

УДК 533.9

Транспортный переход в плазме стелларатора Л-2М: роль коротковолновой турбулентности

Г. М. Батанов, В. Д. Борзосеков, Д. Г. Васильков, И. Ю. Вафин, С. Е. Гребенщиков,
Е. М. Кончечков, А. А. Летунов, А. И. Мещеряков, К. А. Сарксян, М. А. Терещенко,
Н. К. Харчев, Ю. В. Хольнов

На стеллараторе Л-2М при повышении удельной мощности нецентрального электронно-циклотронного нагрева плазмы до 3 МВт/м³ обнаружен спонтанный транспортный переход с ростом энергии плазмы на ~14 % при четырехкратном скачкообразном понижении энергии коротковолновой турбулентности ($k_{\perp} = 30 \text{ см}^{-1}$).

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Hc

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, стелларатор, турбулентность, транспортный переход, электронно-циклотронный резонансный нагрев.

Введение

Образование внутреннего транспортного барьера в плазме токамаков происходит в локальной области вблизи магнитных поверхностей с рациональным значением угла вращательного преобразования $\iota = 1$ (см., например, [1]) и приводит к подавлению турбулентных флуктуаций плотности. При этом речь идет о наблюдении подавления флуктуаций среднего масштаба $k_{\perp} \rho_s = 1$ (k_{\perp} — модуль поперечного волнового вектора флуктуаций плотности, ρ_s — ларморовский радиус ионов, опделенный по температуре электронов) [2].

Спонтанный транспортный переход с образованием транспортного барьера наблюдался ранее и в плазме стеллараторов [3—7]. При этом в области барьера регистрировалось усиление радиального электрического поля, возникновение шира вращения плазмы и подавление флуктуаций среднего масштаба. Однако до сих пор не регистрировалось подавление коротковолновой турбулентности. Между тем, именно с развитием коротковолновой турбулентности в ряде работ (например, [8—10]) связывают аномальный перенос тепла.

Целью данной статьи является изложение результатов экспериментов на стеллараторе Л-2М по повышению удельной мощности электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева до 3 МВт/м³, что позволило наблюдать спонтанный транспортный переход во время нецентрального ЭЦ-нагрева, которому предшествует и который сопровождает четырехкратное понижение энергии коротковолновой турбулентности ($k_{\perp} \rho_s = 6$).

Экспериментальная установка

Двухзаходный стелларатор Л-2М имеет большой средний радиус тора $R_0 = 100$ см, средний радиус граничной магнитной поверхности $a_0 = 11,5$ см, угол вращательного преобразования на магнитной оси $\iota(0) = 0,17$ и на крайней магнитной поверхности $\iota(a_0) = 0,8$. ЭЦ-нагрев плазмы осуществлялся двумя гиротронами с частотой 75 ГГц на второй гармонике гирочастоты электронов [11]. Суммарная мощность нагрева составляла 0,8 МВт. Ввод микроволновых пучков осуществлялся через горизонтальные патрубки в двух соседних сечениях тороидальной камеры. При нецентральном нагреве область циклотронного резонанса была смещена на 3 см от центра вакуумной камеры к

Батанов Герман Михайлович, главный научный сотрудник¹.
Борзосеков Валентин Дмитриевич, мл. научный сотрудник¹.
Васильков Дмитрий Григорьевич, научный сотрудник^{1,2}.
Вафин Ильядар Юсупович, младший научный сотрудник¹.
Гребенщиков Станислав Евгеньевич, зав. лабораторией¹.
Кончечков Евгений Михайлович, мл. научный сотрудник^{1,3}.
Летунов Александр Алексеевич, ст. научный сотрудник¹.
Мещеряков Алексей Иванович, зав. лабораторией¹.
Сарксян Карен Агасевич, ведущий научный сотрудник¹.
Терещенко Максим Алексеевич, старший научный сотрудник¹.
Харчев Николай Константинович, ст. научный сотрудник¹.
Хольнов Юрий Викторович, ст. научный сотрудник¹.

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

Тел. +7 (499) 135-80-39, +7 (926) 148-27-57.

E-mail: eukmek@gmail.com, konchekov@fpl.gpi.ru

²Московский государственный технический университет

им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

³Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова.

Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, д. 1.

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2015 г.

