

СРАВНЕНИЕ ТОКАМАКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Н.Г. Копалейшвили

nikitakopaleyshvili@gmail.com

Н.В. Батрак

nik.nikita02@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследован вопрос об актуальности разработки и эксплуатации токамаков нового поколения. Проведен сравнительный анализ будущих и нынешних концептов токамаков. В данной работе рассмотрены такие установки, как ИТЭР (международный термоядерный экспериментальный реактор), ДЕМО (демонстрационный термоядерный реактор), ТРТ (токамак с реакторными технологиями), Т-15МД, Т-15. Показана принцип работы управляемого термоядерного синтеза на основе реакции дейтерия и трития, а также отмечено преимущество данной реакции по сравнению с другими возможными. Изучены характеристики устройств, сроки их строительства и условия проведения работ. Рассмотрены миссии и задачи современных проектов. На основании исследованных данных сделан вывод о целесообразности разработки токамаков нового поколения.

Ключевые слова

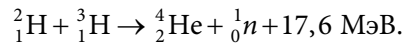
Токамак с реакторными технологиями, международный экспериментальный термоядерный реактор, управляемый термоядерный синтез, демонстрационные термоядерные электростанции, ИТЭР, ДЕМО, ТРТ, Т-15МД, Росатом, ТРИНИТИ

Поступила в редакцию 25.08.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Задача извлечения энергии из термоядерного синтеза является одной из важнейших вопросов за последние несколько десятилетий. После идеи создания искусственного солнца в середине прошлого столетия — управляемого термоядерного синтеза (УТС), советскими учеными был создан первый токамак. Токамак — это аббревиатура, введенная И.Н. Головиным, советским и российским физиком, учеником академика И.В. Курчатова, которая расшифровывается как ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками, в которой можно осуществить УТС. Со временем токамаки полностью охватили область ядерной энергетики [1].

Международный экспериментальный термоядерный реактор. На данный момент ведется строительство проекта международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР/ITER) типа токамак [2]. Задача ИТЭР — продемонстрировать возможности коммерческого использования термоядерной реакции синтеза и решить физические и технологические проблемы, которые могут возникнуть в данном вопросе. Управляемый термоядерный синтез, происходящий в ИТЭР, описывается реакцией дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$ [3]:



Два ядра (дейтерий и тритий) взаимодействуют с образованием ядра гелия и высокоэнергетического нейтрона. Данная реакция дает значительный выход энергии по сравнению с другими видами реакций термоядерного синтеза, такими как D-D, D- ${}^3\text{He}$, p- ${}^{11}\text{B}$.

Разработка ИТЭР ведется с середины 80-х годов прошлого столетия, но до сих пор еще не завершена. Сроки завершения строительства ежегодно сдвигаются из-за технологических проблем. На данный момент дата завершения строительства на землях коммуны Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция, запланирована на 2025 г. Одной из главных задач ИТЭР является получение самоподдерживающейся термоядерной реакции, т. е. затраты на нагрев плазмы должны быть меньше энергии, которая будет выделяться в результате управляемого термоядерного синтеза. Для этого применяются современнейшие технологии для использования и удержания, высокотемпературной плазмы, а не низкотемпературной, как в плазмотронах [4].

Основными физическими и инженерными задачами ИТЭР являются: достижение устойчивого термоядерного горения в режиме индуктивного тока на протяжении 500 с, получение общей энергии, выделяемой в процессе синтеза, большей, чем затраченной энергии на запуск и поддержку реакции, демонстрация надежности основных специфических для термоядерного реактора технологий, испытание материалов для будущих энергетических реакторов. Основные технологические и теплофизические характеристики данного токамака представлены в сводной таблице.

Стоит упомянуть, что география российских предприятий и городов, принимающих участие в проекте ИТЭР, очень обширна: Москва, Санкт-Петербург, Брянск, Новосибирск, Троицк, Казань, Нижний Новгород. Также в России реализуются диагностики ИТЭР. Всего проводится 13 диагностик, например диагностика плазмы, нейтронные и оптические виды диагностики.

Каждая страна, участвующая в проекте ИТЭР, должна иметь свой собственный токамак. На нем прорабатываются определенные элементы большого будущего международного реактора. Для России в качестве такого токамака использован Т-15МД — модернизированный советский и российский исследовательский термоядерный реактор Т-15, созданный в Курчатовском институте в рамках проекта «Токамак», характеристики которого представлены в сводной таблице [5, 6]. После модернизации Т-15МД может быть использован как гибридная машина: токамак служит источником нейтронов для запуска ядерной реакции в ториевой оболочке. В ходе модернизации реактор получил ряд новых систем, но его принципы работы и общая концепция не претерпели существенных изменений. Как и прежде, токамак должен создавать и поддерживать плазменный шнур с помощью магнитного поля.

