

УДК 533.9

PACS: 52.55.Hc, 52.25.Xz, 52.70.Ds

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-29-35

EDN: OYWYAG



## Увеличение энергетического времени жизни плазмы в режиме профилированного импульса в стеллараторе Л-2М

Д. Г. Васильков, Н. К. Харчев

*Представлены результаты экспериментов на квазистационарном стеллараторе Л-2М в режиме электронно-циклотронного резонансного нагрева при помощи двух гиротронов. Получены результаты по увеличению энергетического времени жизни плазмы с помощью временной модуляции (профилирования) СВЧ-импульса. Первый гиротрон на фиксированной мощности служил для ионизации и первичного нагрева плазмы, второй обеспечивал стационарный разряд длительностью 10 мс. Продемонстрировано, что варьируя мощность второго гиротрона в диапазоне 50–200 кВт, есть возможность увеличить время жизни в 4 раза при снижении мощности второго гиротрона до 50 кВт. Работа представляет интерес как метод исследования горячей плазмы, удерживаемой в тороидальной магнитной системе стелларатора.*

*Ключевые слова:* высокотемпературная плазма, термоядерный синтез, энергетическое время жизни, стелларатор, электронно-циклотронный нагрев, гиротроны.

### Введение

В термоядерных экспериментах с горячей плазмой для достижения критерия Лоусона (условия зажигания и режима самоподдерживающейся термоядерной реакции) необходимо увеличение энергетического времени жизни  $\tau_E$ , то есть нужно стремиться к увеличению энергии плазмы  $W$  и относительного давления  $\beta$  при фиксированной или падающей мощности нагрева  $P$ . Особый интерес представляют стационарные системы с неиндукционным

нагревом плазмы, в частности, стеллараторы [1]. Электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев с помощью мощных (мегаваттных) СВЧ-импульсов является одним из основных методов дополнительного нагрева в токамаках и возможным основным методом создания и нагрева плазмы в ловушках стеллараторного типа [2].

Комбинация импульсов СВЧ на различных частотах может использоваться для реализации поглощения СВЧ в различных областях плазмы, в зависимости от распределения магнитного поля, что может приводить и к формированию транспортных барьеров [3]. Изменение мощности СВЧ-нагрева во времени позволяет проводить быстрые процессы включения дополнительного нагрева или его выключения, что требуется для изучения кратковременных переходных процессов в удерживаемой плазме [4].

Временная модуляция импульсов дополнительного (неиндукционного) СВЧ или ВЧ-нагрева применяется на многих магнитных ловушках с целью повышения электронной и ионной температур, управления профилем плотности и подавления плазменных неустойчивостей [5, 6]. Совмещенный ЭЦР-нагрев

---

**Васильков Дмитрий Григорьевич**<sup>1,2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н., доцент.

E-mail: lhdhd81@mail.ru

**Харчев Николай Константинович**<sup>1,3</sup>, в.н.с., к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.

<sup>3</sup> НИЦ «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 16.05.2023

Принята к публикации 22.05.2023

плазмы на разных СВЧ-частотах позволяет повышать электронную температуру при разных значениях магнитного поля, а также совмещать центральный и нецентральный способы нагрева плазменного шнура [4]. Также в системе с модуляцией ЭЦР-нагрева возможно реализовать скачкообразное изменение  $\tau_E$ . Использование для нагрева плазмы различных СВЧ-частот, а также нескольких СВЧ-импульсов, разнесенных во времени, расширяют возможности изучения свойств удерживаемой плазмы и идентификации процессов, определяющих накопление, удержание и диссипацию энергии в плазме.

В безиндукционных магнитных ловушках (в частности стеллараторах) первый СВЧ-импульс может служить для ионизации плазмы, а последующие для ее нагрева. Известны методы увеличения длительности разряда с помощью модуляционных или импульсно-периодических режимов ЭЦР-нагрева плазмы. С помощью регулируемого роста плотности в течение разряда можно добиться и роста плазменной энергии, хотя в этом случае, как правило, наблюдается падение электронной температуры. Подобные режимы были получены на квазистационарном стеллараторе Л-2М.

Цель исследований состояла в получении максимально возможных значений энергетического времени жизни  $\tau_E$  при различных сценариях профилирования СВЧ-импульса, а также при варьировании мощности нагрева  $P$  и плотности плазмы  $n_e$ .

