

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА САМООРГАНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ НА СТАДИИ ЕЕ РЕЛАКСАЦИИ ПОСЛЕ ВЫКЛЮЧЕНИЯ ЭЦР-НАГРЕВА В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2022 г. А. И. Мещеряков^{а,*}, И. А. Гришина^а

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 19.05.2022 г.

После доработки 21.06.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Проанализированы свойства удержания плазмы в стеллараторе Л-2М непосредственно после выключения импульса ЭЦР-нагрева. Для этой стадии удержания плазмы получена экспериментальная зависимость общей мощности потерь из плазмы от энергосодержания, которая характеризует свойства самосогласованного состояния плазмы в стеллараторе Л-2М и удержание плазмы с помощью магнитной системы данной установки. Получен скейлинг для энергетического времени жизни для стелларатора Л-2М на стадии после выключения импульса ЭЦР-нагрева. Показано, что этот скейлинг весьма близок к скейлингу для стелларатора Л-2М на квазистационарной стадии разряда.

Ключевые слова: самоорганизация плазмы, канонические профили давления электронной компоненты плазмы, мощность потерь, скейлинг, энергетическое время жизни, стелларатор Л-2М, СВЧ-излучение, ЭЦР-нагрев

DOI: 10.31857/S0367292122600893

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние годы накоплено много экспериментальных данных о проявлениях самосогласованного поведения плазмы в тороидальных магнитных ловушках, а именно, о свойстве плазмы сохранять профили некоторых параметров при внешнем воздействии [1–6]. Кроме того, процессы самоорганизации плазмы активно исследуются с использованием различных транспортных моделей [7–9]. Концепция самоорганизации плазмы в тороидальных магнитных ловушках развита в работах [1, 2]. Считается, что в процессе самоорганизации профили параметров плазмы имеют тенденцию релаксировать в направлении от первоначальных профилей, возникающих в результате внешнего воздействия, к так называемым каноническим профилям [2]. В состоянии с каноническими профилями параметров система стабильна, и удержание энергии происходит наилучшим образом. При этом тепловые потоки в системе минимальны и определяются не локальными параметрами плазмы и их градиентами, а такими глобальными параметрами, как энергосодержание и плотность, а также тем, насколько система отклонилась от состояния, определяемого каноническими профилями. Восстановление канонической формы профилей происходит очень

быстро, за времена порядка нескольких десятых от времени удержания энергии [1].

В данной работе исследовалось удержание плазмы на стадии ее релаксации после выключения СВЧ-импульса в режиме электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. На этой стадии плазма остывает, не подвергаясь внешнему воздействию со стороны СВЧ-излучения, то есть ее поведение регулируется свойствами самоорганизации. Поэтому можно ожидать, что на этой стадии профили давления электронной компоненты плазмы будут каноническими. Поскольку время установления канонических профилей существенно меньше энергетического времени жизни плазмы, то после выключения ЭЦР-нагрева, теряя энергию, плазма проходит через последовательность самосогласованных состояний с минимальными (для каждого энергосодержания) потерями энергии P_{loss} . Таким образом, в стеллараторе Л-2М после выключения ЭЦР-нагрева имеется возможность исследовать свойства плазмы в самосогласованном состоянии в условиях с наилучшим удержанием энергии.

Данная работа посвящена исследованию суммарных потерь энергии из плазмы на стадии ее релаксации после выключения ЭЦР-нагрева. В разд. 2 дано описание проведенных эксперимен-

