

## Спектры мягкого рентгеновского излучения в режиме ЭЦР-нагрева плазмы с удельной мощностью нагрева до $3 \text{ МВт/м}^3$ на стеллараторе Л-2М

А. И. Мещеряков, И. А. Гришина

*На стеллараторе Л-2М при увеличении мощности ЭЦР-нагрева плазмы исследована динамика формы спектров мягкого рентгеновского излучения (SXR-спектров), температуры тепловой части SXR-спектров и экспериментально определенного энергетического времени жизни плазмы. Измерены зависимости температур тепловой и надтепловой частей спектров от мощности нагрева и плотности плазмы при увеличении удельной мощности нагрева  $3,0 \text{ МВт/м}^3$ . Установлено, что при увеличении удельной мощности ЭЦР-нагрева до  $3,0 \text{ МВт/м}^3$  на стеллараторе Л-2М не происходит заметного ухудшения удержания плазмы.*

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

*Ссылка:* Мещеряков А. И., Гришина И. А. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 10.

*Reference:* A. I. Meshcheryakov and I. A. Grishina, Prikl. Fiz., No. 6, 10 (2018).

### Введение

Получение плазмы с термоядерными параметрами в тороидальных магнитных ловушках требует использования дополнительных методов нагрева. Одним из основных методов дополнительного нагрева плазмы является электронный циклотронный резонансный нагрев (ЭЦР-нагрев). Этот метод используется практически на всех тороидальных установках. В том числе планируется использовать его на строящемся экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР. Планируемая мощность ЭЦР-нагрева на установке ИТЭР составляет порядка  $P = 50 \text{ МВт}$ . Поэтому наблюдение за изменениями параметров плазмы при увеличении мощности нагрева является актуальной задачей.

На стеллараторе Л-2М возможно проведение экспериментов по созданию и нагреву плазмы с помощью микроволнового излучения при высокой удельной мощности  $P/V = (1,0-3,0) \text{ МВт/м}^3$  [1]. Заметим, что подобная величина удельной мощности является рекордной для тороидальных магнитных ловушек.

Целью данной работы являлся анализ динамики таких важных параметров плазмы стелларатора Л-2М, как электронная температура и энергетическое время жизни при возрастании удельной мощности нагрева плазмы до  $3,0 \text{ МВт/м}^3$ .

### Измерение спектров мягкого рентгеновского излучения и электронной температуры плазмы

Эксперименты проводились на установке Л-2М. Это классический двухзаходный стелларатор (заходность винтовой обмотки  $l = 2$ , число периодов поля при обходе тора  $N = 7$ ) с большим радиусом тора  $R = 1 \text{ м}$ , радиусом плазмы  $a = 0,115 \text{ м}$ , и тороидальным магнитным полем  $B_0 = 1,34 \text{ Тл}$  [2]. Для стелларатора Л-2М на основе собственной базы данных был построен скейлинг [3], то есть экспериментальная функциональная зависимость, которая связывает между собой энергетическое время жизни  $\tau_E$  и основные параметры установки, такие как мощность нагрева  $P$ , электронную плотность  $n_e$  и параметры магнитной конфигурации установки. Для стелларатора Л-2М скейлинг может быть записан в виде соотношения [3]:

$$\tau_E^{L-2M} \sim \text{const} \times P^{0,7} \times n_e^{0,7}. \quad (1)$$

В описываемых экспериментах мощность ЭЦР-нагрева менялась в диапазоне от 100 до 750 кВт, что соответствует значениям удельной мощности нагрева от 0,4 до  $3,0 \text{ МВт/м}^3$ . При этом плотность

---

Мещеряков Алексей Иванович, зав. лаб., к.ф.-м.н.  
Гришина Ирина Анатольевна, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.  
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru, grishina@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2018 г.

плазмы менялась в диапазоне  $(1-3) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Электронная температура плазмы определялась из спектров мягкого рентгеновского излучения, которые регистрировались спектрометром мягкого рентгеновского излучения, работающим в диапазоне энергий от 1 кэВ до 80 кэВ и обладающим скоростью счета  $V = 1,5 \times 10^5$  квантов в секунду [4].

При изменении параметров плазмы в широком диапазоне были измерены немаксвелловские двухтемпературные спектры мягкого рентгеновского излучения (т. н. SXR-спектры), воспроизведенные на рис. 1. Спектры представлены в полупологарифмическом масштабе. При таком представлении спектра максвелловскому спектру отвечает прямая линия, наклон которой равен электронной температуре плазмы. Измеренные спектры можно аппроксимировать двумя прямыми линиями с различными наклонами, соответствующими разным «температурам» в высоко- и низкоэнергетических участках спектра. Обозначим температуру низкоэнергетической тепловой части электронов  $T_e^{\text{bulk}}$ . Наклон высокоэнергетической надтепловой части SXR-спектра будем условно характеризовать «температурой хвоста»  $T_e^{\text{tail}}$ . Аналогичные двухтемпературные спектры наблюдались и на других тороидальных магнитных ловушках, использующих ЭЦР-излучение для нагрева плазмы и создания токов увлечения, например, на стеллараторах LHD [5] и J-2M [6], а также на токамаках TCV [7] и T-10 [8].

