

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 533.9.07

СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА МИФИСТ

© 2019 г. В. А. Курнаев¹, В. Е. Николаева^{1,*}, Г. М. Воробьев¹, Ю. М. Гаспарян¹,
Д. П. Иванов^{1,2}, С. А. Крат^{1,2}, А. В. Мельников^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

² Национальный исследовательский центр “Курчатowski институт”, Москва, 123098, Россия

*e-mail: venikolaeva@mephi.ru

Поступила в редакцию 03.08.2019 г.

После доработки 25.09.2019 г.

Принята к публикации 01.10.2019 г.

В институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ ведется разработка и создание компактного сферического токамака МИФИСТ для учебно-демонстрационных и исследовательских целей. Основными задачами являются подготовка кадров в области управляемого термоядерного синтеза для российских установок (Т-15МД, Т11-М и других) и международного реактора ИТЭР, а также решение инновационных задач в области термоядерных технологий. Важной особенностью проекта является максимально возможная цифровизация установки с тем, чтобы обеспечить по возможности, удаленный доступ для студентов других университетов, специализирующихся в области термоядерных технологий с магнитным удержанием плазмы. Данная установка при успешной реализации проекта создания надежно действующего токамака будет использоваться и для решения ряда актуальных научно-технологических задач: ускоренной отработки технологий работы с литием, исследования удержания плазмы в сферическом токамаке, развития высокочастотных (ВЧ) технологий (СВЧ-предыонизации и поддержания тока с помощью ВЧ-волн) и отработки методов *in situ* анализа взаимодействия плазмы с поверхностью. На данный момент осуществлено проектирование учебно-демонстрационного и исследовательского токамака МИФИСТ, разработаны концепции систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы, начато изготовление вакуумной камеры и элементов электромагнитной системы.

Ключевые слова: термоядерный синтез, магнитное удержание плазмы, токамак, плазма

DOI: 10.1134/S2304487X19060087

ВВЕДЕНИЕ

Участие РФ в создании международного термоядерного реактора ИТЭР предполагает не только выполнение нашей страной взятых на себя обязательств по поставкам, но и подготовку высококвалифицированных кадров, а также проведение исследований, помогающих оптимизировать и улучшить показатели эффективности экспериментов для токамака-реактора ИТЭР в качестве инструмента для доказательства реализуемости и экономической целесообразности развития управляемого термоядерного синтеза в установках с магнитным удержанием.

Сферическая конфигурация токамака рассматривается как одна из наиболее перспективных для осуществления реакции ядерного синтеза в источнике быстрых нейтронов. По сравнению с традиционными токамаками сферический токамак характеризуется меньшим аспектным отношением (отношением большого радиуса к малому) и возможностью получить высокое давление плазмы при относительно небольшой ве-

личине тороидального магнитного поля, что определяет экономическую эффективность работы реактора [1–6]. Кроме того, из-за большего отношения давления плазмы к давлению магнитного поля, а также высокой треугольности и вытянутости плазмы, плазма в сферическом токамаке устойчивее к воздействию магнитогидродинамических неустойчивостей, а значит, стабильнее [7]. Механизм устойчивого удержания плазмы является одним из самых важных вопросов на пути к эффективной реакции термоядерного синтеза. Для лучшего понимания механизма удержания плазмы и предсказания параметров плазмы для прототипов термоядерных реакторов, таких как ITER и DEMO, используются скейлинги, полученные на основе экспериментальных данных существующих токамаков [8]. Результаты экспериментов на небольшом сферическом токамаке необходимы для дополнения и уточнения существующих скейлингов, учитывающих в основном данные традиционных токамаков.