© Батанов Г. М., Борзосеков В. Д., Васильков Д. Г.,
Вафин И. Ю., Гребенщиков С. Е., Кончечков Е. М., Летунов А. А.,
Мещеряков А. И., Сарксян К. А., Терещенко М. А., Харчев Н. К.,
Хольнов Ю. В., 2015

внутренней стенке тора. Длительность ЭЦ-нагрева составляла 10—12 мс. Плотность плазмы измерялась микроволновым интерферометром с длиной волны 2 мм и составляла $\sim 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Температура электронов, измеренная по излучению на второй гармонике гирочастоты электронов, а также с помощью полупроводниковых детекторов мягкого рентгеновского излучения с бериллиевыми фильтрами, составляла $\sim 0,7 \text{ кэВ}$ в области ЭЦ-нагрева. Энергия плазмы измерялась с помощью диамагнитной диагностики.

Коротковолновые флуктуации плотности $k_{\perp} = 30 \text{ см}^{-1}$ измерялись с помощью обратного рассеяния излучения одного из гиротронов. Длинноволновые флуктуации плотности ($k_{\perp} = 1 \text{ см}^{-1}$) измерялись методом малоуглового рассеяния того же гиротрона [12]. Взаимодействие плазмы со стенкой контролировалось по интенсивности излучения линии водорода H_{α} и бора ВП.

Результаты экспериментов

Транспортный переход обнаруживается по всплеску производной диамагнитного сигнала (рис. 1). Всплески производной диамагнитного сигнала возникают при включении и выключении ЭЦ-нагрева, когда происходит изменение энергии плазменного шнура W_{pl} (рис. 2). При включении микроволнового импульса на его переднем фронте происходит пробой газа, рост плотности плазмы и температуры заряженных частиц. При достижении баланса между поглощаемой микроволновой мощностью и мощностью потерь тепла, сигнал отклика близок к нулю. Таким образом, транспортный переход, т. е. изменение в балансе поглощенной мощности и мощности потерь, регистрируется как всплеск на производной диамагнитного сигнала. Именно такой результат и представлен на рис. 1, а именно, первый положительный всплеск с максимумом на 52-й мс — это рост энергии при образовании и нагреве плазменного шнура, отрицательный всплеск на 60-й мс — это прекращение ЭЦ-нагрева при выключении микроволнового излучения, соответственно положительный всплеск с максимумом на 55,2 мс — это регистрация роста нагрева из-за уменьшения потерь тепла и выход системы на новое квазистационарное состояние. Длительность этого перехода, как видно из рис. 2, составляет 2 мс. На сигнале электронно-циклотронного излучения с частотой 76 ГГц этому времени соответствует рост интенсивности, т. е. температуры электронов (см. рис. 3). Одновременно с ростом температуры электронов после 55-й мс регистрируется и возрастание интенсивности мягкого рентгеновского излучения в центральной области плазменного шнура ($r/a \leq 0,5$).