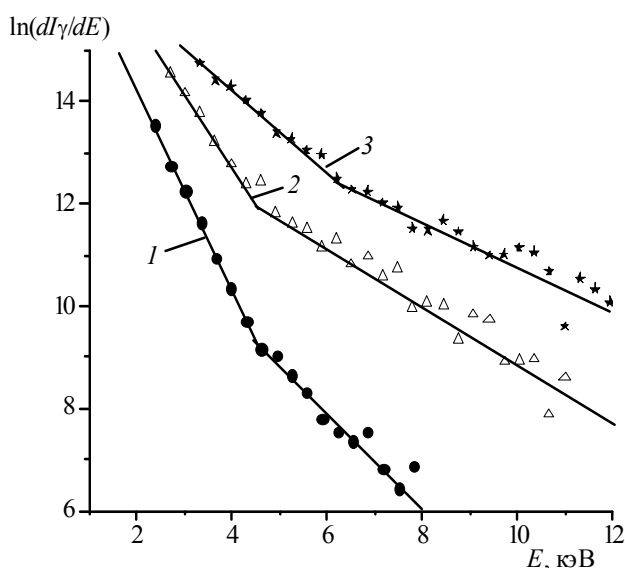


Рис. 1. Спектры мягкого рентгеновского излучения, измеренные при различных мощностях ЭЦР-нагрева: 1 –  $P = 100 \text{ кВт}$ ; 2 –  $P = 200 \text{ кВт}$ ; 3 –  $P = 670 \text{ кВт}$ .

На рис. 1 показаны SXR-спектры, измеренные при трех мощностях ЭЦР-нагрева. Видно, что с ростом мощности нагрева спектры остаются

двухтемпературными. С увеличением мощности нагрева растут как температура тепловой части электронов, так и «температура хвоста».

На рис. 2 приведены зависимости температур основной массы тепловых электронов  $T_e^{\text{bulk}}$  и надтепловой части  $T_e^{\text{tail}}$  от мощности ЭЦР-нагрева, измеренные при плотности плазмы  $n_e = 2,0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Из рисунка видно, что обе температуры растут с увеличением мощности ЭЦР-нагрева, однако вид зависимостей отличается друг от друга. Рост температуры тепловой части электронов может быть описан формулой  $T_e^{\text{bulk}} \sim P^{0,3}$  (рис. 2, кривая 1). Эта зависимость согласуется со скейлингом (1) для установки J-2M, если считать, что профили электронной температуры и плотности не меняются при увеличении мощности ЭЦР-нагрева. Зависимость температуры надтепловой части электронов от удельной мощности нагрева немного отличается от скейлинга ( $T_e^{\text{tail}} \sim P^{0,135}$ , рис. 2, кривая 2), но общая тенденция роста температуры с ростом удельной мощности нагрева остается неизменной.

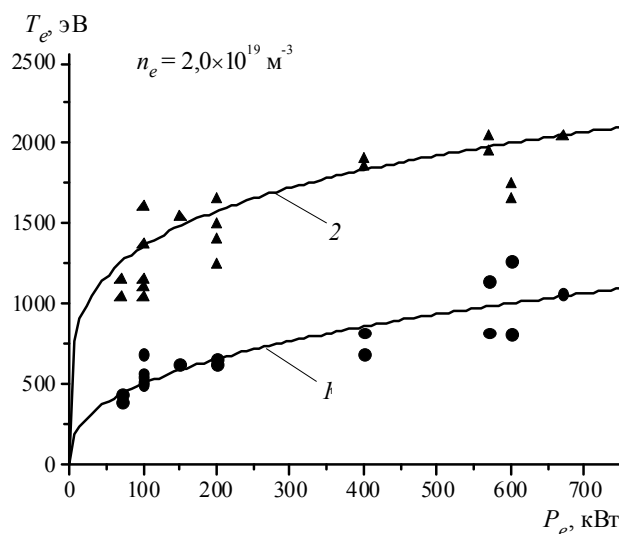


Рис. 2. Зависимости температур (1)  $T_e^{\text{bulk}}$  и (2)  $T_e^{\text{tail}}$  от мощности нагрева  $P_{\text{ECRH}}$ . Кружками и треугольниками обозначены измеренные значения температур тепловой и надтепловой частей спектра.

