXR [3]. Это явление наблюдалось при любых параметрах плазмы и мощностях нагрева, доступных при проведении экспериментов. Аналогичные спектры наблюдались и на других тороидальных установках в экспериментах по ЭЦР нагреву плазмы и созданию токов увлечения [4, 5]. Механизм формирования двухтемпературных спектров до сих пор не выяснен.

Для выяснения механизма формирования двухтемпературных спектров была создана диагностика мягкого рентгеновского излучения на основе сканирующего SXR спектрометра [6]. Диагностика позволяет измерять SXR спектры по различным хордам в поперечном сечении плазмы. Это дает возможность определить положение областей плазмы, излучение которых формирует надтепловую часть SXR спектра.

Ранее в экспериментах по центральному ЭЦР нагреву с помощью сканирующего спектрометра было обнаружено, что спектры, в наибольшей степени отклоняющиеся

от максвелловского, были измерены в верхней полуплоскости по хорде, для которой в поле зрения спектрометра попадает область X -точки сепаратрисы (рис. 1, хорда 1), где происходит наиболее интенсивное взаимодействие плазмы со стенкой камеры [6]. При этом при измерении спектров в нижней полуплоскости, в отсутствие в поле зрения прибора X -точки сепаратрисы (рис. 1, хорды 4 и 5), наблюдались SXR спектры, близкие к максвелловским. Это означает, что излучение из области сильного взаимодействия плазмы со стенкой искажает измеряемые спектры излучения плазмы.

Для получения неискаженных SXR спектров излучения из области нагрева необходимо создать специальные условия эксперимента. При центральном ЭЦР нагреве введением диафрагмы внутрь плазмы можно уменьшить влияние взаимодействия плазмы со стенкой на измеряемый SXR спектр. При введении диафрагмы уменьшается размер области горячей плазмы, и, соответственно, уменьшается взаимодействие плазмы со стенкой вакуумной камеры. Другим способом получения неискаженного SXR спектра излучения из области нагрева является проведение экспериментов по нецентральному ЭЦР нагреву. При этом хорда наблюдения должна проходить в нижней полуплоскости, поскольку, как показали эксперименты [6], при измерениях по хордам в нижней полуплоскости влияние излучения из области вблизи X -точки сепаратрисы на SXR спектры отсутствует. Тогда при измерениях по хорде, пересекающей область нагрева, будет из-

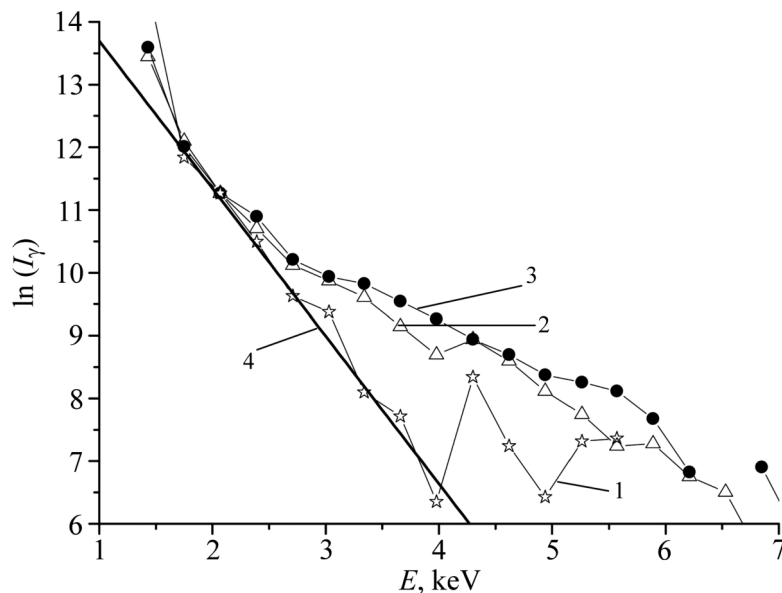


Рис. 2: Хордовые измерения SXR спектров в экспериментах с диафрагмой в режиме центрального ЭЦР нагрева. Пояснения в тексте.

мерен неискаженный спектр излучения из области ЭЦР нагрева. Эти эксперименты были проведены на стеллараторе Л-2М и их результаты представлены в данной статье.

Эксперимент с диафрагмой. Эксперименты проводились при центральном ЭЦР нагреве плазмы, когда магнитное поле в центре было равно 1.34 Тл. При этом согласно модельным расчетам поглощение СВЧ излучения происходит в узком слое центральной области плазменного шнура [7]. Полоидальная углеродная диафрагма имела размеры 15×10 см² в поперечном сечении плазменного шнура. Ее можно было вдвигать внутрь плазмы на 2.5 см с внешней стороны тора. Диафрагма не была заземлена, и плавающий потенциал диафрагмы измерялся. В данном эксперименте диафрагма была вдвинута в глубь плазмы на 1.5 см. Мощность ЭЦР нагрева составляла 250 кВт.