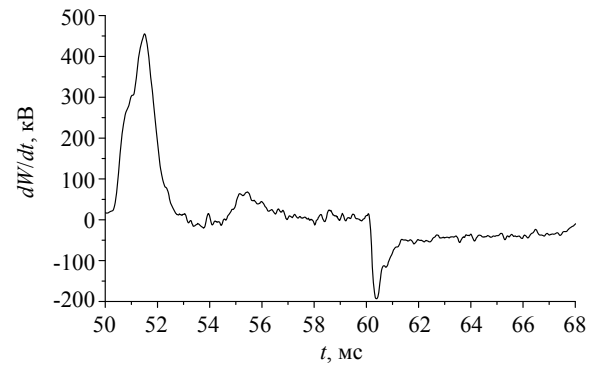


Рис. 1. Сигнал диамагнитного отклика

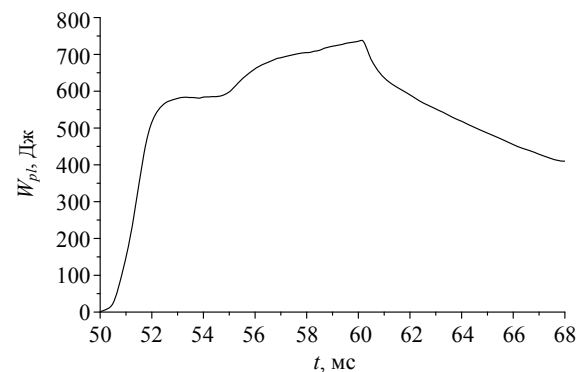


Рис. 2. Энергия плазмы W_{pl} , восстановленная по сигналу диамагнитного отклика

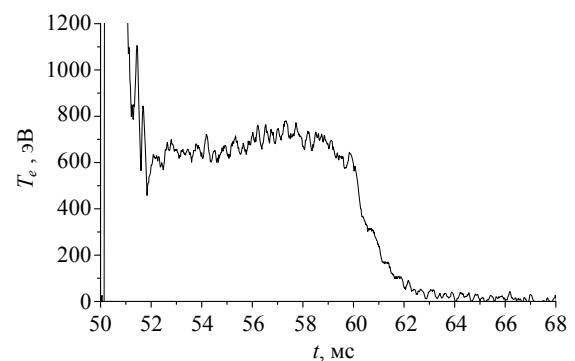


Рис. 3. Температура электронов T_e , восстановленная по электронно-циклотронному излучению на второй гармонике. Приведены результаты измерений температуры по 7 хордам

Уровень флуктуаций плотности определим как квадрат флуктуаций плотности, усредненный по 100 мкс (500 отсчетов) и по длине области рассеяния от точки входа микроволнового пучка в плазменный шнур до области гирорезонанса. На рис. 4 представлена временная эволюция уровня коротковолновых флуктуаций, а длинноволновых соответственно на рис. 5. Сопоставление кривых рис. 1 и 2, а также рис. 4 показывает, что интервалу 54,7—55 мс соответствует резкий (примерно четырехкратный) спад уровня коротковолновых флуктуаций, в то время как сигнал диамагнитного отклика достигает к 55-й мс только половины своей амплитуды. Рост энергии плазмы

продолжается еще около 2 мс, когда сохраняется пониженный уровень коротковолновой турбулентности. В это время уровень длинноволновых флуктуаций (рис. 5) сохраняется, как это видно из временного хода уровня длинноволновых флуктуаций, в интервале 53—56 мс. Таким образом, падение уровня коротковолновой турбулентности коррелирует по времени с повышением уровня энергии плазмы, и поэтому можно предположить, что причиной роста энергии плазмы является понижение уровня коротковолновой турбулентности.

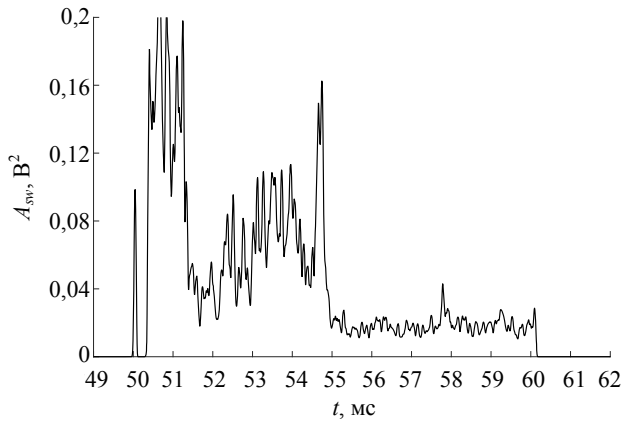


Рис. 4. Уровень коротковолновых флуктуаций A_{sw} плотности плазмы

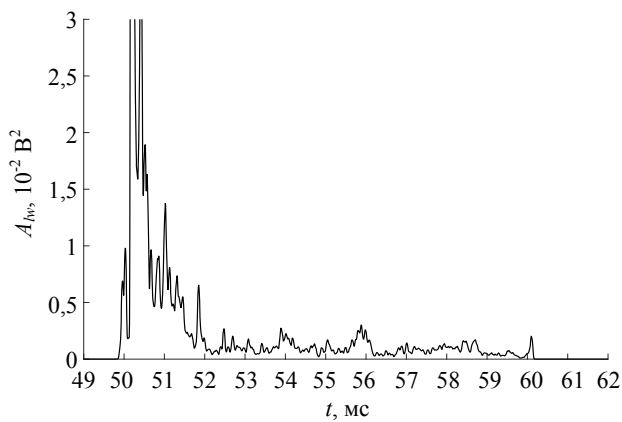


Рис. 5. Уровень длинноволновых флуктуаций A_{lw} плотности плазмы

Заключение

Изложенные выше результаты экспериментов позволяют сделать заключение о том, что в магнитной конфигурации стелларатора Л-2М при нецентральной ЭЦ-нагреве при удельной мощности 3 МВт/м^3 возникает спонтанный транспортный переход со скачкообразным понижением уровня коротковолновой турбулентности ($k_{\perp}\rho_s = 6$). При этом не происходит изменение уровня длинноволновой турбулентности ($k_{\perp}\rho_s = 0,2$).