На Рис. 3 приведены зависимости температур  $T_e^{\text{bulk}}$  (кривые 1 и 2) и  $T_e^{\text{tail}}$  (кривые 3 и 4) от плотности плазмы при двух мощностях ЭЦР-нагрева: 200 кВт (кривые 1, 3) и 600 кВт (кривые 2, 4 на рис. 3). Из рисунка видно, что обе температуры уменьшаются с ростом концентрации электронов, поскольку падает мощность, приходящаяся на один электрон. Зависимость температуры тепло-

вой части электронов от средней плотности также хорошо согласуется со скейлингом стелларатора Л-2М.

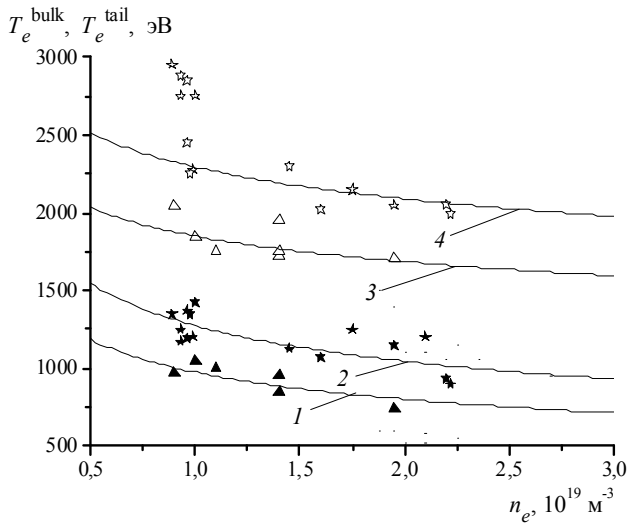


Рис. 3. Зависимости значений  $T_e^{\text{bulk}}$  (кривые 1, 2) и  $T_e^{\text{tail}}$  (кривые 3, 4) от плотности плазмы при двух мощностях нагрева: (кривые 1, 3)  $P = 200$  кВт; (кривые 2, 4)  $P = 600$  кВт.

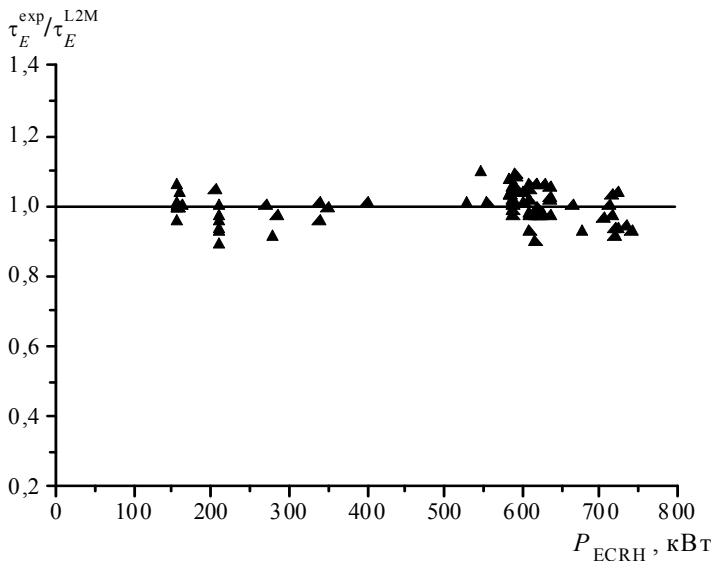


Рис. 4. Зависимость экспериментально определенного энергетического времени жизни  $\tau_E^{\text{exp}}$ , нормированного на энергетическое время жизни  $\tau_E^{\text{L-2M}}$ , вычисленное на основании скейлинга стелларатора Л-2М, от мощности ЭЦР-нагрева.

Проведенные измерения зависимостей температуры тепловой части спектра от мощности ЭЦР-нагрева и плотности плазмы позволяют утверждать, что при увеличении удельной мощности ЭЦР-нагрева до  $3,0 \text{ МВ/м}^3$  на стеллараторе Л-2М не происходит заметного ухудшения удержания плазмы.

Об изменениях в удержании плазмы при росте удельной мощности нагрева можно также судить, анализируя динамику энергетического времени жизни  $\tau_E = W/P$ . В проведенных экспериментах это время жизни  $\tau_E^{\text{exp}}$  определялось по данным диамагнитных измерений энергосодержания плазмы  $W$ . Определяя отношение  $\tau_E^{\text{exp}}$  к энергетическому времени жизни  $\tau_E^{\text{L-2M}}$ , посчитанному на основании скейлинга (1) для установки Л-2М, можно судить об изменении удержания плазмы при росте удельной мощности нагрева. Эта зависимость показана на рис. 4. Из рисунка видно, что при увеличении удельной мощности ЭЦР-нагрева до  $3,0 \text{ МВ/м}^3$  на стеллараторе Л-2М не происходит заметного ухудшения удержания плазмы.

