

УДК 533.9.07; 533.9.08

К ВОПРОСУ О САМОСОГЛАСОВАННОСТИ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

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

Анализируются профили электронной температуры и давления электронной компоненты плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева. Показано, что при небольших мощностях СВЧ нагрева $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт на стеллараторе Л-2М форма профилей электронной температуры остается неизменной. При более высоких мощностях нагрева форма профилей температуры меняется. Они уплощаются в центральной части плазменного шнура. Показано также, что при небольших мощностях ЭЦР нагрева $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт, профили давления электронной компоненты плазмы имеют форму, которая может быть аппроксимирована каноническим профилем давления, полученным для стеллараторов, то есть являются самосогласованными. При мощностях ЭЦР нагрева выше 250 кВт нельзя сделать однозначный вывод о самосогласованности профилей давления плазмы в стеллараторе Л-2М.

Ключевые слова: самосогласованные профили электронной температуры и давления электронной компоненты плазмы, токамаки, стеллараторы, самоорганизация плазмы.

Введение. В последние годы накоплено много данных, касающихся процессов “самоорганизации” плазмы, удерживаемой в тороидальных магнитных ловушках [1, 2]. Самоорганизация плазмы означает, что в процессе удержания плазмы магнитным полем в тороидальных магнитных ловушках радиальные профили плазменных параметров

имеют тенденцию релаксировать в направлении от первоначальных профилей, возникающих в результате внешнего воздействия, к так называемым каноническим профилям. Каноническими профилями называют самосогласованные профили параметров плазмы, форма которых устойчива и меняется лишь незначительно при изменении параметров плазмы в достаточно широких пределах. Процессы самоорганизации плазмы наблюдаются как в токамаках, так и в стеллараторах [2].

Давление плазмы складывается из давлений электронной и ионной компонент, пропорциональных произведениям плотности и температуры соответствующих компонент. На токамаках проведено большое количество экспериментов, которые показывают, что радиальные профили давления электронной компоненты плазмы являются самосогласованными. Их форма в пределах ошибок измерений не зависит ни от плотности плазмы, ни от профиля плазменного тока. В работе [2] приведена формула для канонического профиля давления плазмы в токамаках: $p(\rho) = p_0/(1 + \rho^2)^2$, где p_0 – давление на оси плазмы. Здесь ρ – приведенный радиус плазмы, который зависит от параметров установки следующим образом: $\rho = r/(I_p R/kB)^{1/2}$, где I_p – плазменный ток, R – большой радиус установки, B – магнитное поле, а k – вытянутость плазменного шнура. В таких координатах профили давления плазмы в токамаках будут иметь схожую форму. По оценкам, на стеллараторе Л-2М вклад ионов в энергосодержание плазмы $W = 3/2(n_e T_e + n_i T_i)$ составляет порядка $W_i \sim 0.1W$. Поэтому далее в статье мы будем обсуждать только профили давления электронной компоненты плазмы и, для краткости, будем употреблять термин “профили давления” плазмы.

В работе [1] приведены нормализованные профили давления, рассчитанные по экспериментальным данным токамаков Т-10, JET, TEXTOR и RTP. Экспериментальные данные соответствовали значительно отличающимся друг от друга режимам работы установок, однако форма соответствующих профилей давления одинакова. Как показывают эксперименты на токамаках, если при внешнем воздействии форма профиля давления нарушается, то процесс обратного восстановления самосогласованного профиля происходит за весьма короткое время: $\tau_c < 0.1\tau_E$, где τ_E – энергетическое время жизни плазмы [3].

Кроме того, есть экспериментальные подтверждения того, что в токамаках самосогласованными являются также профили угловой скорости вращения плазмы и профили электронной температуры [4, 5].

Для стеллараторов вопрос о наличии самосогласованных профилей параметров плазмы еще однозначно не решен, поскольку считается, что удержание плазмы в стеллараторе определяется неоклассическими транспортными процессами [6]. Однако в плазме стеллараторов наблюдается ряд эффектов, которые не могут быть объяснены в рамках модели неоклассического переноса энергии и частиц. К таким явлениям относятся, например, возникновение режимов улучшенного удержания плазмы (H-мода) и формирование внутренних транспортных барьеров [7]. Подобные явления свидетельствуют о наличии процессов самоорганизации плазмы в стеллараторах. Например, в работе [8] было продемонстрировано наличие самосогласованных профилей давления в плазме стелларатора TJ-II.