С понижением уровня коротковолновой турбулентности наблюдается заметное ($\sim 14\%$) увеличение энергии плазмы.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-00589.

ЛИТЕРАТУРА

1. Razumova K. A., Andreev V. F., Borshchegovskii A. A., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, V. 45. P. 1247.
2. Shelukhin D. A., Vershkov V. A. and Razumova K. A. // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31. P. 985.
3. Fujisawa A., Iguchi H., Minami T., et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 88. No. 13. P. 2669.
4. Fujisawa A., Itoh K., Shimizu A., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2006. V. 48. No. 4. P. S205.
5. Estrada T., Happel T., Eliseev L., et al. // Plasma Phys. Control Fusion. 2009. V. 51. P. P124015.
6. Melnikov A., Krupnik L., Hidalgo C., et al. / 36-th EPS Conf. on Plasma Physics. Sofia. ECA. 2009. V33E. Rep. 4-186.
7. Estrada T., Hidalgo C., Happel T., et al. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. P. P032001.
8. Jenko F., Dorland W. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 225001.
9. Rodes T. L., Peebles W. A., Van Zeeland M. A., et al. // Physics of Plasmas. 2007. V. 14. P. 056117.
10. Батанов Г. М., Борзосеков В. Д., Коврижных Л. М. и др. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 511.
11. Batanov G. M., Bondar' Y. F., Borzosekov V. D., et al. // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39. No. 14. P. 1088.
12. Borzosekov V. D., Batanov G. M., Kharchev N. K., et al. / Proceedings of 9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications (Nizhny Novgorod – Perm – Nizhny Novgorod, July 24–30, 2014). P. 121.

Transport transition in L-2M stellarator plasmas: a role of the short-wavelength turbulence

*G. M. Batanov¹, V. D. Borzosekov¹, D. G. Vasilkov^{1,2}, I. Yu. Vaphin¹, S. E. Grebenshchikov¹,
E. M. Konchekov^{1,3}, A. A. Letunov¹, A. I. Meshcheryakov¹, K. A. Sarksyian¹, M. A. Tereshchenko¹,
N. K. Kharchev¹, and Yu. V. Kholnov¹*

¹ Prokhorov General Physics Institute, RAS
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: eukmek@gmail.com, konchekov@fpl.gpi.ru

² Bauman Moscow State Technical University
Bld 1, 5 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia

³ N. I. Pirogov Russian National Research Medical University
1 Ostrovutyaynov str., Moscow, 117997, Russia

Received November 9, 2015

A spontaneous transport transition has been obtained in L-2M stellarator at electron-cyclotron heating of plasma up the 3 MW/m³ level. The energy increase was on ~14 % in the time of fourfold energy drop for short-wave turbulence ($k_{\perp} = 30 \text{ cm}^{-1}$).

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Hc

Keywords: high-temperature plasma, stellarator, turbulence, transport transition, electron-cyclotron heating.

REFERENCES

1. K. A. Razumova, V. F. Andreev, A. A. Borshchegovskii, et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* **45**, 1247 (2003).
2. D. A. Shelukhin, V. A. Vershkov, and K. A. Razumova, *Plasma Phys. Rep.* **31**, 985 (2005).
3. A. Fujisawa, H. Iguchi, T. Minami, et al., *Phys.Rev.Lett.* **88** (13), 2669 (1999).
4. A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** (4), S205 (2006).
5. T. Estrada, T. Happel, L. Eliseev, et al., *Plasma Phys. Control Fusion* **51**, P124015 (2009).
6. A. Melnikov, L. Krupnik, C. Hidalgo, et al., in *Proc. 36-th EPS Conf. on Plasma Physics* (Sofia. ECA, V33E, 2009). Rep. 4-186.
7. T. Estrada, C. Hidalgo, T. Happel, et al., *Nucl. Fusion*, **51**, P032001 (2011).
8. F. Jenko and W. Dorland, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 225001 (2002).
9. T. L. Rodes, W. A. Peebles, M. A. Van Zeeland, et al., *Physics of Plasmas* **14**, 056117 (2007).
10. G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, L.M. Kovrizhnykh, et al., *Plasma Physics Reports* **39**, 511 (2013).
11. G. M. Batanov, Y. F. Bondar', V. D. Borzosekov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **39**, 1088 (2013).
12. V. D. Borzosekov, G. M. Batanov, N. K. Kharchev, et al., in *Proc. 9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications* (Nizhny Novgorod – Perm – Nizhny Novgorod, July 24–30, 2014). P. 121.

* * *