На рис. 2 показаны SXR спектры, измеренные по трем хордам в режиме центрального ЭЦР нагрева. Спектр 3 измерен по хорде, проходящей через центр плазменного шнура (хорда 3, рис. 1), а спектр 1 измерен по хорде, проходящей через область X-точки сепаратрисы в верхней полуплоскости (хорда 1, рис. 1). Спектр 2 измерен по хорде, которая проходит приблизительно по границе области нагрева (хорда 2, рис. 1).

Из рис. 2 видно, что спектр 3 является максвелловским, то есть ограничение размера плазмы с помощью диафрагмы успешно устраняет влияние взаимодействия плазмы со

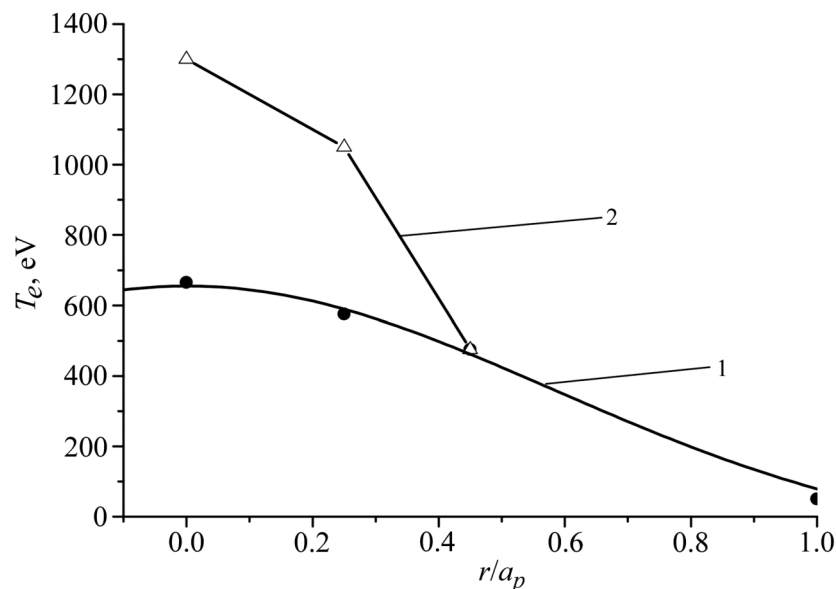


Рис. 3: Радиальные распределения тепловой (кривая 1) и надтепловой (кривая 2) температур, построенные по спектрам, приведенным на рис. 2. r – средний радиус магнитной поверхности.

стенкой на SXR спектры. Спектры 1 и 2 (спектры из области нагрева) являются двух-температурными. Это позволяет утверждать, что надтепловые электроны рождаются в области нагрева, а не приходят из области взаимодействия плазмы со стенкой.

На рис. 3 показаны радиальные распределения тепловой (кривая 1) и надтепловой (кривая 2) температур, построенные по спектрам, приведенным на рис. 2. Из рис. 3 следует, что надтепловые электроны существуют в центральной области плазмы с радиусом меньше приблизительно $0.3 a_p$.

Таким образом, эксперимент с ограничением размера плазмы диафрагмой позволил измерить SXR спектры излучения, приходящего из области нагрева, не искаженные излучением, приходящим из области интенсивного взаимодействия плазмы со стенкой. Было установлено, что электроны, формирующие надтепловую часть SXR спектра, локализованы в центральной области плазмы ($r/a_p < 0.3$).

Эксперимент по нецентральному ЭЦР нагреву. Как отмечалось выше, вторым способом получения неискаженных SXR спектров излучения из области нагрева является проведение экспериментов по нецентральному ЭЦР нагреву. При выборе геометрии измерений необходимо учесть два обстоятельства. С одной стороны, необходимо было сместить область нагрева к центру тора от центра плазменного шнура. Особенностью экспериментов на стеллараторе Л-2М является то, что пробой и нагрев плазмы осуществляются одним и тем же гиротроном. Максимальное расстояние, на которое, при имеющихся гиротронах, можно было сместить область нагрева – примерно $1/3$ радиуса плазмы с внутренней стороны тора. При этом магнитное поле в центре составляло 1.28 Тл. При меньших магнитных полях в центре получить горячую плазму не удавалось. Второе обстоятельство состоит в том, что хорда наблюдения должна проходить в нижней полуплоскости. При этом будут измерены SXR спектры, не искаженные влиянием процессов, происходящих вблизи X-точки сепаратрисы. По данным, приведенным в работе [6], подходящими являются хорды с прицельным параметром $0.2 < r/a_p$ в нижней полуплоскости. При соблюдении этих двух условий можно измерить неискаженные спектры SXR излучения, в том числе приходящего из области нагрева. Если спектры излучения из области нагрева, измеренные при нецентральном ЭЦР нагреве, будут иметь надтепловой хвост, это будет означать, что механизм возникновения надтепловых электронов связан с процессами, происходящими в области нагрева плазмы.