### Экспериментальная установка

Установка Л-2М (ИОФ РАН, Москва) – классический стелларатор с большим широм магнитного поля и плоской геометрической осью. Основные параметры установки следующие: полное число периодов винтового поля  $N = 14$ , заходность  $l = 2$ , большой радиус геометрической оси тора  $R_0 = 1$  м, относительный радиус магнитной поверхности, являющейся также изобарой,  $x = a/a_p$ , где  $a$  – средний радиус магнитной поверхности,  $a_p$  – средний радиус сепаратрисы, равный 0,115 м, максимальное магнитное поле на оси  $B_0 = 1,34$  Т, это же значение является резонансным для ЭЦР-нагрева. Подробнее об установке см. [7]. Создание и нагрев плазмы осуществляется с

помощью СВЧ-излучения в диапазоне мощностей  $P = 0,1–1$  МВт методом электронно-циклотронного резонанса на 2-й гармонике гирочастоты. В работе использовались два гиротрона (изготовитель ГИКОМ/ИПФ РАН) триодного типа с рекуперацией энергии. Мощность первого гиротрона с фиксированной частотой 75,3 ГГц достигает 0,8 МВт, мощность второго гиротрона достигает 0,7 МВт при частоте излучения 74,8 ГГц. 99 % излучаемой СВЧ-мощности выводится в виде гауссовской моды [8].

Эксперименты, описанные здесь, проводились при  $\langle\beta\rangle \leq 0,25$  %, где  $\langle\beta\rangle$  есть отношение газокINETического давления плазмы к магнитному давлению, усредненное по объему плазменного шнура. Неиндукционные токи (бутстреп и ток увлечения), генерируемые в режиме ЭЦР-нагрева, достигают суммарной амплитуды около 3 кА и не влияют на устойчивость плазмы [9].

Диагностический комплекс установки позволяет определять глобальные и радиальные параметры плазмы ( $W$ ,  $T_e(a)$ ,  $n_e(a)$ ), а также флуктуирующие значения электрического поля и плотности с помощью зондовых диагностик, рефлектометрии и рассеяния гиротронного излучения на флуктуациях плотности.

### Результаты эксперимента и обсуждение

При стандартных плазменных разрядах в стеллараторе Л-2М используются прямоугольные СВЧ-импульсы длительностью до 15 мс. Они позволяют получить стационарную стадию плазмы в стеллараторе длительностью 10 мс [10]. Ранее также проводились эксперименты с двумя гиротронами, при этом варьировались времена их включения и выключения и, соответственно, область временного пересечения импульсов [11, 12]. Также с помощью одного гиротрона был получен импульсно-периодический режим нагрева, дававший кратковременные импульсы СВЧ и паузы между ними контролируемой длительности [13]. Нужно отметить, что энергия плазмы, достигаемая в импульсах, соответствует транспортной модели, основанной на неоклассическом переносе с учетом аномальной добавки за счет турбулентности плазмы [14].

В то же время кратковременные импульсы приводят к ионизации и первичному нагреву плазмы, не обеспечивая стационарную стадию. На рис. 1 (а, в, д) представлены параметры разряда с импульсом СВЧ длительностью 5,5 мс и мощностью  $P = 490$  кВт, действие которого не приводит к стационарной стадии. Однако если после первого мощного СВЧ-импульса включается протяженный импульс даже меньшей мощности, удается получить разряд, сходный со стандартными

(рис. 1 (б, г, е)). В данном случае мощность каждого из гиротронов составляла около 200 кВт. Электронная температура, определенная по интенсивности циклотронного излучения из точек с различным значением магнитного поля  $B$  и резонансных частот, имеет параболическое распределение по сечению плазменного шнура (рис. 2), и сохраняет форму в течение стационарной стадии разряда, смещаясь за счет изменения магнитной индукции  $B$  во времени.