К настоящему времени технологии УТС на базе токамаков, в том числе и сферических, широко развиваются во всем мире. Однако ряд проблем, таких как проблема первой стенки и стационарное поддержание тока, еще ждут своего технологического решения. Использование обращенных к плазме элементов на основе жидкого лития в термоядерных установках имеет много преимуществ, таких как возобновляемая поверхность, возможность контроля содержания изотопов водорода в установке за счет рециркуляции лития, уменьшение примесей в плазме за счет геттерирующих свойств лития [9–14]. Однако в силу низкой температуры испарения лития и высокой химической активности по отношению к водороду, необходима разработка методов эффективного сбора лития, испаренного с рабочих поверхностей, и минимизации накопления водорода. В термоядерных установках с жидколитиевыми элементами проблема сбора лития из газовой фазы является одной из ключевых для реализации замкнутого цикла лития, необходимого для создания установок со стационарным или квазистационарным режимом работы. Существенным вопросом является позиционирование коллектора, основанное на максимизации эффективности сбора лития. Это требует подробного изучения транспорта лития в пристеночной плазме в токамаках с диверторной конфигурацией. Такие экспериментальные работы в мире на данный момент находятся только в стадии планирования. Влияние использования лития на рециклинг водорода в термоядерных установках (водородный обмен плазмы и стенки) — один из наиважнейших вопросов в его применении как материала обращенных к плазме элементов [14]. При этом экспериментальная база по влиянию лития на накопление изотопов водорода в обращенных к плазме элементах недостаточна для полного понимания процесса [15, 16].

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА МИФИСТ

В институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ ведется разработка и создание компактного сферического токамака МИФИСТ для учебно-демонстрационных и исследовательских целей. Основными задачами являются подготовка кадров в области управляемого термоядерного синтеза для российских установок (Т-15МД, Т11-М и других) и международного реактора ИТЭР, а также решение инновационных задач в области термоядерных технологий. Это предполагает полностью “открытый” характер проекта с привлечением всех заинтересованных научных и учебных организаций. Важной особенностью проекта является максимально возможная цифровизация установки с тем, чтобы обеспечить, по возможности,

удаленный доступ для студентов других университетов, специализирующихся в области термоядерных технологий с магнитным удержанием плазмы.

Кроме того, данная установка при успешной реализации проекта создания надежно действующего токамака будет использоваться и для решения ряда актуальных научно-технологических задач: ускоренной отработки технологий работы с литием, исследования удержания плазмы в сферическом токамаке, развития высокочастотных (ВЧ) технологий (СВЧ-предионизации и поддержания тока с помощью ВЧ-волн) и отработки методов *in situ* анализа взаимодействия плазмы с поверхностью.

На данный момент осуществлено проектирование учебно-демонстрационного и исследовательского токамака МИФИСТ, разработаны концепции систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы, начато изготовление вакуумной камеры и элементов электромагнитной системы.

Основная концепция, заложенная в разработку данной установки — реализация максимального числа специфичных “токамачных” технологий получения, удержания и нагрева плазмы при минимальных затратах на сооружение и эксплуатацию. Кроме того, ее предназначение для учебно-демонстрационных целей предполагает применение простых, по возможности стандартных решений и удобство доступа к установке.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОКАМАКА МИФИСТ

Схематичное изображение первоначального варианта установки представлено на рис. 1.

Основные параметры установки: большой радиус $R = 25$ см; малый радиус $a = 13$ см; аспектное отношение $A = R/a = 1.9$; вытянутость камеры $k \sim 3$; тороидальное поле на оси $B_\phi \sim 0.5$ Тл; ток плазмы $I_{pl} \sim 100$ кА; длительность разряда $t \sim 10\text{--}30$ мс. В конструкцию токамака заложена возможность модернизации с увеличением поля в 4–5 раз (что соответствует рекордному значению для сферических токамаков) и тока в 2–3 раза.

Основные элементы электромагнитной системы, катушки тороидального поля, обеспечивающие магнитную изоляцию плазмы от стенок, расположенный в центре индуктор для создания и поддержания тока в плазме и система полоидальных витков, создающих необходимую конфигурацию плазменного шнура и его равновесие по большому радиусу и по вертикали, показаны на рис. 2.

