УДК 533.9

ПРОФИЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2020 г. А. И. Мещеряков^{а, *}, И. Ю. Вафин^а, И. А. Гришина^{а, **}

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия *e-mail: meshch@fpl.gpi.ru **e-mail:grishina@fpl.gpi.ru Поступила в редакцию 23.05.2020 г. После доработки 28.06.2020 г. Принята к публикации 15.07.2020 г.

Проведен анализ формы профилей электронной температуры, измеряемых на стеллараторе Л-2М в режиме центрального ЭЦР-нагрева при различных плотностях плазмы и мощностях нагрева. Установлено, что существует порог по приведенной мощности ЭЦР-нагрева, при превышении которого профили электронной температуры уширяются и становятся плоскими в центральной части плазменного шнура. Выявлена корреляция между возникновением плоских профилей температуры и провальных профилей электронной плотности, возникающих в результате "pump-out" эффекта. Сделан вывод, что появление в плазме провальных профилей плотности приводит к смене механизма поглощения СВЧ-излучения. Основным механизмом поглощения СВЧ-излучения, предположительно, становится циклотронное поглощение электронных бернштейновских волн, что, в свою очередь, приводит к появлению широких и плоских (в центральной части) профилей электронной температуры.

Ключевые слова: стелларатор, ЭЦР-нагрев плазмы, плоский профиль электронной температуры, провальный профиль электронной плотности, электронная бернштейновская волна **DOI:** 10.31857/S0367292120120057

1. ВВЕДЕНИЕ

Электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев широко используется на тороидальных установках для нагрева электронной компоненты плазмы. Одним из преимуществ этого метода является локальность нагрева: энергия волны поглощается в небольшом объеме на пересечении СВЧ-волны и резонансной поверхности. На стеллараторе Л-2М для создания и нагрева водородной плазмы используется ЭЦР-нагрев необыкновенной волной на второй гармонике электронной шиклотронной резонансной частоты. В настоящее время нагрев, осуществляется с помощью гиротронного комплекса МИГ-3 [1], состоящего из двух гиротронов. Частота излучения гиротронов составляет f = 75 ГГц. Суммарная мощность СВЧ-излучения, поглощаемого в плазме, достигает 1 МВт, а удельная мощность нагрева достигает значений, рекордных для тороидальных магнитных ловушек: $P_{\rm ECRH}/V =$ $= 4 \text{ MBt/m}^3$, где V – объем плазмы в установке. При столь больших удельных мощностях ЭЦРнагрева на стеллараторе Л-2М наблюдается целый ряд новых явлений [2]: возникновение профилей плотности, провальных в центре плазменного шнура, изменение формы профилей электронной температуры, формирование немаксвелловских, двухтемпературных спектров мягкого рентгеновского излучения, а также падение энергетического времени жизни по сравнению со скейлингом стелларатора Л-2М (при увеличении мощности ЭЦР-нагрева до 1 МВт). Данная работа посвящена исследованию одного из этих явлений — изменению формы профиля электронной температуры — в условиях центрального ЭЦР-нагрева плазмы.

В работе [3], в рамках линейной теории поглощения, было выполнено моделирование поглощения необыкновенной волны СВЧ-излучения в плазме стелларатора Л-2М. Оно показало, что в условиях центрального ЭЦР-нагрева профиль плотности мощности поглощаемого СВЧ-излучения является очень узким, по форме близким к гауссовой кривой с шириной на полувысоте около $\Delta x = 0.1 \times (r/a_p)$ (рис. 1, кривая *1*). Для стелларатора Л-2М эта величина составляет ~1.0 см. При таком узком профиле поглощаемой мощности естественно ожидать, что профиль электронной температуры окажется достаточно острым,



Рис. 1. Профиль плотности мощности поглощения СВЧ-излучения в плазме стелларатора Л-2М, вычисленный в условиях центрального ЭЦР-нагрева. $B_{res}/B_0 = 1.0$ и $P_{ECRH} = 230$ кВт (кривая *I*). Характерный острый профиль электронной температуры, измеренный в условиях центрального ЭЦР-нагрева в режиме $P_{FCRH} = 200$ кВт, $n_e = 1.9 \times 10^{19}$ м⁻³ (кривая 2).