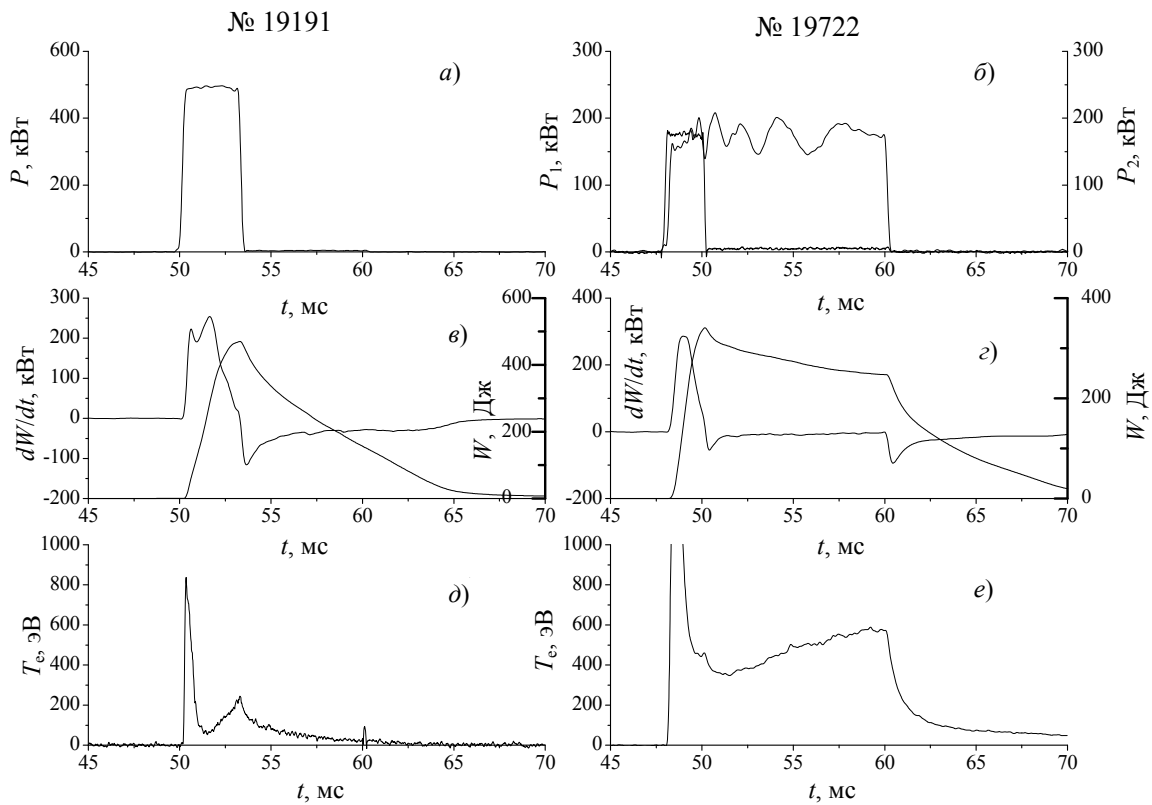


Рис. 1. Осциллограммы разрядов при кратковременном СВЧ-импульсе без поддержания № 19191 (а, в, д) и с поддержанием № 19722 (б, г, е). а, б – мощность СВЧ-нагрева  $P$ ; в, г – сигнал диамагнитной диагностики  $dW/dt$  и энергосодержание плазмы  $W$ ; д, е – электронная температура в центре плазменного шнура  $T_e$

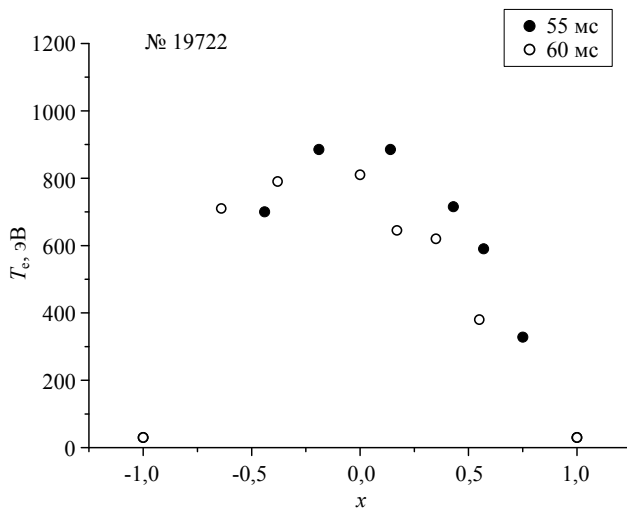


Рис. 2. Профиль электронной температуры  $T_e$  в течение стационарной стадии разряда № 19722 (моменты времени разряда 55 мс и 60 мс)