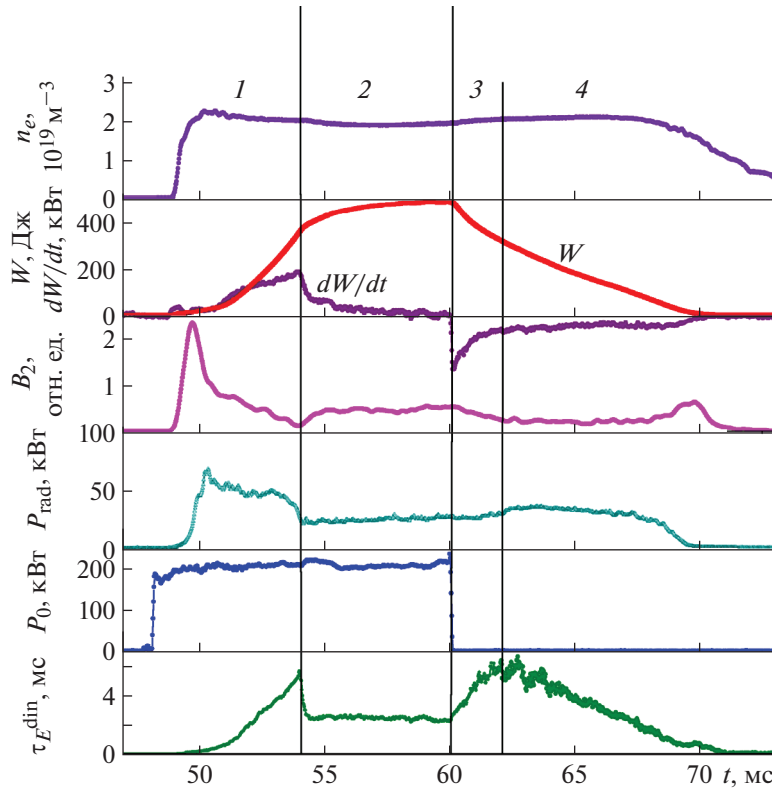


Рис. 1. Эволюция во времени основных параметров плазмы в импульсе #20464. Сверху вниз: средняя по центральной хорде плотность плазмы $n_e(t)$, энергосодержание плазмы $W(t)$ и его производная $dW(t)/dt$, интенсивность свечения линии иона бора (ВII) $I_{\text{ВII}}(t)$, мощность радиационных потерь $P_{\text{rad}}(t)$, СВЧ-мощность ЭЦР-нагрева $P_{\text{ECRH}}(t)$ и динамическое время жизни энергии $\tau_E(t)$. Фазы удержания плазмы показаны цифрами (1–4).

тов, обсуждаются свойства плазмы на стадии ее релаксации, и для этой же стадии получены экспериментальные зависимости общей мощности потерь из плазмы от энергосодержания при различных значениях плотности. В разд. 3 с использованием этих зависимостей получен скейлинг для энергетического времени жизни плазмы для стелларатора Л-2М на стадии релаксации, когда плазма находится в самосогласованном состоянии. В разд. 4 сформулированы основные выводы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились на стеллараторе Л-2М. Это классический двухзаходный стелларатор (заходность винтовой обмотки $l = 2$, число периодов поля при обходе тора $N = 7$) с большим радиусом тора $R = 1$ м, радиусом плазмы $a = 0.115$ м, и магнитным полем $B_0 = 1.34$ Т вблизи центра плазменного шнура [10]. В экспериментах по ЭЦР-нагреву для создания и нагрева плазмы использовалось импульсное СВЧ-излучение, создаваемое гиротронным комплексом МИГ-3 [11]. Омический нагрев не использовался. ЭЦР-нагрев осуществлялся на второй гармонике гирочастоты для электронов плазмы (частота СВЧ- излу-

чения 75 ГГц). В качестве рабочего газа для создания плазмы в экспериментах использовался водород.