спадающим от центра к краю. Однако в экспериментах по ЭЦР-нагреву наблюдается более сложная картина: измеряются профили электронной температуры различной формы. Это могут быть как острые профили (рис. 1, кривая 2), спадающие от центра к краю, так и профили плоские в центральной части плазменного шнура ($r/a_p < 0.4$) (рис. 2, кривые 1 и 2). Иногда наблюдаются даже профили электронной температуры с небольшим провалом в центральной части плазменного шнура.

Для выяснения причин различия форм экспериментальных и расчетных профилей, в данной работе проведено исследование профилей электронной температуры, измеренных с помощью многохордовой диагностики мягкого рентгеновского излучения (МРИ) и сканирующего спектрометра МРИ на стеллараторе Л-2М в режиме центрального ЭЦР-нагрева.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на стеллараторе Π -2M — классическом двухзаходном стеллараторе, имеющем две пары винтовых обмоток (l = 2) и 28 катушек тороидального поля [4]. Большой радиус тора равен R = 1 м, а средний радиус крайней магнитной поверхности плазменного шнура составляет $a_p = 11.5$ см. В поперечном сечении магнитные поверхности имеют вид эллипсов с полуосями a и b. При этом для представления радиальных распределений параметров плазмы принято использовать средние радиусы магнитных поверхностей $r = (a \times b)^{1/2}$. Объем плазмы в стел-



Рис. 2. Характерный плоский в центральной части плазменного шнура профиль электронной температуры, измеренный в условиях центрального ЭЦР-нагрева в режиме $P_{ECRH} = 400$ кВт и $n_e = 2.5 \times 10^{19}$ м⁻³. *1* – кривая, измеренная при помощи многохордовой диагностики МРИ, а кривая 2 – при помощи сканирующего спектрометра МРИ, *3* – значение центральной электронной температуры, измеренное спектрометром KEVEX.

лараторе Л-2М равен $V = 0.26 \text{ м}^3$. Величина магнитного поля в центре плазменного шнура составляет $B_0 = 1.34$ Тл. Профили электронной температуры, представленные в данной работе, измерялись в режиме центрального ЭЦР-нагрева, то есть в условиях $B_{ce}/B_0 = 1$, где B_{ce} – магнитное поле на резонансной магнитной поверхности $(\omega = \omega_{ce})$, а B_0 — магнитное поле в центре плазменного шнура. Экспериментам по ЭЦР-нагреву плазмы на стеллараторе Л-2М неизменно предшествует процедура боронизации вакуумной камеры [5]. Эта процедура позволяет существенно снизить поступление тяжелых (Cr, Fe, Ni) и легких (С, О) примесей в плазму во время импульса ЭЦР-нагрева. В качестве рабочего газа в экспериментах используется водород. Оценка эффективного заряда плазмы, сделанная на основании спектроскопических измерений в диапазоне мягкого рентгенновского излучения, дает значения Z_{eff} = 1.5–2.0. В описываемых экспериментах мощность ЭЦР-нагрева и плотность плазмы изменялись в диапазонах от 100 кВт до 750 кВт и от $1.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $3.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ соответственно.

Измерения распределения электронной температуры проводились с помощью многохордовой диагностики МРИ методом фольг [6]. В многохордовой диагностике в качестве детекторов используются кремниевые поверхностно-барьерные диоды типа ORTEC, которые работают в режиме измерения интенсивности излучения. Излучение принималось вдоль девяти хорд в поперечном сечении тороидальной камеры стелларатора. При использовании метода фольг прибор дает возможность получить в одном импульсе распределение температуры электронов по поперечному сечению плазменного шнура и проследить за его временной эволюцией в течение импульса плазмы.

Электронная температура плазмы определялась также по спектрам МРИ, которые регистрировались спектрометром, работающим в диапазоне энергий от 1 кэВ до 80 кэВ и обладающим скоростью счета $K = 1.5 \times 10^5$ квантов в секунду [7]. Спектральное разрешение прибора, измеренное с использованием источника радиоактивного излучения ⁵⁵Fe, составило $\Delta E = 320$ эB. В приборе используется кремниевый детектор, легированный литием Si(Li). Радиальное пространственное разрешение спектрального прибора составляет ~1.5 см. Спектр собирался в течение нескольких импульсов установки на квазистационарной стадии разряда, когда основные параметры плазмы достигают стационарного значения. Для проведения хордовых измерений спектров МРИ спектрометр был помещен на сканирующую платформу.