В следующей серии экспериментов модуляция СВЧ-излучения гиротрона проводилась следующим образом. Одновременно включались оба гиротрона, СВЧ-излучение которых создавало плазму и производило ее первоначальный нагрев. Далее первый гиротрон выключался, и стационарный разряд обеспечивался импульсным излучением второго гиротрона, СВЧ-мощность которого варьировалась, постепенно уменьшаясь от разряда к разряду. Поддержание разряда СВЧ-излучением второго гиротрона при фиксированной мощности в эксперименте удавалось до момента времени начала уменьшения продольного магнитного поля  $B$  и существенного пространственного сдвига точки резонанса.

Оказалось, что поддержание разряда при постоянной запасенной в плазме энергии полностью обеспечивается вторым гиротроном, причем значение и динамику энергии плазмы

можно было менять за счет управления плотностью  $n_e$  путем изменения времени открытия и закрытия клапанов напуска водорода. Рост плотности плазмы  $n_e$ , несмотря на уменьшение электронной температуры, ведет к динамическому росту энергии, что позволяет получать увеличенные значения  $\tau_E$ .

На рис. 3 представлены осциллограммы параметров разрядов при одинаковых первых СВЧ-импульсах, создающих плазму, и разных греющих плазму СВЧ-импульсах при мощности  $P = 75$  кВт (слева) и  $P = 50$  кВт (справа). Видно, что значения и временной ход плотности плазмы в двух различных по мощности импульсах практически совпадают, а энергия в случае меньшего значения мощности поддерживающего гиротрона немного меньше, – соответственно 420 и 380 Дж, однако значение энергетического времени жизни плазмы во втором импульсе заметно выше.