Катушки тороидального поля спроектированы одновитковыми из тонкой листовой меди (с усилением на вертикальных участках), что позволяет им в момент импульса тока приобрести опти-

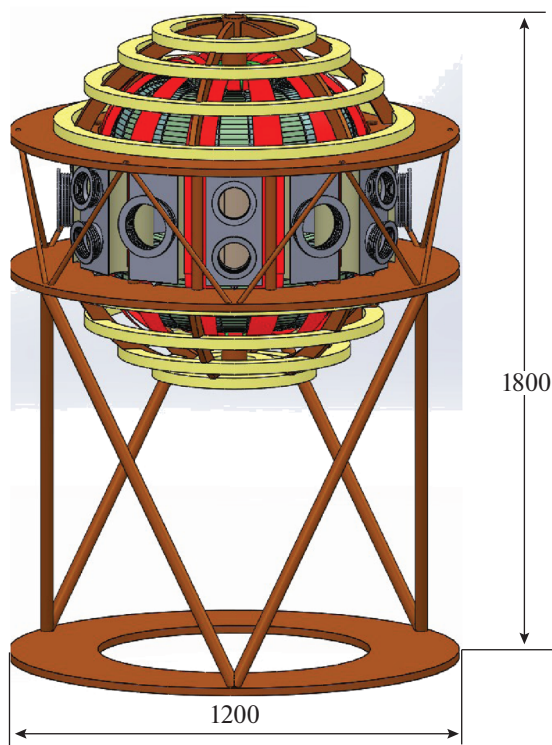


Рис. 1. Схематическое изображение сферического токамака МИФИСТ (размеры даны в мм).

мальную “безмоментную” форму. Для питания электромагнитной системы токамака предполагается использовать конденсаторные батареи: низковольтные для питания тороидального соленоида и полоидальных катушек и с напряжением до 3 кВ для создания тока до 40 кА в обмотке индуктора.

Предусмотрено только воздушное охлаждение, поэтому скважность работы токамака определится остыванием элементов ЭМС после импульса. Схемы питания тороидальной обмотки, обмотки индуктора и системы полоидальных катушек и соответствующие циклограммы токов в них приведены на рис. 3.

Системы контроля и управления установкой являются неотъемлемой частью проекта и должны обеспечивать контроль за состоянием разрядной камеры, элементов электромагнитной системы, степенью вакуума и состава остаточных газов в установке.

На установке предусматривается применение классических методов диагностики плазмы, применяемых в токамаках [17], таких как электромагнитные зонды (зонды Мирнова) для контроля за положением плазменного шнура, пояса Роговского для измерения токов, зонды Ленгмюра для определения плотности и температуры плазмы на ее периферии, а также оптические спектроскопи-

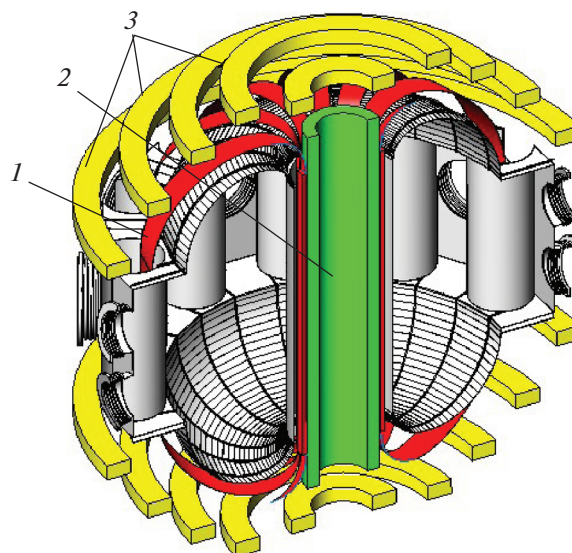


Рис. 2. Электромагнитная система токамака: 1 — катушки тороидального поля, 2 — индуктор, 3 — полоидальные катушки.

ческие методы, болометры для определения общих потерь энергии из плазмы, инфракрасная термометрия обращенных к плазме элементов, а в дальнейшем и методы, позволяющие измерять профили плотности и температуры в плазменном шнуре.