Еще один прибор, использованный в данных экспериментах для измерения электронной температуры, это спектрометр КЕVEX в диапазоне МРИ. С его помощью можно измерять спектры МРИ только по центральной хорде плазменного шнура. Он обладает скоростью счета $K \sim 10^4$ квантов в секунду, что в 15 раз меньше, чем скорость счета сканирующего спектрометра, и требует значительно большего числа импульсов установки для набора статистически достоверного спектра, однако его спектральное разрешение значительно лучше. Полная ширина на полувысоте спектрометра КЕVEX, измеренная с помощью источника ⁵⁵Fe, составляет 200 эВ.

Профили электронной плотности измерялись с помощью интерферометра Майкельсона на основе HCN-лазера (337 мкм). В вакуумной камере размещено семь зеркал, любое из которых может быть включено в оптическую схему интерферометра поворотом внешнего зеркала. Таким образом, осуществляется сканирование по семи хордам.

3. АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Все имеющиеся профили электронной температуры, измеренные в различных условиях, были разбиты на две группы в соответствии с особенностями их формы. В первой группе были собраны острые или монотонно спадающие от центра к



Рис. 3. База данных профилей температуры. По осям мощность СВЧ-нагрева и средняя по хорде плотность плазмы. Форма профилей электронной температуры показана с помощью различных значков: острые профили – треугольники, плоские и провальные профили – кружки.

краю профили (рис. 1, кривая 2), а плоские в центральной части плазменного шнура (рис. 2, кривые 1 и 2) и плоские с небольшим провалом в центральной части плазменного шнура профили составили вторую группу. Профили электронной температуры измерялись на квазистационарной стадии разряда в режиме центрального ЭЦР-нагрева. При этом фиксировались основные параметры разряда: средняя по центральной хорде плотность плазмы $\langle n_e \rangle$ и мощность импульса СВЧ-нагрева Р_{ЕСКН}. На рис. 3 представлена имеющаяся база данных. По осям показаны параметры разрядов: мощность СВЧ-нагрева *Р_{ЕСКН}* и средняя по хорде плотность плазмы $\langle n_{a} \rangle$. Форма профилей электронной температуры в разрялах с соответствующими параметрами показана с помощью различных значков: острые профили - треугольники, а плоские и провальные профили – кружки. Видно, что острые профили лежат в основном выше и левее линии, которая представляет собой некоторый критический уровень приведенной мощности нагрева (P_{ECRH}/n_e)_{cr} = 120 кВт/10¹⁹ м⁻³. В режимах с уровнем приведенной мощности меньше $(P_{ECRH}/n_e)_{cr}$ наблюдаются в основном острые профили температуры.

Острые профили электронной температуры можно характеризовать величиной пикированности профиля, которую обычно определяют как $k = T_e(0)/T_e(0.5 \times r/a_p)$. Однако мы будем пользоваться выражением $k = T_e(0)/T_e(0.4 \times r/a_p)$, так как имеющаяся многохордовая диагностика МРИ позволяет измерять профили электронной температуры только в диапазоне безразмерных радиу-



Рис. 4. Зависимость пикрованности профиля от приведенной мощности нагрева для острых профилей электронной температуры. Горизонтальная прямая среднее значение пикированности по всем импульсам. Вертикальная прямая — критическое значение приведенной мощности выше которого, как правило, не наблюдаются острые профили электронной температуры

сов $-0.41 < r/a_p < 0.44$. Такое определение пикированности профиля позволит нам избежать неточности, связанной с тем, что нами не измерено значение температуры в точке на половине радиуса. Величина пикированности профиля количественно оценивает, насколько профиль является острым.