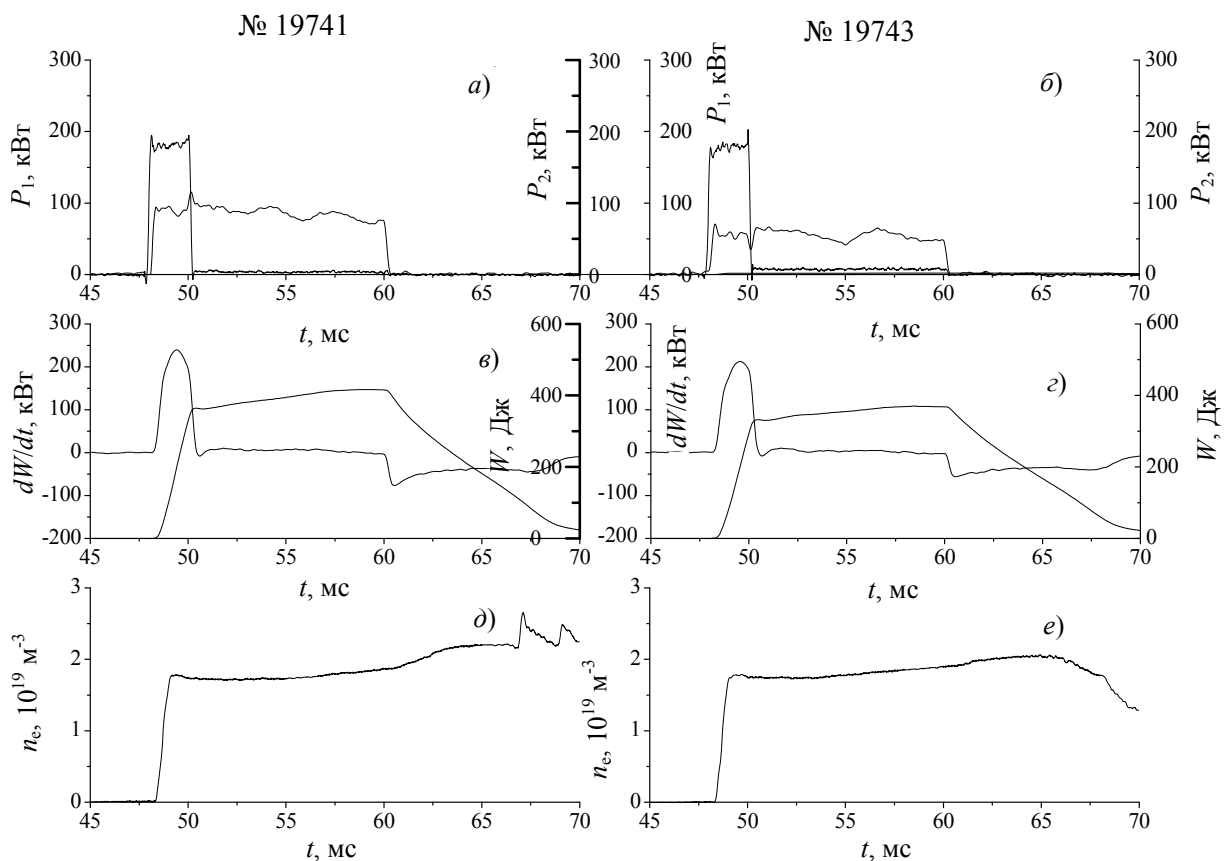


Рис. 3. Осциллограммы разрядов при мощностях поддерживающего импульса 75 кВт № 19741 (а, в, д) и 50 кВт № 19743 (б, г, е). а, б – мощности СВЧ-нагрева  $P_1$  и  $P_2$ ; в, г – сигнал диамагнитной диагностики  $dW/dt$  и энергосодержание плазмы  $W$ ; д, е – средняя электронная плотность  $n_e$

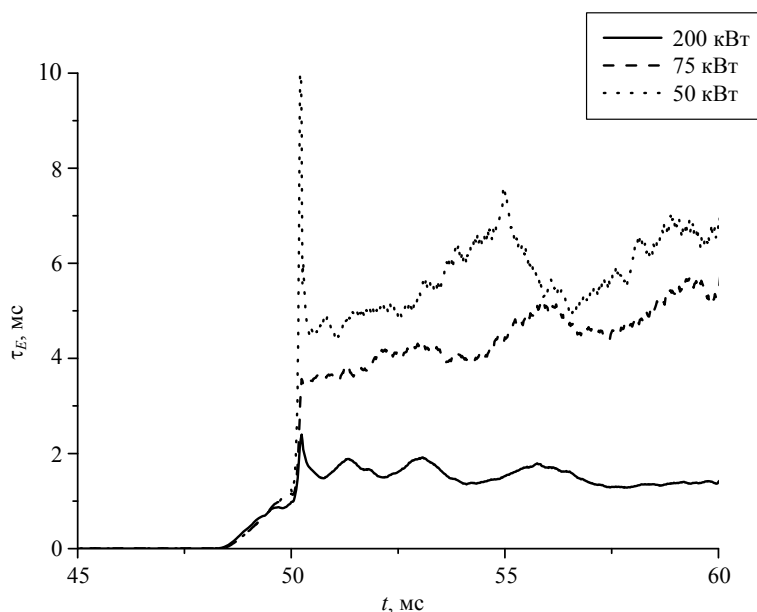
Энергетическое время жизни  $\tau_E$  определяется как

$$\tau_E = \frac{W}{P - dW/dt},$$

где  $W$  – запасенная в плазме энергия;  $\frac{dW}{dt}$  – изменение энергии плазмы во времени;  $P$  – мощность СВЧ-нагрева во втором импульсе.

Причем на стационарной стадии разряда  $dW/dt = 0$  и соответственно  $\tau_E = W/P$ , где  $P$  – суммарная мощность нагрева в заданный момент времени.

На рис. 4 представлена эволюция  $\tau_E$  для импульсов с мощностью поддерживающего гиротрона 200, 75 и 50 кВт; мощность первого СВЧ-импульса гиротрона во всех случаях была равна 200 кВт. Видно, что  $\tau_E$  имеет соответственно средние значения 1,5, 4 и 6 мс, увеличиваясь при уменьшении мощности в 4 раза. Рост или падение  $\tau_E$  в течение разряда определяется эволюцией плотности и энергии плазмы. Достигнутое в динамике значение  $\tau_E = 7$  мс является рекордным для стелларатора Л-2М.