ПРОГРАММА РАБОТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА

Учебные задачи создаваемой установки были сформулированы выше и предполагают вовлечение в тематику УТС с магнитным удержанием студентов разных курсов, начиная с младших, а также постановку разнообразных лабораторных работ, НИРС, курсовых проектов и выпускных квалификационных работ не только по собственно физике плазмы, ее нагреву и удержанию, но и по другим необходимым технологиям (материаловедение, управление, компьютерное моделирование, разработка и верификация кодов, обработка больших массивов данных, автоматизация, проблемы надежности и работоспособности сложных электрофизических установок). Диагностики, которые должны быть реализованы на действующей установке, предполагают применение разнообразных датчиков излучений, лазеров, зондов, спектрометров и т.д. Вполне естественно и оправданно привлечение к созданию и работам на установке зарубежных коллег, в том числе профессоров-совместителей нашего университета, а также зарубежных студентов.

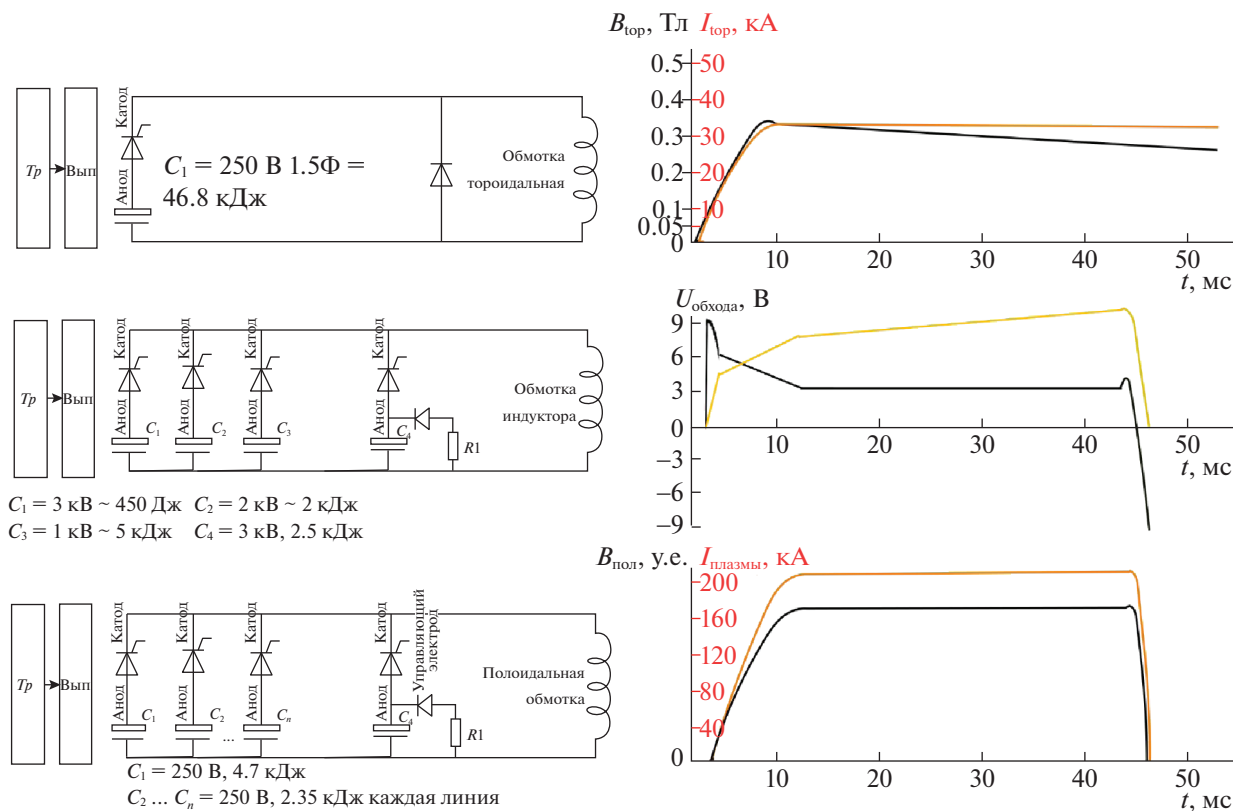


Рис. 3. Схемы питания и циклограммы токов в тороидальном соленоиде, индукторе и системе полоидальных обмоток.