На рис. 4 приведена зависимость пикированности профилей температуры от величины приведенной мощности нагрева для выборки из острых профилей. Горизонтальная прямая – это среднее значение пикированности по всем импульсам выборки $\langle k \rangle = 1.6$, а вертикальная прямая — критическое значение приведенной мощности $(P_{ECRH}/n_e)_{cr} = 120 \text{ кBt}/10^{19} \text{ м}^{-3}$, выше которого, как правило, не наблюдаются острые профили электронной температуры. Удивительным является тот факт, что пикированность профиля не зависит от приведенной мощности нагрева, в то время как сам факт возникновения острых или плоских профилей зависит именно от приведенной мощности, причем эта зависимость носит пороговый характер: плоские профили возникают при приведенной мощности нагрева, превышающей некоторое пороговое значение $(P_{ECRH}/n_e)_{cr}$

Представленная на рис. 4 зависимость дает основание предположить, что существуют два диапазона значений приведенной мощности нагрева, где механизмы поглощения CBЧ-излучения различны. При удельных мощностях нагрева, меньших порогового значения (P_{ECRH}/n_e)_{cr}, измеряемые профили температуры являются неизменно острыми. Это согласуется с результатами теоретических расчетов [3], в которых при всех плотностях плазмы, вплоть до плотности $n_{\rho} =$ $= 3.0 \times 10^{19}$ м⁻³, при которой становится существенной рефракция СВЧ-излучения, профили поглощаемой мощности всегда являются острыми (рис. 1). В линейной теории поглощения необыкновенной волны, использованной в [3], нельзя получить профили поглощенной мощности (а значит, и профили температуры) другой формы. В то же время эксперименты показывают, что при удельных мощностях нагрева, превышающих пороговое значение, по-видимому, возникает другой механизм поглощения СВЧ-волны, в результате действия которого профиль поглощенной мощности перестает быть пикированным, что, в свою очередь, приводит к профилям электронной температуры, плоским в центральной части плазменного шнура.

Параметром, изменение которого может служить причиной изменения механизма поглощения СВЧ-излучения в плазме, является форма профиля плотности. Она зависит от приведенной мощности нагрева и скачкообразно меняется, когда приведенная мощность нагрева, увеличиваясь, переходит через некоторое пороговое значение.

4. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЦР-НАГРЕВА

На стеллараторе Л-2М имеется база данных по профилям плотности, измеренным в режиме центрального ЭЦР-нагрева. Эта база данных позволяет проследить за изменением формы профиля плотности при увеличении мощности нагрева. В условиях стандартной для стелларатора Л-2М средней плотности $n_e = (1.5-2.5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и не-большой мощности нагрева $P_{ECRH} = (100-250) \text{ кВт}$, наблюдаются профили плотности, монотонно спадающие от центра к периферии плазменного шнура. Такие профили хорошо описываются параболой: $n_e(r) = n_{e0} \times [1 - (r/a_p)^{\alpha}]$, где n_{e0} – центральная плотность, a_p – средний радиус граничной магнитной поверхности, α – показатель параболы. По мере того как мощность ЭЦР-нагрева приближается к 250 кВт (что соответствует приведенной мощности нагрева 120 кВт/ 10^{19} м⁻³), происходит постепенное уплощение профилей в центральной части плазменного шнура и увеличение градиентов плотности на краю, что соответствует росту показателя степени параболы α до 10–16 [8]. При мощностях нагрева свыше 250 кВт профили плотности становятся провальными, то есть плотность плазмы в центральной части плазменного шнура становится меньше, чем плотность плазмы на периферии (рис. 5, кривая 1). Причем, величина провала на профиле плотности возрастает при дальнейшем увеличении мощности ЭЦР-нагрева. Это явление – повышенный перенос электронов из области поглощения СВЧ-излучения на периферию при ЭЦР-нагреве плазмы, получившее название "density pump-out effect", - наблюдается на многих тороидальных магнитных ловушках (как на токамаках [9, 10], так и на стеллараторах [11, 12]). Оно подробно изучалось, например, на стеллараторе LHD [13], однако в работе не сделано никаких заключений о природе этого явления. На стеллараторе Л-2М, при центральном ЭЦР-нагреве, эффект "провальности" профиля плотности в центре плазменного шнура выражен особенно ярко. Это связано с рекордно высокими для тороидальных магнитных ловушек удельными мощностями ЭЦРнагрева: $P_{ECRH}/V = 4 \text{ MBt/m}^3$, где V – объем плазмы в установке [14]. Примечательно, что формирование плоских профилей электронной температуры коррелирует с возникновением провальных профилей плотности при ЭЦР-нагреве плазмы. То есть, в тех режимах, в которых формируется монотонно-спадающий к периферии плазмы профиль плотности, наблюдаются острые профили $T_{e}(r)$, а в режимах с провальным профилем плотности – плоские или слегка провальные профили $T_e(r)$, как это показано на рис. 5 (кривые 1 и 2). Таким образом, в условиях, когда приведенная мощность нагрева меньше $120 \text{ кBt}/10^{19} \text{ м}^{-3}$, в плазме формируются профили плотности, монотонно спадающие от центра к краю, и, по-видимому, реализуется механизм циклотронного поглощения необыкновенной волны на второй гармонике электронной циклотронной частоты, который формирует центральный профиль поглощаемой мощности и острый профиль электронной температуры. А в условиях, когда приведенная мощность нагрева больше 120 кВт/10¹⁹ м⁻³, возникают профили плотности с провалом в центре плазменного шнура и создается возможность для реализации другого механизма поглощения СВЧ-волн. Этот механизм отличается от механизма поглошения необыкновенной волны на второй гармонике электронного циклотронного резонанса, рассмотренного в работе [3].