### Заключение

На основании анализа динамики формы SXR-спектров, температуры тепловой части SXR-спектров и экспериментально определенного энергетического времени жизни плазмы на стеллараторе Л-2М установлено, что при увеличении удельной мощности ЭЦР-нагрева до  $3,0 \text{ МВ/м}^3$  на стеллараторе Л-2М не происходит заметного ухудшения удержания плазмы.

Авторы хотели бы выразить благодарность членам коллектива стелларатора Л-2М за участие в проведении экспериментов.

Работа частично поддержана Президиумом РАН в рамках Программы фундаментальных исследований «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-02-00609).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Батанов Г. М., Белоусов В. И., Бондарь Ю. Ф., Борзосекоев В. Д., Васильков Д. Г., Гребеничиков С. Е., Иванников И. А., Колик Л. В., Кончечков Е. М., Малахов Д. В., Матвеев Н. В., Меццержаков А. И., Петров А. Е., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Степахин В. Д., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Тай Е. М. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 79.

2. Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., Batanov G. M., Berezhetskij M. S., Danilkin I. S., Donskaya N. P., Fedyanin O. I., Gladkov G. A., Grebenshchikov S. E., Harris J. H., Kharchev N. K., Kholnov Yu. V., Kolik L. V., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Likin K. M., Lyon J. F., Meshcheryakov A. I., Nechaev Yu. I., Petrov A. E., Sarksyian K. A., Sbitnikova I. S. // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. No. 2. P. 233.

3. 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., Гребеничиков С. Е., Коврижных Л. М., Ларионова Н. Ф., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Малых Н. И., Меццержаков А. И., Нецаев Ю. И., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Щепетов С. В., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 880.

4. Меццержаков А. И., Вафин И. Ю., Гришина И. А. // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6 (в печати).

5. Muto S., Morita S., Kubo Shimozuma S., Idei H., Yoshimura Y. Review of Scientific Instruments. 2003. Vol. 74. I. 3 P. 1993.

6. Меццержаков А. И., Вафин И. Ю., Гришина И. А., Летунов А. А., Терещенко М. А. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 6. С. 497.

7. Blanchard P., Alberti S., Coda S., Weisen H., Nikkola P., Klimanov I. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. Vol. 44. I. 10. P. 2231.

8. Esipchuk Yu. V., Kirneva N. A., Martynov A. A., Trukhin V. M. // Plasma Physics Reports. 1995. Vol. 21. No. 7. P. 577.

PACS: 52.50.-b

## Soft X-ray spectra measured at the L-2M stellarator in the experiments on ECR heating at a specific heating power up to 3 MW/m<sup>3</sup>

*A. I. Meshcheryakov and I. A. Grishina*

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru, grishina@fpl.gpi.ru

*Received September 14, 2018*

***Dynamics of SXR spectra, temperature of thermal electrons and plasma energy lifetime which was determined experimentally were studied at the L-2M stellarator in the experiments when the specific heating power was increased up to 3 MW/m<sup>3</sup>. Temperatures of thermal and suprathermal electrons were measured as functions of heating power and plasma density. It was ascertained that there is no considerable deterioration of plasma confinement in the L-2M stellarator as the specific ECR heating power increases up to 3.0 MW/m<sup>3</sup>.***

**Keywords:** stellarator, SXR spectra, high specific ECR heating power, plasma confinement.

## REFERENCES

1. G. M. Batanov, V. I. Belousov, Yu. F. Bondar, et al., Plasma Physics Reports **39** (13), 1088 (2013).
2. V. V. Abrakov, D. K. Akulina, E. D. Andryukhina, et al., Nuclear Fusion. **37** (2), 233 (1997).
3. O. I. Fedyanin, D. K. Akulina, G. M. Batanov, et al., Plasma Physics Reports **33** (10), 805 (2007).
4. A. I. Meshcheryakov, I. Yu. Vafin, and I. A. Grishina, Instruments and Experimental Techniques, No. 6 (2018) (to be published).
5. S. Muto, S. Morita, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Idei, and Y. Yoshimura, Review of Scientific Instruments **74** (3), 1993 (2003).
6. A. I. Meshcheryakov, I. Yu. Vafin, I. A. Grishina, A. A. Letunov, and M. A. Tereshchenko, Plasma Physics Reports **43** (6), 599 (2017).
7. P. Blanchard, S. Alberti, S. Coda, H. Weisen, P. Nikkola, and I. Klimanov, Plasma Phys. Control. Fusion **44** (10), 2231 (2002).
8. Yu. V. Esipchuk, N. A. Kirneva, A. A. Martynov, and V. M. Trukhin, Plasma Physics Reports **21** (7), 577 (1995).