Для примера рассмотрим эволюцию основных параметров плазмы в импульсе #20464 в режиме ЭЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М (рис. 1). На рисунке показаны (сверху вниз) временные зависимости средней по центральной хорде плотности плазмы $n_e(t)$, энергосодержания $W(t)$ и его производной $dW(t)/dt$, интенсивности свечения линии иона бора (ВII) $I_{\text{ВII}}(t)$, мощности радиационных потерь $P_{\text{rad}}(t)$, СВЧ-мощности ЭЦР-нагрева $P_{\text{ECRH}}(t)$ и динамического времени жизни энергии плазмы $\tau_E(t)$, которое определялось как отношение энергосодержания плазмы к полной мощности тепловых потерь $P_{\text{loss}}(t)$ в каждый момент времени

$$\tau_E(t) = W(t)/P_{\text{loss}}(t). \quad (1)$$

При этом мощность потерь определялась из глобального уравнения баланса энергии с использованием экспериментальных данных рис. 1

$$dW/dt = P_{\text{ECRH}}(t) - P_{\text{loss}}(t). \quad (2)$$

В описываемых экспериментах СВЧ-мощность ЭЦР-нагрева и средняя по хорде плотность плазмы составляли $P_{ECRH} = 200$ кВт и $n_e = 2.4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, соответственно. Из рис. 1 видно, что в течение СВЧ-импульса нагрева удержание плазмы проходит четыре фазы (фазы отмечены на рисунке цифрами, а моменты переходов между фазами – вертикальными линиями). В каждой из фаз свойства удержания плазмы различны. Они подробно описаны в работе [12].

Для дальнейшего анализа мы также будем использовать зависимость мощности суммарных энергетических потерь плазмы P_{loss} от ее энергосодержания W . Эта зависимость для импульса #20464 показана на рис. 2. Мощность потерь P_{loss} вычислялась из уравнения баланса энергии (2). На рис. 2 различными цветами выделены участки зависимости $P_{loss}(W)$, соответствующие упомянутым выше четырем фазам удержания плазмы. Цифры на рис. 1 и 2 соответствуют друг другу. Направление стрелок соответствует ходу времени в течение СВЧ-нагрева и удержания плазмы в стеллараторе.

Данная статья посвящена особенностям удержания плазмы в фазе релаксации плазмы после выключения импульса ЭЦР-нагрева, то есть в фазе 3 (рис. 1). После выключения СВЧ-импульса нагрева мощность потерь скачком уменьшается на (15–20)% (рис. 2). Подобное скачкообразное уменьшение потока тепла из плазмы наблюдается на многих тороидальных магнитных установках, на которых используется ЭЦР-нагрев [13–15]. На стеллараторе LHD обнаружено экспериментальное подтверждение того, что такой скачок связан с резким снижением уровня турбулентности плазмы в момент выключения ЭЦР-нагрева [16]. Далее в фазе 3 происходит падение энергосодержания плазмы при неизменной средней плотности и постоянной мощности радиационных потерь (рис. 1). Подчеркнем, что основным свойством плазмы в фазе 3 является то, что ее поведение регулируется процессами “самоорганизации”, поскольку плазма в это время не подвергается внешнему воздействию. Поэтому профили давления плазмы в каждый момент времени в фазе 3 будут стремиться к каноническим, а мощность суммарных потерь плазмы будет минимальной при каждом конкретном энергосодержании.

Из рис. 2 можно получить выражение, аппроксимирующее зависимость полной мощности потерь P_{loss} от энергосодержания плазмы W для фазы 3. Аппроксимация экспериментальных данных для фазы 3 (сплошная зеленая линия) выглядит следующим образом:

$$P_{loss}(W) = P_0(W/W_0)^\alpha, \quad (3)$$

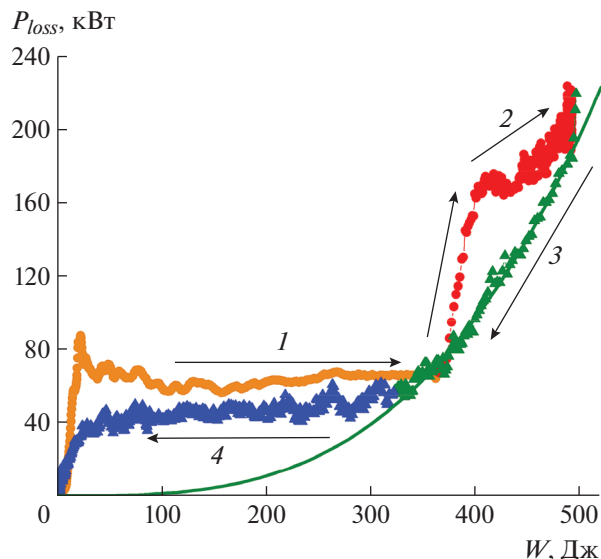


Рис. 2. Зависимость мощности суммарных потерь энергии плазмы P_{loss} от ее энергосодержания в импульсе #20464. Фазы удержания плазмы показаны цифрами (1–4) в соответствии с рис. 1. Направление стрелок соответствует ходу времени в импульсе. Сплошная зеленая линия – это аппроксимация степенной функцией экспериментальных данных для фазы 3.

где $\alpha \cong 3.1$, а P_0 и W_0 – численные коэффициенты. Использовалась степенная аппроксимация экспериментальных данных мощности потерь, поскольку при подстановке формулы (3) в уравнение баланса энергии (2), получается линейная временная зависимость “мгновенного” энергетического времени жизни плазмы. Это согласуется с тем, что в стеллараторе Л-2М наблюдается именно линейный рост мгновенного энергетического времени жизни в течение фазы 3 удержания плазмы (рис. 1, нижний график). Отметим, что полученная экспериментально зависимость $P_{loss}(W)$ для фазы 3 является фундаментальной для стелларатора Л-2М, поскольку она характеризует удержание плазмы с помощью магнитной системы данной установки.

Зависимости энергетических потерь плазмы от энергосодержания $P_{loss}(W)$ для третьей фазы были измерены в нескольких импульсах установки при различных значениях плотности плазмы в диапазоне $n_e = (1.05–2.75) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Эти зависимости показаны на рис. 3. На основании этих данных была получена зависимость минимальной мощности потерь от плотности плазмы

$$P_{loss}(n_e) = P_0(n_e/n_0)^{-\beta}, \quad (4)$$

где $\beta \cong 2.2$.

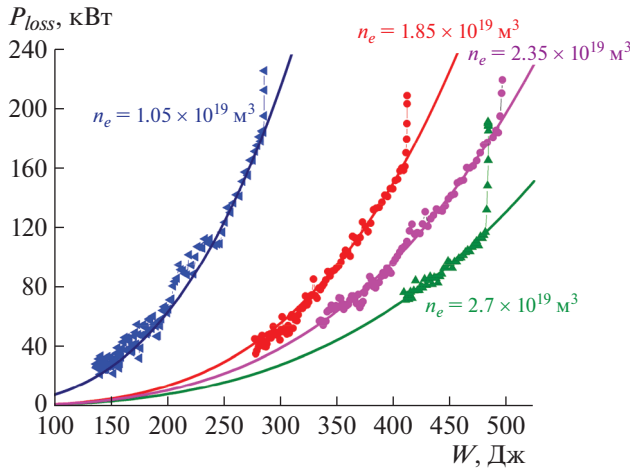


Рис. 3. Зависимости $P_{loss}(W)$ для фазы 3, измеренные в импульсах с различной плотностью плазмы.

Объединяя формулы (3) и (4), можно написать общую формулу зависимости минимальной (для каждого значения энергосодержания плазмы W) мощности потерь P_{loss} от плотности плазмы и ее энергосодержания в фазе 3 удержания плазмы в стеллараторе Л-2М

$$P_{loss}(W, n_e) = P_0 (W/W_0)^\alpha (n_e/n_0)^{-\beta}, \quad (5)$$

где $\alpha \cong 3.1$, $\beta \cong 2.2$.