В работах [15, 16] рассмотрены нелинейные процессы распада необыкновенной волны в плазме. Показано, что если распределение плотности по радиусу в плазме немонотонно, и в ней существуют области с обратным градиентом (плотность возрастает от центра к периферии), то в этих областях может происходить распад Х-волны на две бернштейновские волны: локализованную электронную (ЭБ) и ионную (ИБ). Причем



Рис. 5. Профили плотности (кривая *1*) и электронной температуры (кривая *2*) в условиях $P_{ECRH} = 300 \text{ кВт и}$ $n_e = 1.75 \times 10^{19} \text{ м}^{-3} (P_{ECRH}/n_e > 120 \text{ кВт}/10^{19} \text{ м}^{-3}).$ Профиль давления электронной компоненты плазмы (кривая *3*) приведен в относительных единицах.

для реализации этого процесса требуются небольшие мощности СВЧ-волны, обычно имеющиеся в экспериментах по ЭЦР-нагреву. Авторы работ [15, 16] провели предварительный расчет. показавший, что в плазме стелларатора Л-2М в условиях ЭЦР-нагрева при наличии провальных в центре профилей плотности такой распалный процесс может возникнуть. Затем следует каскад распадных процессов, число которых конечно: первичная ЭБ-волна распадается на вторичную локализованную ЭБ-волну и ИБ-волну. Вторичная локализованная ЭБ-волна распадается на третичную локализованную ЭБ-волну и ИБ-волну и так далее. Такое рассмотрение распадных процессов показывает, что возможно превращение Х-волны в электронную бернштейновскую, которая может поглотиться на поверхности циклотронного резонанса уже не в центре плазменного шнура, а в области обратного градиента плотности, там, где эта волна оказывается локализована. Возможно, именно такой механизм поглощения реализуется в экспериментах по центральному ЭЦР-нагреву на стеллараторе Л-2М в условиях большой мощности нагрева и провального в центре профиля плотности, что согласуется с экспериментально измеренными профилями и электронной температуры и плотности, приведенными на рис. 5.