Целью данной работы была экспериментальная проверка того, являются ли самосогласованными профили электронной температуры $T_e(r)$ и давления электронной компоненты плазмы $p_e(r)$ в режиме ЭЦР нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М.

Экспериментальная установка и методы измерений. Эксперименты проводились на стеллараторе Л-2М, который представляет собой классический двухзаходный стелларатор ($l = 2$, $N = 7$) с большим радиусом тора $R = 1$ м, радиусом плазмы $a = 0.115$ м и тороидальным магнитным полем $B_0 = 1.34$ Т. Основным методом нагрева на установке является электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев в СВЧ-диапазоне частот. Для создания и нагрева используются два гиротрона частотой 75 ГГц. Длительность импульса гиротронов при ЭЦР нагреве 12 мс. При мощности излучения гиротронов порядка 1МВт энергосодержание плазмы составляет $W = 0.75$ кДж, максимальная плотность составляет $n_e = 3.0 \cdot 10^{19}$ м⁻³, а центральная электронная температура достигает $T_e = 1.0$ кэВ [9].

Для измерения профиля электронной температуры использовалась многохордовая диагностика мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1–80 кэВ, предназначенная для непрерывного, в течение импульса, измерения радиальных профилей интенсивности мягкого рентгеновского излучения и температуры электронов [10]. Интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы измерялись по семи хордам в поперечном сечении камеры стелларатора, а затем на основании этих данных рассчитывалась температура электронов с использованием метода фильтров.

Измерение радиальных профилей плотности плазмы проводилось с помощью интерферометра Майкельсона на основе HCN-лазера ($\lambda = 337$ мкм). Измерения набегов фаз проводились по семи хордам за несколько импульсов стелларатора. Восстановление профиля электронной плотности по полученным данным хордовых измере-

ний набегов фаз проводится для модельного радиального распределения для различных моментов времени путём минимизации функционала по параметрам аппроксимирующей функции [11].

Анализ профилей электронной температуры. В режиме центрального ЭЦР нагрева измерялись профили электронной температуры для рабочих разрядов, отличающихся плотностью плазмы ($1.5 < n_e < 2.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и уровнем вводимой в плазму СВЧ мощности ($190 < P_{\text{ECRH}} < 600 \text{ кВт}$). Полученные профили электронной температуры, нормированные на соответствующие значения температуры в центре плазмы, показаны на рис. 1. При СВЧ мощности нагрева в диапазоне $190 < P_{\text{ECRH}} < 250 \text{ кВт}$ все профили имеют одинаковую колоколообразную форму (кривая 1): температура монотонно спадает от центра к краю плазмы. Такая форма профилей соответствует центральному профилю поглощаемой мощности.

Дополнительное подтверждение того, что в режиме центрального ЭЦР нагрева с мощностью $P_{\text{ECRH}} < 250 \text{ кВт}$ профили электронной температуры на стеллараторе Л-2М имеют одинаковую форму, можно найти также в работе [12]. Там приведена зависимость пикированности профилей электронной температуры от приведенной мощности ЭЦР нагрева. Под пикированностью профиля понимается отношение максимальной темпе-

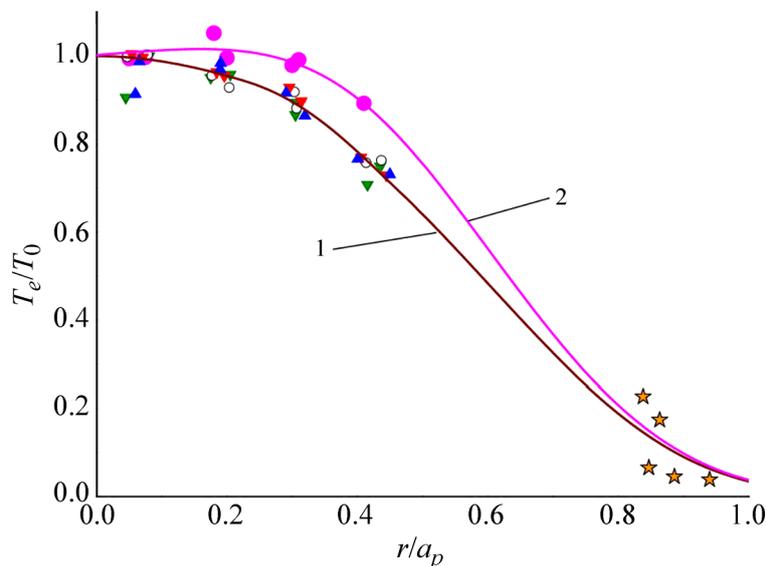


Рис. 1: Измеренные профили электронной температуры, нормированные на соответствующие значения температуры в центре плазмы. Звездочками показаны значения температуры на краю плазмы, полученные с помощью спектроскопических измерений.