Демонстрационный термоядерный реактор. Итак, целью ИТЭР, крупнейшего в мире термоядерного эксперимента, является доказательство получения чистой энергии в результате термоядерной реакции. Следующим важным шагом станет демонстрация того, что чистая электроэнергия может быть получена путем синтеза. Вот тут-то и пригодятся прототипы коммерческого реактора — демонстрационные термоядерные электростанции, или ДЕМО/ДЕМО [7, 8]. Они представляют собой скорее конструктивную концепцию, чем конкретную конфигурацию термоядерной установки. Электростанция ДЕМО будет устроена существенно проще и не будет носить исследовательской нагрузки, а для ее работы не потребуется значительного числа датчиков, поскольку необходимые параметры реактора будут отработаны уже на экспериментальном реакторе ИТЭР.

С помощью ДЕМО должны быть решены две важные проблемы на пути к промышленной термоядерной электростанции: реализация наработки трития и обеспечение работоспособности материалов при большом объеме переноса нейтронов. Также ДЕМО должна продемонстрировать возможность экономически приемлемой выработки электроэнергии.

Главные отличия ДЕМО от установки ИТЭР заключаются в следующем: 1) длительность разряда должна быть намного больше, в идеале — работа в стационарном режиме; 2) поток высокоэнергетичных нейтронов будет существенно превышать поток нейтронов в ИТЭР, поэтому значительно обострятся материаловедческие проблемы; 3) в ДЕМО возрастет нагрузка на стенку и на элементы дивертора; 4) большую проблему может представлять способность трития диффундировать через конструкционные материалы.

Ориентировочные сроки постройки ДЕМО планируются на вторую половину XXI в., однако реальные сроки развития данного проекта зависят от реализации проекта ИТЭР и экспериментальной обработки на нем отдельных элементов ДЕМО. Основные характеристики ДЕМО показаны в сводной таблице.

Токамак с реакторными технологиями. Если говорить про токамаки, которые должны быть в более обозримом будущем, то в 2019 г. было объявлено о создании новой экспериментальной установки следующего поколения — токамак с реакторными технологиями (ТРТ/TRT). Место построения уже выбрано — это предприятие Государственной корпорации «Росатом» ГНЦ РФ ТРИНИТИ (Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований). Однако в ходе проектирования были выявлены некоторые недочеты при расположении конструкции, которые планируется исправить: 1) для интеграции с нагревными инжекторами проводится анализ возможности сдвига ТРТ на 7 м вдоль диагонали зала; 2) также анализируется возможность уменьшения размеров высоковольтной платформы вдоль пучков.

При создании ТРТ будут использоваться технологии, разработанные благодаря участию нашей страны в проекте ИТЭР. Миссии ТРТ заключаются в разработке и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядер-

ных технологий; высокотемпературной сверхпроводимости электромагнитной системы (ВТСП), работающей при высоком магнитном поле; металлической и литиевой жидкометаллической первой стенки; инновационного дивертора; системы неиндуктивной генерации тока; тритиевого комплекса; технологии дистанционного управления; совместных с термоядерным реактором диагностик; технологии поддержания квазистационарных разрядов в плазме с термоядерными параметрами; исследования работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы, с интенсивным нагревом альфа-частицами в центре плазменного шнура в дейтерий-тритиевых экспериментах [9, 10].

Токамак с реакторными технологиями разрабатывается в качестве полноценного плазменного прототипа как чистого термоядерного реактора, так и термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора (синтез-деление) [11]. Он предназначен для изучения поведения плазмы в квазистационарных режимах, близких к воспламенению, а также для исследования и разработки различных методов дополнительного нагрева плазмы, подачи топлива, разработки новых диагностических средств, работающих в больших нейтронных потоках, освоения тритиевой технологии.

Проект разработан в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года». В 2021 г. приступили к разработке диагностического оборудования и к предварительному проектированию элементов ТРТ: вакуумной камеры и оболочки криостата. К концу 2024 г. в ТРИНИТИ планируют завершить первый этап реконструкции термоядерного комплекса, необходимого для создания инфраструктуры будущей установки, а полностью проект должен быть готов к 2030 г.