Предварительная научная программа работ на установке включает проведение следующих исследований:

- исследование СВЧ-предыонизации и начальной фазы разряда (в интересах физической программы Т-15 МД);
- изучение физики взаимодействия плазмы с обращенными к ней материалами (углерод, вольфрам, литий) непосредственно в токамаке;
- отработка технологий применения жидких металлов (литий, олово, эвтектики) в токамаке с дивертором, реализация замкнутого цикла циркуляции металла в камере;
- проверка концепции режима с нулевым рециклингом водорода, предложенной Л.Е. Захаровым;
- отработка технологии применения программ восстановления равновесия плазменного шнура и формы плазмы по магнитным измерениям (EFIT);
- проверка перспективных концепций контроля и подавления неустойчивостей плазменного шнура вихревым магнитным полем;

- исследование динамики срыва разряда;
- отработка новых разработанных в МИФИ диагностик плазмы токамака;
- разработка сверхпроводящих элементов электромагнитной системы;
- отработка технологий создания стационарного плазменного разряда с помощью поддержания неиндукционного ВЧ-тока.

Естественно, данная программа будет уточняться и корректироваться в зависимости от достигнутых параметров установки и уровня финансирования.

В концепции данного сферического токамака заложена возможность широкого варьирования режимов и параметров плазмы. Наличие большого количества диагностических патрубков обеспечивает обширный объем регистрируемой информации и наглядность эксперимента. Малый размер токамака позволяет быстро осуществлять постановку новых экспериментов и определяет небольшое энергопотребление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке МИФИСТ предполагается осуществить не только запуск и демонстрацию удержания плазмы в токамаке, но и исследовать важные для более крупных установок, таких как, например, Т-15МД, вопросы начальной предыонизации плазмы, особенности взаимодействия плазмы с обращенными к плазме элементами (ОПЭ) при применении лития, исследования процессов в плазме при высоких плотностях тока, реализации ВЧ-нагрева плазмы и экспериментов по поддержанию тока с помощью ВЧ-мощности. Малые габариты установки с небольшим аспектным отношением ($A < 2$) и простота конструкции позволяют ускорить проведение экспериментов с изменением как параметров взаимодействия плазмы с ОПЭ, так и величины тороидального магнитного поля и особенно удобны для учебно-демонстрационных целей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheng E.T., Cerbone R.J., Garner J.K., Simnad M., Sviatoslavsky I.N., Wang X.R., Peng Y.K.M., Galambos J.D. Actinides transmutation with small tokamak fusion reactors. In: Proc. Intern. Conf. Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems. Versailles, France, 1995.
2. Qiu L.J., Wu Y.C., Xiao B.J., Xu Q., Huang Q.Y., Wu B., Chen Y.X., Xu W.N., Chen Y.P., and Liu X.P. A low aspect ratio tokamak transmutation system. *Nucl. Fusion*. 2000. V. 40. P. 629.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/40/3Y/325>
3. Wu Y.C., Qian J.P., Yu J.N. The fusion-driven hybrid system and its material selection. *J. of Nuclear Materials*. 2002. V. 307–311. P. 1629–1636.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01272-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01272-2)
4. Wesson J. and Campbell D. “Tokamaks”. Clarendon Press. 2004. P. 115.
5. Wu Y., Zheng S., Zhu X., Wang W., Wang H., Liu S., Bai Y., Chen M., Huang Q., Huang D. Zhang. S., Li J., Chu D., Jiang J., Song Y. Conceptual design of the fusion-driven subcritical system FDS-I. *Fusion Eng. Des.* 2006. V. 81. P. 1305–1311.
6. Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Buzhinskij O.I., Gladush G.G., Dokuka V.N. et al. Plasma-physical and electrophysical aspects of the compact stationary neutron source on the basis of tokamak. *Ibid.* 2005. V. 13. P. 167.
7. Sykes A. Overview of recent spherical tokamak results. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2001. V. 43. № 12A. P. 127.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/43/12A/309>
8. Zohm H., Angioni C., Fable E., Federici G., Gantenbein G., Hartmann T., Lackner K., Poli E., Porte L., Sauter O., Tardini G., Ward D., Wischmeier M. On the physics guidelines for a tokamak DEMO. *Nuclear Fusion*. 2013. V. 53. № 7. P. 073019.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/7/073019>
9. Popkov A.S., Krat S.A., Gasparyan Y.M., Pisarev A.A. Interaction of Li-D Films with Water Vapor. *Phys. Procedia*. 2015. V. 71. P. 88–92.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.319>
10. Popkov A.S., Krat S.A., Gasparyan Y.M., Vasina Y.A., Pisarev A.A. On the interaction of Li–D films with nitrogen and oxygen at room temperature. *J. Surf. Investig.* 2016. V. 10. P. 860–863.
<https://doi.org/10.1134/S1027451016040352>
11. Gasparyan Y.M., Popkov A.S., Krat S.A., Pisarev A.A., Vasina Y.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. Deuterium release from Li-D films exposed to atmospheric gases. *Fusion Eng. Des.* 2017. V. 117. P. 163–167.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.07.025>
12. Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V. Liquid-metal tokamak divertors. *J. Nucl. Mater.* 1992. V. 196–198. P. 45–49.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(06\)80010-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(06)80010-3)
13. Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Pankratov V.Yu., Krasin V.P. Numerical and experimental determination of metallic solubilities in liquid lithium, lithium-containing non-metallic impurities, lead and lead-lithium eutectic. *J. Nucl. Mater.* 1995. V. 224. P. 288–292.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(95)00076-3)
14. Zakharov L.E. On a burning plasma low recycling regime with P DT = 23–26 MW, Q DT = 5–7 in a JET-like tokamak. *Nuclear Fusion*. 2019. V. 59. № 9. P. 096008.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab246b>
15. Krat S.A., Gasparyan Y.M., Popkov A.S., Pisarev A.A. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge. *Vacuum*. 2014. V. 105. P. 111–114.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.01.006>
16. Mirnov S.V., Azizov E., Evtikhin V., Lazarev V., Lyublinski I.E., Vertkov A., Prokhorov D. Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2006. V. 48. P. 821–837.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/48/6/009>
17. Стрелков В.С., Лысенко С.Е. Основы техники термоядерного эксперимента, Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 188 с.