ратуры к температуре на половине радиуса. Показано, что при приведенной мощности $P_{\text{ECRH}}/n_e < 120 \cdot 10^{-19}$ кВт·м⁻³ (что соответствует $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт) пикированность профилей электронной температуры не меняется (в пределах ошибок измерений) при изменении плотности плазмы и мощности нагрева в широких пределах.

На рис. 1 также приведен нормированный профиль температуры, измеренный при мощности ЭЦР нагрева $P_{\text{ECRH}} = 600$ кВт (кривая 2). Видно, что в этом случае происходит изменение формы профиля температуры. При мощности нагрева свыше 250 кВт профили электронной температуры в стеллараторе Л-2М уплощаются в центральной части плазменного шнура. Причиной этого, по мнению авторов, является изменение формы профилей электронной плотности и последующая смена механизма поглощения СВЧ излучения [12]. За счет эффекта “density pump out” формируются “провальные” профили электронной плотности, и в плазме возникают области с “обратным” градиентом плотности. В этих областях происходят процессы распада СВЧ-волны необыкновенной моды, приводящие в конечном итоге к появлению электронных бернштейнских волн, которые и поглощаются в областях с обратным градиентом плотности [13]. Это приводит к соответствующему изменению формы профиля электронной температуры. Это фактически означает, что профили электронной температуры в общем случае не являются самосогласованными (если придерживаться терминологии работы [2]).

Анализ профилей давления плазмы. Анализ профилей параметров плазмы проводился на основе данных, полученных с помощью диагностик, проводящих хордовые измерения: HCN интерферометра и многохордовой диагностики мягкого рентгеновского излучения. Анализ проводился при небольших мощностях ЭЦР нагрева $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт, когда в плазме формируются пикированные профили температуры и профили плотности с небольшим провалом в центральной области плазмы.

На рис. 2 в качестве примера показаны профили электронной температуры и плотности, измеренные на стеллараторе Л-2М в режиме центрального ЭЦР нагрева с мощностью $P_{\text{ECRH}} = 210$ кВт. Кривая 1 представляет собой аппроксимацию значений электронной температуры, рассчитанных по экспериментальным данным многохордовой диагностики, а кривая 2 – это результат восстановления профиля электронной температуры по данным кривой 1 с учетом влияния холодной периферии. При хордовых измерениях влияние холодной периферии приводит к занижению истинной температуры в центральных областях плазмы. Восстановление истинного профиля температуры проведено с помощью моделирования мягкого рентгеновского излучения плазмы [14]. Кривая 3 представляет собой профиль электронной плотности, восстановленный

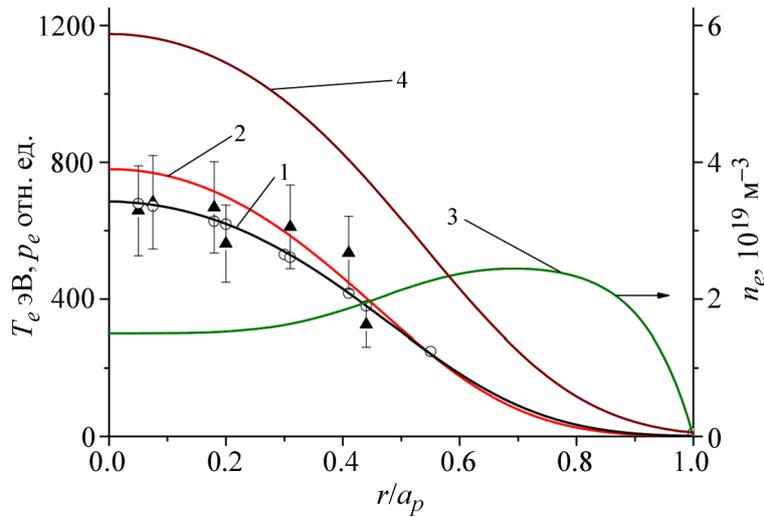


Рис. 2: Профили электронной температуры (кривые 1-2) и плотности (кривая 3), измеренные на стеллараторе Л-2М в режиме центрального ЭЦР нагрева с мощностью $P_{\text{ECRH}} = 210$ кВт. Кривая 4 – соответствующий профиль давления электронной компоненты плазмы.