Подчеркнем еще раз, что в фазе 3 удержание энергии плазмы определяется процессами самоогласования, поэтому в формуле (5) $P_{loss}(W, n_e)$ — это минимальная мощность потерь для каждого значения энергосодержания плазмы. Дело в том, что для любого энергосодержания могут существовать состояния плазмы с различными радиальными профилями температуры $T_e(r)$ и плотности $n_e(r)$ плазменного шнура и, соответственно, с различными профилями давления электронной компоненты плазмы $p(r) = n_e(r)T_e(r)$. В этих состояниях мощность потерь будет больше, чем минимальная мощность потерь, определяемая формулой (3). И только в одном состоянии, характеризующем каноническим профилем давления плазмы, мощность потерь будет равна минимальной мощности $P_{loss}(W, n_e)$, вычисляемой по формуле (3). Например, на рис. 2 видно, что на квазистационарной стадии разряда (фаза 2) мощность потерь при любом энергосодержании выше, чем в фазе 3.

Таким образом, мы видим, что в фазе 3 потоки тепла из плазмы определяются глобальными параметрами: энергосодержанием плазмы и ее плотностью.

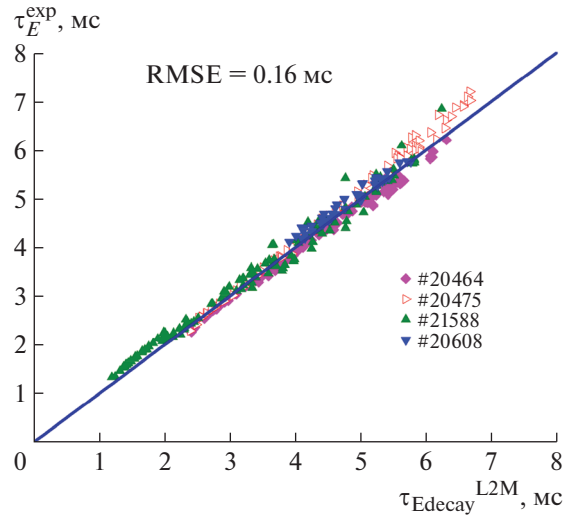


Рис. 4. Зависимость экспериментального энергетического времени жизни плазмы для фазы 3 от энергетического времени жизни, рассчитанного по скейлингу для фазы 3 для стелларатора Л-2М.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя найденную зависимость $P_{loss}(W, n_e)$, легко перейти к зависимости энергетического времени жизни τ_E от параметров плазмы. По определению,

$$\tau_E = W/P_{loss} \quad (6)$$

Проведя несложные преобразования, можно на основании найденной зависимости $P_{loss}(W, n_e)$ получить следующую зависимость динамического времени жизни энергии плазмы в фазе 3 для стелларатора Л-2М:

$$\tau_{Edecay}^{L-2M} = \tau_{E0} (W/W_0)^{1/\alpha-1} (n_e/n_0)^{\beta/\alpha}. \quad (7)$$

Основываясь на экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, были получены коэффициенты, входящие в эту зависимость. Тогда скейлинг для стелларатора Л-2М в фазе 3 принимает следующий вид:

$$\tau_{Edecay}^{L-2M} = 2.47 \times 10^{-3} n_e^{0.715} P_{loss}^{-0.675}, \quad (8)$$

где τ_E измеряется в секундах, n_e — в единицах 10^{20} м^{-3} , а мощность потерь P_{loss} — в МВт. На рис. 4 по вертикальной оси отложено динамическое энергетическое время жизни τ_E^{exp} в фазе 3, рассчитанное для экспериментальных точек, представленных на рис. 3, а по горизонтальной — время жизни энергии, определенное по формуле (8) для тех же плотностей. Рисунок 4 показывает, что экспериментальные значения энергетического времени жизни для фазы 3 хорошо соответствуют скейлингу (8). Для приведенных данных среднеквадратичная ошибка составляет $\text{RMSE} \approx 0.16$ мс.