Технические и физические характеристики токамаков

Модель установки	Температура плазмы, кэВ	Плотность плазмы, м ³	Ток плазмы, МА	Большой диаметр плазмы, м	Малый диаметр плазмы, м	Магнитное поле, Тл	Мощность нагрева, МВт	Длительность импульса, с
Т-15	5	10 ²⁰	1,8	4,6	1,4	3,6	14	15
Т-15МД	9	10 ²⁰	2,0	3,0	1,4	2,0	20	30
ИТЭР	20	10 ²⁰	15,0	12,4	4,0	5,3	73	500
ДЕМО	13	0,75 · 10 ²⁰ ₀	20,0	18,2	6,0	5,7	50	7200
ТРТ	8	2 · 10 ²⁰	5,0	4,5	1,2	5,0	40	100

Учитывая сложность конструкции токамака, российские специалисты создали модель реактора в виртуальной реальности. С помощью погружения в виртуальную реальность можно собирать и разбирать сооружение как кон-

структур, изучая его работу, обучаясь эксплуатации и уточняя конструкционные особенности, доступ к которым ограничен или невозможен в реальности. В настоящее время развитие всевозможных инженерных расчетов набирает обороты с каждым годом, появляется огромное количество предварительных экспериментальных данных, а также исследования с уже испытанными данными [12–16]. Основные характеристики ТРТ представлены в сводной таблице.

Заключение. Развитие термоядерной промышленности иногда вызывает неоднозначные мнения. Однако после изучения преимуществ этого вида энергии становится ясно, что разработки должны безоговорочно продолжаться и совершенствоваться. В обозримом будущем человечество столкнется с проблемой нехватки электроснабжения. Запасы газа, сжигаемого на тепловых электростанциях и используемого в химической промышленности, не бесконечны. Если говорить об атомной энергетике, то запасы урана-235 также ограничены. Поэтому необходимо искать стратегические и долгосрочные пути энергоснабжения прямо сейчас.

Преимуществом термоядерного реактора являются неограниченные запасы топлива, на котором он работает: дейтерия и трития. Дейтерий находится в воде океана, он практически неисчерпаем. Тритий может быть получен из лития-6, который также доступен и существует в необходимых количествах. Вторым преимуществом, не менее важным, является доступность — вода занимает 70 % поверхности планеты, поэтому странам не нужно бороться и воевать за местоорождения, но необходимо конкурировать в развитии технологий.

Таким образом, изучена задача извлечения энергии из термоядерного синтеза. Проанализированы физические и технические характеристики токамаков. Представлено сравнение токамаков нового поколения и сделан вывод о целесообразности разработки токамаков в будущем.

Литература

- [1] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М., Физматлит, 2017.
- [2] Химченко Л.Н., Красильников А.В. ИТЭР. Сборка токамака и дальнейшая интеграция в термоядерное общество. *ICRAF-2022*. М., Плазмаиофан, 2022, с. 40.
- [3] Michael F. Radioactivity. Introduction and history. Elsevier, 2007.
- [4] Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А. и др. Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.
- [5] Хвостенко П.П. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, № 1, с. 15–38.
DOI: <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38>
- [6] Аликаев В.В., Бревнов Н.Н. Программа физических исследований на установке Токмак-15. М., ИАЭ, 1983.
- [7] Готт Ю.В., Курнаев В.А. На пути к энергетике будущего. М., МИФИ, 2017.

- [8] Federici G. European DEMO design strategy and consequences for materials. *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, no. 9, art. 092002.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/9/092002>
- [9] Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 11, с. 970–985.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
- [10] Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кащук Ю.А. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): предварительный анализ ядерного энерговыделения в катушке тороидального поля. *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 12, с. 1170–1176.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110238>
- [11] Карпов Д.А., Иванов А.Г., Лившиц А.И. и др. Система вакуумной откачки токамака TRT. *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 12, с. 1152–1169.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
- [12] Чирков А.Ю., Рыжков С.В. Воздействие мощных тепловых и нейтронных потоков на элементы конструкции термоядерных и ядерных энергоустановок. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2017, т. 8, № 6, с. 513–522.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
- [13] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Sci. Technol.*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161.
DOI: <https://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [14] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A. et al. Fusion modes of an axially symmetrical mirror trap with the high power injection of fast particles. *Plasma Phys. Rep.*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 1025–1031. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X12080090>
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas.*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics modeling of the interaction of pulsed plasma jets. *Phys. Atom. Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 10, pp. 1460–1464.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S106377881811011X>

Копалейшвили Н.Г. — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Батрак Н.В. — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Копалейшвили Н.Г., Батрак Н.В. Сравнение токамаков нового поколения. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 09(74). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-09-822>