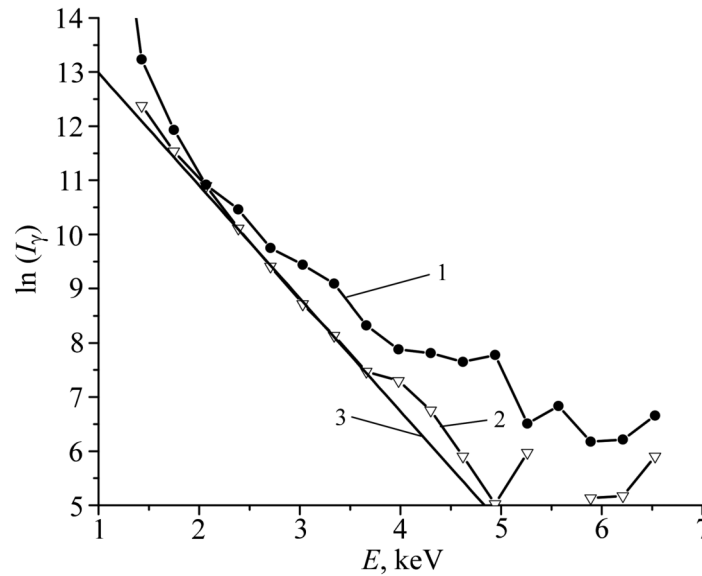


Рис. 4: Хордовые измерения SXR спектров в экспериментах по нецентральному ЭЦР нагреву.

На рис. 4 показаны SXR спектры, измеренные в эксперименте по нецентральному ЭЦР нагреву. Кривая 1 соответствует спектру, измеренному по хорде, касательной к радиусу 0.38 в нижней полуплоскости (хорда 5, рис. 1). Эта хорда является касательной к магнитным поверхностям, проходящим через область ЭЦР нагрева. Кривая 2 измерена по хорде 4, касательной к радиусу 0.22 в нижней полуплоскости. Эта хорда не проходит через область нагрева, и в этой области плазмы излучение из области X -точки сепаратрисы уже не влияет на SXR спектры. Из рис. 4 видно, что SXR спектр, измеренный по хорде 4, является максвелловским. При этом спектр излучения из области нагрева (хорда 5) имеет надтепловой хвост. Эти измерения еще раз подтверждают, что надтепловые электроны рождаются в области нагрева, а не приходят из области взаимодействия плазмы со стенкой.

Выводы. На стеллараторе Л-2М проведены эксперименты, целью которых было измерение SXR спектров излучения плазмы из области нагрева. В предыдущих экспериментах было обнаружено, что излучение из области сильного взаимодействия плазмы со стенкой (область вблизи X -точки сепаратрисы) искажает измеряемые спектры излучения плазмы. В данной работе были предложены и экспериментально реализованы два способа измерения неискаженных SXR спектров в области нагрева. В первой серии экспериментов по центральному ЭЦР нагреву плазмы внутрь плазмы была введе-

на диафрагма, которая уменьшила взаимодействие плазмы со стенкой в области угла сепаратрисы. Измеренные в области ЭЦР нагрева SXR спектры оказались немаксвелловскими. Было установлено, что электроны, формирующие надтепловую часть SXR спектра, локализованы в центральной области плазмы ($r/a_p < 0.3$). Во второй серии экспериментов по нецентральному ЭЦР нагреву плазмы за счет выбора геометрии измерений также удалось измерить неискаженные спектры SXR излучения плазмы из области ЭЦР нагрева. Измеренные спектры также оказались немаксвелловскими. Эти измерения еще раз подтверждают, что надтепловые электроны рождаются в области нагрева, а не приходят из области взаимодействия плазмы со стенкой.

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, Д. К. Акулина, Г. М. Батанов и др., *Физика плазмы* **31**(6), 496 (2005).
- [2] Г. М. Батанов, В. И. Белоусов, Ю. Ф. Бондарь и др., *Прикладная физика*, № 6, 79 (2012).
- [3] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина и др., *Физика плазмы* **43**(6), 497 (2017).
- [4] Ю. В. Есипчук, Н. А. Кирнева, А. А. Мартынов, В. М. Трухин, *Физика плазмы* **21**(7), 577 (1995).
- [5] P. Blanchard, S. Alberti, S. Coda, et al., *Plasma Phys. and Control. Fusion*. **44**(10), 2231 (2002).
- [6] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, *Приборы и техника эксперимента*, № 6, 84 (2018).
- [7] А. С. Сахаров, М. А. Терещенко, *Физика плазмы* **28**(7), 584 (2002).

Поступила в редакцию 10 июня 2019 г.

После доработки 27 ноября 2019 г.

Принята к публикации 28 ноября 2019 г.