Сравним эту зависимость с одномашинным скейлингом стелларатора Л-2М для стационарной стадии разряда (фаза 2), полученным в работе [17], основываясь на представительной базе данных

$$\tau_E^{L-2M} = 2.32 \times 10^{-3} n_e^{0.714} P^{-0.695}, \quad (9)$$

где τ_E измеряется в секундах, n_e – в единицах 10^{20} м^{-3} , а мощность ЭЦР-нагрева P – в МВт.

Сравнивая эти две зависимости динамического времени жизни энергии от параметров эксперимента, можно видеть, что они очень близки, и это не является случайным совпадением. Скейлинг (8) построен для фазы 3. Он является результатом действия процессов самоорганизации плазмы в условиях удержания плазмы, определяемых магнитной системой стелларатора Л-2М. Он определяет наилучшие возможные условия удержания плазмы в стеллараторе Л-2М и является “верхней границей” для скейлинга (9), полученного для квазистационарной фазы. На квазистационарной фазе удержания плазмы к минимальным потерям P_{loss} добавляются еще потери, обусловленные небольшим отклонением профиля давления от канонического профиля. Условия удержания несколько ухудшаются, но не сильно, что и подтверждается сходством скейлингов (8) и (9).

4. ВЫВОДЫ

Проанализированы свойства удержания плазмы в стеллараторе Л-2М непосредственно после выключения СВЧ-импульса ЭЦР-нагрева (фаза 3). В этой фазе плазма не подвергается внешнему воздействию импульса нагрева. При этом динамика тепловых потерь определяется процессами самоорганизации плазмы. В результате в плазме устанавливаются канонические профили давления, обеспечивающие минимальные потери энергии плазмы. Поскольку время установления канонических профилей существенно меньше энергетического времени жизни плазмы, то после выключения ЭЦР-нагрева, теряя энергию, плазма проходит через последовательность самосогласованных состояний, характеризующихся каноническими профилями давления и потерями P_{loss} , наименьшими для каждого значения энергосодержания.

На стадии после выключения импульса ЭЦР-нагрева получены экспериментальные зависимости полной мощности потерь из плазмы P_{loss} от энергосодержания при различных значениях плотности плазмы. Показано, что эти зависимости имеют степенной характер, что дополнительно подтверждается линейным ростом мгновенного энергетического времени жизни в фазе 3. Полученная экспериментально степенная

зависимость величины энергетических потерь плазмы $P_{loss}(W, n_e) = P_0(W/W_0)^3(n_e/n_0)^{-2.2}$ для фазы 3 описывает свойства самосогласованного состояния плазмы в стеллараторе Л-2М и характеризует удержание плазмы с помощью магнитной системы данной установки.