по данным хордовых измерений с помощью HCN интерферометра. Наконец, кривая 4 представляет собой профиль давления электронной компоненты плазмы $p_e(\rho)$, полученный путем перемножения кривых 2 и 3. Здесь $\rho = r/a_p$ – безразмерный радиус плазмы. Профиль $p_e(\rho)$ хорошо согласуется с каноническим профилем $p_c(\rho)$, найденным в работе [2];

$$p_c(\rho) = p_0 \cdot \exp(-2 \cdot [\ln(p_0/p_a)/(1 + \mu_a/\mu_0)] \cdot \rho^2 \cdot (1 + (\mu_a/\mu_0 - 1) \cdot \rho^2/2)). \quad (1)$$

Здесь p_0 и p_a – значения давления электронной компоненты в центре и на краю плазмы, определяемом сепаратрисой магнитной системы Л-2М ($a = 0.115$ м), а μ_0 и μ_a – соответствующие значения угла вращательного преобразования. В работе [2] канонический профиль давления электронной компоненты плазмы был получен при решении вариационной задачи на нахождение минимума функционала полной энергии системы, состоящей из энергии магнитного поля и энергии плазмы. Для стелларатора Л-2М, значения углов вращательного преобразования равны, соответственно, $\mu_0 = 0.18$ и $\mu_a = 0.78$. Значение p_0/p_a является подгоночным параметром, и экспериментальный профиль давления хорошо согласуется с каноническим при $p_0/p_a = 105$.

Дополнительным подтверждением самосогласованности профиля давления электронной компоненты плазмы в стеллараторе Л-2М при мощностях ЭЦР нагрева

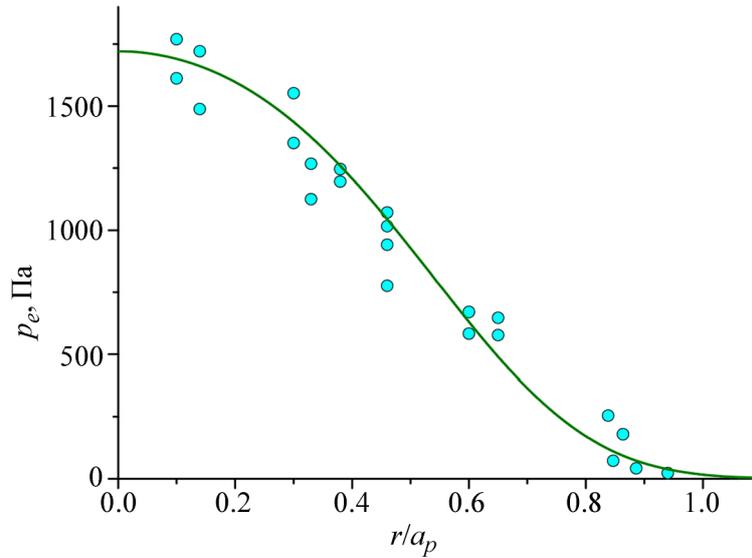


Рис. 3: Профиль давления электронной компоненты плазмы в условиях центрального ЭЦР нагрева мощностью $P_{\text{ECRH}} = 165$ кВт при плотности плазмы $n_e = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

$P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт являются данные, представленные на рис. 3. На этом рисунке показан профиль давления, полученный в режиме центрального ЭЦР нагрева с мощностью $P_{\text{ECRH}} = 165$ кВт и плотностью плазмы $n_e = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Условия эксперимента отличаются от соответствующих условий для профиля давления плазмы, приведенного на рис. 2. На рис. 3 кругами показан профиль давления плазмы, полученный с использованием профиля электронной температуры, измеренного с помощью другой диагностики – диагностики излучения плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты, и профиля электронной плотности, рассчитанного по данным хордовых измерений HCN интерферометра [11]. По экспериментальным точкам (рис. 3) проведена аппроксимирующая кривая, которая описывается формулой для канонического профиля давления плазмы [2] с параметром $p_0/p_a = 105$, таким же, как и профиль давления на рис. 2. Другими словами, в экспериментах по ЭЦР нагреву плазмы на стеллараторе Л-2М форма профиля давления плазмы сохраняется при изменении экспериментальных условий, то есть близка к канонической.