**Рис. 4.** Эволюция энергетического времени жизни  $\tau_E$  для мощностей первого СВЧ-импульса мощностью 200 кВт, и поддерживающих разряд СВЧ-импульсов гиротрона 75 и 50 кВт

### Заключение

В работе представлены эксперименты по увеличению энергетического времени жизни плазмы в стеллараторе Л-2М (безиндукционной магнитной ловушке) с помощью профилирования греющих СВЧ-импульсов. Первый гиротрон при фиксированной мощности служит для ионизации и первичного нагрева плазмы, второй обеспечивает стационарный разряд длительностью 10 мс. Продемонстрировано, что варьируя мощность второго гиротрона в диапазоне 200–50 кВт, есть возможность увеличить время жизни до 4 раз при снижении мощности второго гиротрона до 50 кВт. Достигнутое в данном режиме значение энергетического времени жизни  $\tau_E = 7$  мс является рекордным для установки Л-2М. Работа представляет интерес для исследования как метод варьирования параметров термоядерной плазмы.

Авторы благодарны В. Д. Борзосекову и И. Ю. Вафину за калибровку диагностик и коллективу стелларатора Л-2М за участие в экспериментах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lyon J. F. / Plasma Physics and Controlled Fusion. 1990. Vol. 32. P. 1041.
2. Wolf R. C., Bozhenkov S., Dinklage A., Fuchert G., Kazakov Y. O., Laqua H. P., Marsen S., Marushchenko N. B., Stange T., Zanini M., Abramovic I., Alonso A., Baldzuhn J., Beurskens M., Beidler C. D., Braune H., Brunner K. J., Chaudhary N., Damm H., Drewelow P., Gantenbein G., Gao Yu., Geiger J., Hirsch M., Höfel U., Jakubowski M., Jelonnek J., Jensen T., Kasperek W., Knauer J., Korsholm S. B., Langenberg A., Lechte C., Leipold F., Trimino Mora H., Neuner U., Nielsen S. K., Moseev D., Oosterbeek H., Pablant N., Pasch E., Plaum B., Sunn Pedersen T., Puig Sitjes A., Rahbarnia K., Rasmussen J., Salewski M., Schilling J., Scott E.,

Stejner M., Thomsen H., Thumm M., Turkin Y., Wilde F., the Wendelstein 7-X Team / Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. Vol. 61. P. 014037.

3. Hillesheim J. C., DeBoo J. C., Peebles W. A., Carter T. A., Wang G., Rhodes T. L., Schmitz L., McKee G. R., Yan Z.; Staebler G. M., Burrell K. H., Doyle E. J., Holland C., Petty C. C., Smith S. P., White A. E., Zeng L. / Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 056115.

4. Yoshimura Y., Kasahara H., Tokitani M., Sakamoto R., Ueda Y., Ito S., Okada K., Kubo S., Shimozuma T., Igami H., Takahashi H., Tsujimura T. I., Makino R., Kobayashi S., Mizuno Y., Akiyama T., Ashikawa N., Masuzaki S., Motojima G., Shoji M., Suzuki C., Tanaka H., Tanaka K., Tokuzawa T., Tsuchiya H., Yamada I., Goto Y., Yamada H., Mutoh T., Komori A., Takeiri Y., LHD Experiment Group / Nucl. Fusion. 2016. Vol. 56. P. 046005.

5. Eguilior S., Castejón F., Luna E. de la., Capra A., Likin K., Fernández A., TJ-II Team / Plasma Physics and Controlled Fusion. 2003. Vol. 45. P. 105.

6. Milligen B. Ph. van, Estrada T., Garcia L., Lopez Bruna D., Carreras B. A., Xu Y., Ochando M., Hidalgo C., Reynolds-Barredo J. M., Lopez Fraguas A., TJ-II Team / Nuclear Fusion. 2016. Vol. 56. P. 016013.

7. 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., Khol'nov 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., Sarksyant K. A., Sbitnikova I. S. / Nucl. Fusion. 1997. Vol. 37. P. 233.