С использованием этих зависимостей получен скейлинг для энергетического времени жизни для стелларатора Л-2М в фазе 3, когда плазма находится в самосогласованном состоянии. Показано, что этот скейлинг весьма близок к скейлингу для стелларатора Л-2М на квазистационарной стадии разряда. Это является следствием того, что скейлинг для фазы 3 определяет наилучшие возможные условия удержания плазмы в стеллараторе Л-2М и является “верхней границей” для скейлинга, полученного для квазистационарной стадии разряда.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме “Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях” (0024-2019-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Razumova K.A., Andreev V.F., Eliseev L.G., Kislov A.Ya., La Haye R.J., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Notkin G.E., Pavlov Yu. D., and Kantor M. Yu. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 083024. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/8/083024>
2. Днестровский Ю.Н. Самоорганизация горячей плазмы. М.: НИЦ “Курчатовский институт”, 2013.
3. Fredrickson E.D., McGuire K.M., Goldston R.J., Bell M.G., Grek B., Johnson D.W., Morris A.W., Stauffer F.J., Taylor G., and Zarnstorff M.C. // Nucl. Fusion. 1987. V. 27. P. 1897. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/27/11/012>
4. Mikkelsen D.R., Shirai H., Urano H., Takizuka T., Katada Y., Hatae T., Koide Y., Asakura N., Fujita T., Fukuda T., Ide S., Isayama A., Kawano Y., Naito O., and Sakamoto Y. // Nucl. Fusion. 2003. V. 43. P. 30. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/43/1/304>
5. Melnikov A.V., Eliseev L.G., Pastor I., Herranz J., Hidalgo C., Fujisawa A., Minami T., Razumova K.A., Dnestrovskij Yu.N., Lysenko S.E., and Harris J.H. // Proc. 34th EPS Conf. Plasma Physics, Warsaw. 2007. ECA 31F, P-2.060.
6. Dnestrovskij Yu.N., Melnikov A.V. and Pustovitov V.D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2009. V. 51. 015010. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/1/015010>
7. Днестровский Ю.Н., Днестровский А.Ю., Лысенко С.Е., Черкасов С.В., Уолш М.Дж. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 3. Dnestrovskij Yu.N., Dnestrovskij A.Yu., Lysenko S.E., Cherkasov S.V., and Walsh M.J. // Plasma Phys. Rep. 2004. V. 30. 1. <https://doi.org/10.1134/1.1641971>

8. Ryter F., Dux R., Mantica P., and Tala T. // Plasma Phys. Control. Fusion **52**, 124043 (2010). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/12/124043>
9. Garbet X., Mantica P., Ryter F., Cordey G., Imbeaux F., Sozzi C., Manini A., Asp E., Parail V., Wolf R., and the JET EFDA Contributors // Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 1351
10. Мещеряков А.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Воронов Г.С., Гладков Г.А., Гребенчиков 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. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 496. Meshcheryakov A.I., Akulins D.K., Batanov G.M., Berezhetzkii M.S., Voronov G.S., Gladkov G.A., Grebenshchikov S.E., Grinchuk V.A., Grishina T.A., Kolik L.V., Larionova N.F., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Petrov A.E., Pshenichnikov A.A. et al. // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31, 452. <https://doi.org/10.1134/1.1947330>
11. Батанов Г.М., Белоусов В.И., Бондарь Ю.Ф., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Гребенчиков С.Е., Иванов И.А., Колик Л. В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Матвеев Н.В., Мещеряков А.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 79.
12. Meshcheryakov A.I., Grishina I.A., and Karyaka V.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. 1094, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012009>
13. Ida K., Shi Z., Sun H.J., Inagaki S., Kamiya K., Rice J.E., Tamura N., Diamond P.H., Dif-Pradalier G., Zou X.L., Itoh K., Sugita S., Gürcan O.D., Estrada T., Hidalgo C., et al. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 013022 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/1/013022>
14. Kobayashi T., Ida K., Inagaki S., Tsuchiya H., Tamura N., Choe G.N., Yun G.S., Park H.K., Ko W.H., Evans T.E., Austin M.E., Shafer M.W., Ono M., López-bruna D., Ochando M.A. et al. // Nucl. Fusion. 2017.V. 57. 076013. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6f1f>
15. Inagaki S., Itoh S.-I., Itoh K., Ida K., López-Bruna D., Ochando M.A., Estrada T., van Milligen B.Ph., Hidalgo C., Kasuya N., and TJ-II Team // Plasma Fusion Res. 2014. V. 9. 1202052.
16. Itoh K., Itoh S.-I., Ida K., Inagaki S., Kamada Y., Kamiya K., Dong J.Q., Hidalgo C., Evans T., Ko W.H., Park H., Tokuzawa T., Kubo S., Kobayashi T., Kosuga Y., et al. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 102021. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa796a>
17. 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., Гребенчиков С.Е., Коврижных Л.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малых Н.И. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 880–890. <https://doi.org/10.1134/S1063780X07100029>