The Status of the Drafting of Mephist Tokamak

V. A. Kurnaev^a, V. E. Nikolaeva^{a, #}, G. M. Vorobyov^a, Yu. M. Gasparyan^a, D. P. Ivanov^{a, b}, S. A. Krat^{a, b},
and A. V. Melnikov^{a, b}

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123098 Russia

[#]e-mail: venikolaeva@mephi.ru

Received August 3, 2019; revised September 25, 2019; accepted October 1, 2019

Abstract—A compact spherical tokamak MEPhIST (MEPhI Spherical Tokamak) aimed at educational, demonstration and research purposes is under development at Institute of Laser and Plasma technologies (LaPlas) at NRNU MEPhI. The main purposes are training in the field of controlled thermonuclear fusion for Russian installations (T-15MD, T11-M and others) and the international ITER reactor, as well as solving innovative problems in the field of fusion technologies. An important feature of this project is the most possible digitalization of the installation in order to provide a remote access for students of other universities specializing in the field of fusion technologies with magnetic plasma confinement. With the successful implementation of the project to create a reliable tokamak, this installation will be used to solve a number of urgent scientific and technological problems: acceleration of lithium technologies development, studies of plasma confinement in a spherical tokamak, development of high-frequency (RF) technologies (microwave preionization and steady-state RF current drive) and to develop in situ methods for analyzing plasma-surface interaction. At this stage, the design of the educational, demonstration and research tokamak MEPhIST has been carried out, the concepts of diagnostic systems and additional heating of the plasma have been developed, the production of a vacuum chamber and elements of an electromagnetic system has been started.