COMPARISON OF NEW GENERATION TOKAMAKS

N.G. Kopaleishvili

nikitakopaleishvili@gmail.com

N.V. Batrak

nik.nikita02@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The relevance of the development and operation of new generation tokamaks is investigated. A comparative analysis of future and current tokamaks concepts is carried out. This paper considers such facilities as ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), DEMO (Demonstration Thermonuclear Reactor), TRT (tokamak with reactor technologies), T-15MD, T-15. The principle of controlled thermonuclear fusion based on the reaction of deuterium and tritium is shown, and the advantage of this reaction over other possible ones is highlighted. The characteristics of the devices, the terms of their construction and the conditions of work are examined. The missions and tasks of modern projects are considered. Based on the investigated data, a conclusion is made about the feasibility of developing a new generation of tokamaks.

Keywords

Tokamak with reactor technologies, international experimental fusion reactor, controlled fusion, demonstration fusion power plants, ITER, DEMO, TRT, T-15MD, Rosatom, TRINITI

Received 25.08.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. Sistemy alternativnoy termoyadernoy energetiki [Systems of alternative fusion energetics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017 (in Russ.).
- [2] Khimchenko L.N., Krasilnikov A.V. [ITER. Tokamak assembly and further integration in thermonuclear community]. ICPAF-2022. Moscow, Plazmaiofan Publ., 2022, p. 40 (in Russ.).
- [3] Michael F. Radioactivity. Introduction and history. Elsevier, 2007.
- [4] Klimenko G.K., Kuzenov V.V., Lyapin A.A. et al. Raschet, modelirovanie i proektirovanie generatorov nizkotemperaturnoy plazmy [Calculation, modeling and design of low-temperature plasma generators]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021 (in Russ.).
- [5] Khvostenko P.P. Experimental thermonuclear installation Tokamak T-15MD. VANT. Ser. Termoyadernyy sintez [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion], 2019, vol. 42, no. 1, pp. 15–38. DOI: <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38> (in Russ.).
- [6] Alikae V.V., Brevnov N.N. Programma fizicheskikh issledovaniy na ustanovke Tokamak-15 [Physical studies program for Tokamak-15 plant]. Moscow, IAE Publ., 1983 (in Russ.).
- [7] Gott Yu.V., Kurnaev V.A. Na puti k energetike budushchego [On the way to future energetics]. Moscow, MIFI Publ., 2017 (in Russ.).
- [8] Federici G. European DEMO design strategy and consequences for materials. *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, no. 9, art. 092002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/9/092002>

- [9] Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N. et al. Tokamak with reactor technologies (TRT): concept, missions, key distinctive features and expected characteristics. *Fizika plazmy*, 2021, vol. 47, no. 11, pp. 970–985.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196> (in Russ.). (Eng. version: *Plasma Phys. Rep.*, 2021, vol. 47, no. 11, pp. 1092–1106.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110192>)
- [10] Portnov D.V., Vysokikh Yu.G., Kashchuk Yu.A. et al. Tokamak with reactor technologies (TRT): preliminary analysis of nuclear energy release in toroidal field coils. *Fizika plazmy*, 2021, vol. 47, no. 12, pp. 1170–1176. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110238> (in Russ.). (Eng. version: *Plasma Phys. Rep.*, 2021, vol. 47, no. 12, pp. 1285–1290.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110234>)
- [11] Karpov D.A., Ivanov A.G., Livshits A.I. et al. Vacuum pumping system of TRT. *Fizika plazmy*, 2021, vol. 47, no. 12, pp. 1152–1169.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196> (in Russ.). (Eng. version: *Plasma Phys. Rep.*, 2021, vol. 47, no. 12, pp. 1267–1284.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X21120023>)
- [12] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. Impact of intense thermal and neutron fluxes on the structural elements of fusion and fission reactors. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2017, vol. 8, no. 6, pp. 513–522.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196> (in Russ.).
- [13] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Sci. Technol.*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161.
DOI: <https://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [14] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A. et al. Fusion modes of an axially symmetrical mirror trap with the high power injection of fast particles. *Plasma Phys. Rep.*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 1025–1031. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X12080090>
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas.*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics modeling of the interaction of pulsed plasma jets. *Phys. Atom. Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 10, pp. 1460–1464.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S106377881811011X>

Kopaleishvili N.G. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Batruk N.V. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ryzhkov S.V., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kopaleishvili N.G., Batruk N.V. Comparison of new generation tokamaks. *Politekhnikeskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 09(74).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-09-822.html> (in Russ.).