8. Kharchev N. K., Batanov G. M., Berezhetskii M. S., Borzosekov V. D., Fedyanin O. I., Grebenshchikov S. E., Grishina I. A., Khol'nov Yu. V., Kolik L. V., Konche-

kov E. M., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Malakhov D. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Pleshkov E. I., Sarksyant K. A., Shchepetov S. V., Skvortsova N. N., Ste-pakhin V. D., Vafin I. Yu., Vasilkov D. G., Voronov G. S. / Plasma and Fusion Research. 2011. Vol. 6. P. 2402142.

9. Гребенищиков С. Е., Васильков Д. Г., Иванов В. А., Сарксян К. А., Терещенко М. А., Харчев Н. К. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 4. С. 310–324.

10. Федянин О. И., Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережеецкий М. С., Васильков Д. Г., Вафин И. Ю., Воронов Г. С., Воронова Е. В., Гладков Г. А., Гребенищиков С. Е., Коврижных Л. М., Ларионова Н. Ф., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Малых Н. И., Мецереяков А. И., Нечаев Ю. И., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Щенетов С. В., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В. / Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 880–890.

11. Batanov G. M., Borzosekov V. D., Gorshenin A. K., Kharchev N. K., Korolev V. Yu., Sarksyant K. A. / Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. Vol. 61. P. 075006.

12. Батанов Г. М., Бережеецкий М. С., Борзосеков В. Д., Васильков Д. Г., Вафин И. Ю., Гребенищиков С. Е., Гришина И. А., Коллик Л. В., Кончечков Е. М., Ларионова Н. Ф., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Малахов Д. В., Мецереяков А. И., Петров А. Е., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Степахин В. Д., Харчев Н. К., Харчевский А. А., Хольнов Ю. В., Щенетов С. В. / Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 8. С. 666–672.

13. Васильков Д. Г., Батанов Г. М., Борзосеков В. Д., Вафин И. Ю., Гребенищиков С. Е., Гришина И. А., Иванов В. А., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Мецереяков А. И., Петрова М. Н., Степахин В. Д., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В. / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 3. С. 79–89.

14. Коврижных Л. М. / Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 579–588.

PACS: 52.55.Hc, 52.25. Xz, 52.70.Ds

## Energy lifetime increase of the plasma in the regime of pulse maintaining in the L-2M stellarator

*D. G. Vasilkov<sup>1,2</sup> and N. K. Kharchev<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: lhdhd81@mail.ru

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University  
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

<sup>3</sup> National Research Centre Kurchatov Institute  
1 Akademika Kurchatov Sq., Moscow, 123182, Russia

Received 27.04.2023; revised 16.05.2023; accepted 22.05.2023

**Results of experiments on a quasi-stationary L-2M stellarator in the regime of electron-cyclotron resonance heating using two gyrotrons are presented. The results on increasing the energy lifetime of the plasma using time modulation of microwave pulses are obtained.**

***The first gyrotron at a fixed power served for ionization and primary heating of the plasma, the second provided a stationary discharge with a duration of 10 ms. It is demonstrated that by varying the power of the second gyrotron in the range of 50–200 kW, it is possible to increase the lifetime by 4 times. The work is of interest for research as a method of varying the parameters of thermonuclear plasma.***

**Keywords:** high-temperature plasma, thermonuclear fusion, energy lifetime, stellarator, electron-cyclotron heating, gyrotrons.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-29-35