Как упоминалось ранее, на стеллараторе Л-2М в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы с большой удельной мощностью наблюдается еще одно явление, не получившее пока своего объяснения: формирование двухтемпературных спектров мягкого рентеновского излучения [17]. Возможно, что механизм этого явления также связан с наличием в плазме процессов распада необыкновенной волны на электронную и ионную бернштейновские волны с последующим циклотронным поглощением электронной бернштейновской волны в области с обратным градиентом плотности. Однако рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ формы профилей электронной температуры, измеряемых на стеллараторе Л-2М в режиме центрального ЭЦР-нагрева при различных плотностях плазмы и мощностях нагрева. Установлено, что при малых приведенных мощностях нагрева (до 120 кВт/10¹⁹ м⁻³) профили температуры являются пикированными, и их ширина согласуется с результатами расчетов, предполагающих электронный циклотронный механизм поглощения необыкновенной волны на второй гармонике ЭЦ-резонанса. При приведенных мощностях нагрева свыше 120 кВт/10¹⁹ м⁻³ форма профилей электронной температуры меняется. Профили становятся плоскими в центральной части плазменного шнура, и их ширина на полувысоте возрастает. Выявлена корреляция между возникновением плоских профилей температуры и провальных профилей электронной плотности, возникающими в результате "ритрout" эффекта. Сделан вывод, что появление в плазме провальных профилей плотности приводит к смене механизма поглощения СВЧ-излучения. В плазме появляются области с обратным градиентом плотности. В них, предположительно, начинают 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 примерно на половине радиуса плазменного шнура (в области существования обратного градиента плотности, где локализованы электронные бернштейновские волны). Это, в свою очередь, приводит к появлению широких и плоских (в центральной части) профилей электронной температуры.

Авторы выражают благодарность А.А. Летунову, Е.В. Вороновой и В.П. Логвиненко за предоставленные данные по профилям плотности плазмы в различных режимах работы стелларатора Л-2М.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-0200609).

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 1 2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батанов Г.М., Белоусов В.И., Бондарь Ю.Ф., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Гребенщиков С.Е., Иванников И.А., Колик Л.В., Кончеков Е.М., Малахов Д.В., Матвеев Н.В., Мещеряков 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.
- Meshcheryakov A.I., Batanov G.M., Borzosekov V.D., Grebenshchikov S.E., Grishina I.A., Kharchev N.K., Kholnov Yu.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kovrizhnykh L.M., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Malakhov D.V., Petrov A.E., Sarksyan K.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 907. 012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012016
- 3. *Сахаров А.С., Терещенко М.А.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 7. С. 584.
- 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.
- 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., Рябенко Г.А., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Федянин О.И., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Шарапов В.М. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 496.
- 6. *Мещеряков А.И., Вафин И.Ю.* // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 42.
- 7. Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. // ПТЭ. 2018. № 6. С. 84. [А.І. Meshcheryakov, I.Yu. Vafin and I.A. Grishina, Instrum. Exp. Tech. 61, 842 (2018)] https://doi.org/). https://doi.org/10.1134/S0020441218050196
- Летунов А.А., Воронова Е.В., Гребенщиков С.Е., Логвиненко В.П. // Тезисы докладов 18 конф. по диагностике высокотемпературной плазмы (ДВП-18), Красная Пахра, 2019. С. 203. http://dvp.iterrf.ru/images/downloads/sbornik_tez_i_doc.pdf.
- 9. TFR Group // Nucl. Fusion. 1985. V. 25. P. 1011.
- Erckmann V., Gasparino U. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. P. 1869.
- Stroth U., Geist T., Koponen J.P.T., Hartfuß H.-J., Zeiler P. and ECRH and W7-AS team // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 928. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.928
- 12. Renner H., Anabitarte E., Ascasibar E., Besshou S., Brakel R., Burhenn R., Cattanei G., Dodhy A., Dorst D., Elsner A., Engelhardt K., Erckmann V., Evans D., Gas-

parino U., Grieger G. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1989. V. 31. P. 1579.

- Makino R., Kubo S., Ido T., Tanaka K., Shimozuma T., Yoshimura Y., Nishiura M., Igami H., Takahashi H., Shimizu A., Ogasawara S. // Plasma Fusion Res. 2013. V. 8. 2402115. https://doi.org/10.1585/pfr.8.2402115
- 14. Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2020. № 1. С. 17. [А.I. Meshcheryakov, I.Yu. Vafin and I.A. Gri-

shina, Bull. Lebedev Phys. Inst. **47**, 10 (2020)]. https://doi.org/10.3103/S1068335620010042

- Gusakov E.Z., Popov A.Yu. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. 082503.
- 16. *Gusakov E.Z., Popov A.Yu.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 104003.
- Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А., Летунов А.А., Терещенко М.А. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 497.