Таким образом, показано, что при небольших мощностях ЭЦР нагрева $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт, когда в плазме формируются колоколообразные профили температуры и профили плотности с небольшим провалом в центре (рис. 2, кривая 3), профиль давления электронной компоненты плазмы имеет форму, которая может быть аппроксимирована каноническим профилем давления, вычисленным для стеллараторов [2]. Таким

образом, в этом диапазоне мощностей ЭЦР нагрева профили давления плазмы можно считать самосогласованными.

Как отмечалось выше, при мощностях нагрева свыше 250 кВт профили электронной температуры в стеллараторе Л-2М уплощаются в центральной части плазменного шнура. В этом случае формируются профили плотности с заметным провалом в центральной части плазменного шнура. При этом профиль давления электронной компоненты $p_e(\rho)$ становится не каноническим. При этом вопрос о самосогласованности профилей давления на стеллараторе Л-2М при высоких мощностях нагрева $P_{\text{ECRH}} > 250$ кВт пока остается открытым.

Выводы. Показано, что в плазме стелларатора Л-2М при небольших мощностях ЭЦР нагрева $P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт форма профилей электронной температуры сохраняется при изменении плотности плазмы в диапазоне $1.5 < n_e < 2.8 \cdot 10^{19}$ м⁻³. Однако при более высокой мощности ЭЦР нагрева форма профилей электронной температуры меняется. Это означает, что профили электронной температуры в общем случае не являются самосогласованными (если придерживаться терминологии работы [2]).

Показано, что при небольших мощностях ЭЦР нагрева $190 < P_{\text{ECRH}} < 250$ кВт, когда в плазме формируются колоколообразные профили температуры и профили плотности с небольшим провалом в центральной части, профили давления электронной компоненты сохраняются и имеют форму, которая может быть аппроксимирована каноническим профилем давления, вычисленным для стеллараторов [2]. Таким образом, в этом диапазоне мощностей ЭЦР нагрева профили давления плазмы являются самосогласованными. При мощностях ЭЦР нагрева свыше 250 кВт невозможно сделать однозначных выводов о самосогласованности профилей давления на стеллараторе Л-2М.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] K. A. Razumova, V. F. Andreev, L. G. Eliseev, et al., Nucl. Fusion **51**, 083024 (2011).
- [2] Ю. Н. Днестровский, *Самоорганизация горячей плазмы* (М., НИЦ “Курчатовский институт”, 2013), 172 с.
- [3] K. A. Razumova, V. F. Andreev, L. G. Eliseev, et al., Nucl. Fusion **51**, 083024 (2011). DOI: 10.1088/0029-5515/51/8/083024.
- [4] E. D. Fredrickson, K. M. McGuire, R. J. Goldston, et al., Nucl. Fusion **27**, 1897 (1987).
- [5] D. R. Mikkelsen, H. Shirai, H. Urano, et al., Nucl. Fusion **43**, 30 (2003).
- [6] Л. М. Коврижных, Физика плазмы **32**, 1070 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120026>.

- [7] M. Hirsch, J. Baldzuhn, C. Beidler, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **50**, 053001 (2008). DOI: 10.1088/0741-3335/50/5/053001.
- [8] M. Liniers, E. Ascasíbar, T. Estrada, et al., Recent results with NBI plasmas in TJ-II stellarator, in Proceedings of the 15th International Stellarator Workshop, Madrid, 2005, Paper P3-14. [http://www-fusion.ciemat.es/SW2005/conferences/madrid06/proceedings/posters/\(P3-14\)_LiniersM.pdf](http://www-fusion.ciemat.es/SW2005/conferences/madrid06/proceedings/posters/(P3-14)_LiniersM.pdf).
- [9] A. I. Meshcheryakov, G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **907**, 012016 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/907/1/012016.
- [10] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, *Прикладная физика*, № 4, 5 (2018).
- [11] А. В. Князев, А. А. Летунов, В. П. Логвиненко, *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 105 (2004).
- [12] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, *Физика плазмы* **47**(1), 1144 (2020). DOI: 10.31857/S0367292120120057.
- [13] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, *Физика плазмы* **47**(1), 22 (2021). DOI: 10.31857/S0367292120120057.
- [14] А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, *Прикладная физика* № 5, 42 (2018).

Поступила в редакцию 22 апреля 2021 г.

После доработки 17 мая 2021 г.

Принята к публикации 18 мая 2021 г.