## REFERENCES

1. Lyon J. F., *Plasma Physics and Controlled Fusion* **32**, 1041 (1990).
2. Wolf R. C., Bozhenkov S., Dinklage A., Fuchert G., Kazakov Y. O., Laqua H. P., Marsen S., Marushchenko N. B., Stange T., Zanini M., Abramovic I., Alonso A., Baldzuhn J., Beurskens M., Beidler C. D., Braune H., Brunner K. J., Chaudhary N., Damm H., Drewelow P., Gantenbein G., Gao Yu., Geiger J., Hirsch M., Höfel U., Jakubowski M., Jelonnek J., Jensen T., Kasperek W., Knauer J., Korsholm S. B., Langenberg A., Lechte C., Leipold F., Trimino Mora H., Neuner U., Nielsen S. K., Moseev D., Oosterbeek H., Pablant N., Pasch E., Plaum B., Sunn Pedersen T., Puig Sitjes A., Rahbarnia K., Rasmussen J., Salewski M., Schilling J., Scott E., Stejner M., Thomsen H., Thumm M., Turkin Y., Wilde F. and the Wendelstein 7-X Team, *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 014037 (2019).
3. Hillesheim J. C., DeBoo J. C., Peebles W. A., Carter T. A., Wang G., Rhodes T. L., Schmitz L., McKee G. R., Yan Z., Staebler G. M., Burrell K. H., Doyle E. J., Holland C., Petty C. C., Smith S. P., White A. E. and Zeng L., *Physics of Plasmas* **20**, 056115 (2013).
4. Yoshimura Y., Kasahara H., Tokitani M., Sakamoto R., Ueda Y., Ito S., Okada K., Kubo S., Shimosuma T., Igami H., Takahashi H., Tsujimura T. I., Makino R., Kobayashi S., Mizuno Y., Akiyama T., Ashikawa N., Masuzaki S., Motojima G., Shoji M., Suzuki C., Tanaka H., Tanaka K., Tokuzawa T., Tsuchiya H., Yamada I., Goto Y., Yamada H., Mutoh T., Komori A., Takeiri Y. and the LHD Experiment Group, *Nucl. Fusion* **56**, 046005 (2016).
5. Eguilior S., Castejón F., Luna E. de la, Cappa A., Likin K., Fernández A. and TJ-II Team, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **45**, 105 (2003).
6. Milligen B. Ph. van, Estrada T., Garcia L., Lopez Bruna D., Carreras B. A., Xu Y., Ochando M., Hidalgo C., Reynolds-Barredo J. M., Lopez Fraguas A. and the TJ-II Team, *Nuclear Fusion* **56**, 016013 (2016).
7. 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., Grebenschikov 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. and Sbitnikova I. S., *Nucl. Fusion* **37**, 233 (1997).
8. Kharchev N. K., Batanov G. M., Berezhetskii M. S., Borzosekov V. D., Fedyanin O. I., Grebenschikov S. E., Grishina I. A., Khol'nov Yu. V., Kolik L. V., Konchekov E. M., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Malakhov D. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Pleshkov E. I., Sarksyian K. A., Shchepetov S. V., Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Vafin I. Yu., Vasil'kov D. G. and Voronov G. S., *Plasma and Fusion Research* **6**, 2402142 (2011).
9. Grebenschikov S. E., Vasil'kov D. G., Ivanov V. A., Sarksyian K. A., Tereshchenko M. A. and Kharchev N. K., *Plasma Phys. Rep.* **48**, 183–192 (2022).
10. Fedyanin O. I., Akulina D. K., Batanov G. M., Berezhetskii M. S., Vasil'kov D. G., Vafin I. Yu., Voronov G. S., Voronova E. V., Gladkov G. A., Grebenschikov S. E., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Logvinenko V. P., Malykh N. I., Meshcheryakov A. I., Nechaev Yu. I., Sarksyian K. A., Skvortsova N. N., Shchepetov S. V., Kharchev N. K. and Khol'nov Yu. V., *Plasma Phys. Rep.* **33** (10), 805–815 (2007).
11. Batanov G. M., Borzosekov V. D., Gorshenin A. K., Kharchev N. K., Korolev V. Yu. and Sarksyian K. A., *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 075006 (2019).
12. Batanov G. M., Berezhetskii M. S., Borzosekov V. D., Vasil'kov D. G., Vafin I. Yu., Grebenschikov S. E., Grishina I. A., Kolik L. V., Konchekov E. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Logvinenko V. P., Malakhov D. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Sarksyian K. A., Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Kharchev N. K., Kharchevskii A. A., Kholnov Yu. V. and Shchepetov S. V., *Plasma Physics Reports* **43** (8), 818–823 (2017).
13. Vasil'kov D. G., Batanov G. M., Borzosekov V. D., Vafin I. Yu., Grebenschikov S. E., Grishina I. A., Ivanov V. A., Letunov A. A., Logvinenko V. P., Meshcheryakov A. I., Petrova M. N., Stepakhin V. D., Kharchev N. K. and Kholnov Yu. V., *Problems of Atomic Science and Technology, ser. Thermonuclear Fusion* **43** (3), 79–89 (2020) [in Russian].
14. Kovrizhnykh L. M., *Plasma Physics Reports.* **34** (7), 529–537 (2008).