Key words: fusion, magnetic plasma confinement, tokamak, plasma

DOI: 10.1134/S2304487X19060087

REFERENCES

- Cheng E.T., Cerbone R.J., Garner J.K., Simnad M., Sviatoslavsky I.N., Wang X.R., Peng Y.K.M., Galambos J.D. Actinides transmutation with small tokamak fusion reactors. In: *Proc. Intern. Conf. Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems*. Versailles, France, 1995.
- Qiu L.J., Wu Y.C., Xiao B.J., Xu Q., Huang Q.Y., Wu B., Chen Y.X., Xu W.N., Chen Y.P., and Liu X.P. A low aspect ratio tokamak transmutation system. *Nucl. Fusion*, 2000, vol. 40, p. 629.
- Wu Y.C., Qian J.P., Yu J.N. The fusion-driven hybrid system and its material selection. *J. of Nuclear Materials*, 2002, vol. 307–311, pp. 1629–1636.
- Wesson J. and Campbell D. "Tokamaks". *Clarendon Press*, 2004, p. 115.
- Wu.Y., Zheng S., Zhu X., Wang W., Wang H., Liu S., Bai Y., Chen M., Huang Q., Huang D. Zhang. S., Li J., Chu D., Jiang J., Song Y. Conceptual design of the fusion-driven subcritical system FDS-I. *Fusion Eng. Des.*, 2006, vol. 81, pp. 1305–1311.
- Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Buzhinskij O.I., Gladush G.G., Dokuka V.N. et al. Plasma-physical and electro-physical aspects of the compact stationary neutron source on the basis of tokamak. *Ibid.*, 2005, vol. 13, p. 167.
- Sykes A. Overview of recent spherical tokamak results. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2001, vol. 43, no. 12A, P. 127.
- Zohm H., Angioni C., Fable E., Federici G., Gantenbein G., Hartmann T., Lackner K., Poli E., Porte L., Sauter O., Tardini G., Ward D., Wischmeier M. On the physics guidelines for a tokamak DEMO. *Nuclear Fusion*, 2013, vol. 53, no. 7, p. 073019. doi: 10.1088/0029-5515/53/7/073019.
- Popkov A.S., Krat S.A., Gasparyan Y.M., Pisarev A.A. Interaction of Li-D Films with Water Vapor. *Phys. Procedia*, 2015, vol. 71, pp. 88–92. doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.319.
- Popkov A.S., Krat S.A., Gasparyan Y.M., Vasina Y.A., Pisarev A.A. On the interaction of Li–D films with nitrogen and oxygen at room temperature. *J. Surf. Investig.*, 2016, vol. 10, pp. 860–863. doi: 10.1134/S1027451016040352.
- Gasparyan Y.M., Popkov A.S., Krat S.A., Pisarev A.A., Vasina Y.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. Deuterium release from Li–D films exposed to atmospheric gases. *Fusion Eng. Des.*, 2017, vol. 117, pp. 163–167. doi: 10.1016/j.fusengdes.2016.07.025.

12. Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V., Liquid-metal tokamak divertors. *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 196–198, pp. 45–49.
doi: 10.1016/S0022-3115(06)80010-3.
13. Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Pankratov V.Yu., Krasin V.P., Numerical and experimental determination of metallic solubilities in liquid lithium, lithium-containing nonmetallic impurities, lead and lead-lithium eutectic. *J. Nucl. Mater.*, 1995, vol. 224, pp. 288–292.
doi: 10.1016/0022-3115(95)00076-3.
14. Zakharov L.E. On a burning plasma low recycling regime with $P_{DT} = 23\text{--}26$ MW, $Q_{DT} = 5\text{--}7$ in a JET-like tokamak. *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 59, no. 9, p. 096008.
doi: 10.1088/1741-4326/ab246b.
15. Krat S.A., Gasparyan Y.M., Popkov A.S., Pisarev A.A. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge. *Vacuum.*, 2014, vol. 105, pp. 111–114.
doi: 10.1016/j.vacuum.2014.01.006.
16. Mirnov S.V., Azizov E., Evtikhin V., Lazarev V., Lyublinski I.E., Vertkov A., Prokhorov D. Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48, pp. 821–837.
doi: 10.1088/0741-3335/48/6/009.
17. Strelkov V.S., Lysenko S.E. Osnovy tekhniki termoyadernogo eksperimenta. [Fundamentals of the fusion experiment technology], Moscow, NRNU MEPhI, 2015. 188 p.