

УДК 339.54.012

Вилданов Рустем Ренатович, доцент кафедры «Тепловые электрические станции», Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань

Гатиятова Саида Эриковна, студент, Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В ЭНЕРГЕТИКЕ

Аннотация. Статья представляет собой комплексный анализ перспектив развития термоядерной энергетики как потенциального источника экологически чистой и практически неиссякаемой энергии. Рассматривается современное состояние мировых исследований в области управляемого термоядерного синтеза, включая как масштабные международные проекты (ИТЭР), так и перспективные частные инициативы. Особое внимание уделяется технологическим вызовам, связанным с созданием устойчивой высокотемпературной плазмы, разработкой радиационно-стойких материалов и решением инженерных задач по управлению термоядерной реакцией. На основе данных Международного агентства по атомной энергии и национальных дорожных карт анализируется потенциальная роль термоядерного синтеза в глобальном энергобалансе к концу XXI века. Отдельно рассматриваются вопросы экономической целесообразности и возможные сценарии коммерциализации технологии.

Annotation. The article presents a comprehensive analysis of the prospects for the development of thermonuclear energy as a potential source of environmentally friendly and practically inexhaustible energy. The article examines the current state of global research in the field of controlled thermonuclear fusion, including both large-scale international projects (ITER) and promising private

initiatives. Special attention is paid to the technological challenges associated with the creation of stable high-temperature plasma, the development of radiation-resistant materials and the solution of engineering problems for controlling the thermonuclear reaction. Based on data from the International Atomic Energy Agency and national roadmaps, the potential role of thermonuclear fusion in the global energy balance by the end of the 21st century is analyzed. The issues of economic feasibility and possible scenarios of technology commercialization are considered separately.

Ключевые слова: плазменные технологии, высокотемпературные сверхпроводники, нейтронная радиация, радиационно-стойкие материалы, дейтерий-тритиевое топливо.

Keywords: plasma technologies, high-temperature superconductors, neutron radiation, radiation-resistant materials, deuterium-tritium fuel.

Идея освоения термоядерного синтеза, сегодня становится глобальным энергетическим приоритетом. Перспектива чистой, безопасной и доступной энергии делает термоядерный синтез стратегически важным для многих стран. Современный ландшафт характеризуется прогрессом, диверсификацией подходов и уверенностью в его вкладе в мировые потребности в электроэнергии без выбросов [1].

Управляемый термоядерный синтез все больше рассматривается как национальный приоритет в области НИОКР. Согласно обзору МАГАТЭ, за 2025 год, отрасль вступает в решающую фазу. ИТЭР, крупнейшая мировая экспериментальная термоядерная установка, строящаяся во Франции, остается основным международным проектом, цель которого — демонстрация управляемого горения дейтериево-тритиевой плазмы и получение чистой энергетической прибыли. Несмотря на инженерные сложности, ИТЭР остается краеугольным камнем, объединяющим мировое научное сообщество и служащим технологическим трамплином для национальных программ.

Параллельно с ИТЭР происходит настоящая революция, движимая частным капиталом. Глобальный объем частных инвестиций в технологии термоядерного синтеза превысил 10 миллиардов долларов США, что свидетельствует о растущем доверии к коммерческому потенциалу отрасли. Фонды национального благосостояния, крупные корпорации и энергокомпании поддерживают новое поколение разработчиков, стремящихся создать коммерческие реакторы [2].

Ярким примером является американская компания Commonwealth Fusion Systems (CFS), которая привлекла около 3 миллиардов долларов и цель проекта - обеспечить подачу электроэнергии в сеть в начале 2030-х годов, построив компактный токамак SPARC с использованием революционных высокотемпературных сверхпроводящих магнитов. Эта динамичная экосистема, дополняющая государственные усилия, значительно ускоряет инновации и сокращает предполагаемые сроки вывода технологии на рынок.

Потенциал термоядерной энергии для преобразования мировой энергетической системы огромен. В отличие от переменчивых солнечной и ветровой генерации, термоядерный реактор способен обеспечивать надежную базовую нагрузку — постоянную и предсказуемую выработку электроэнергии. Это качество делает его идеальным дополнением к возобновляемым источникам, позволяя создать устойчивую и сбалансированную энергосистему с нулевыми выбросами. Моделирование, проведенное Массачусетским технологическим институтом и включенное в обзор МАГАТЭ, впервые дает количественную оценку этого вклада. Согласно исследованию, в сценарии с низкими капитальными затратами (2,8 тыс. долл. США за 1 кВт) к 2100 году доля термоядерной энергии в мировом производстве электроэнергии может достигнуть 50%. Даже в пессимистичном сценарии с высокими затратами (11,3 тыс. долл. США за 1 кВт) этот показатель, как ожидается, составит 10%. Эти расчеты подчеркивают не только энергетическую, но и экономическую ценность синтеза:

удовлетворение растущего спроса на чистую электроэнергию может добавить триллионы долларов к глобальному ВВП.

Фундаментальное преимущество синтеза заключается в его превосходной энергоемкости и топливной базе. Реакция синтеза дейтерия и трития способна генерировать в четыре миллиона раз больше энергии на килограмм топлива, чем сжигание угля или нефти, и в четыре раза больше, чем реакция деления ядер на атомных электростанциях. Топливо для синтеза широко распространено и легко доступно: дейтерий можно экстрагировать из морской воды, а тритий — воспроизводить из лития, запасов которого в природе хватит на миллионы лет [3]. Термоядерные реакторы по своей природе безопасны — в них невозможна неконтролируемая цепная реакция и расплавление активной зоны, как в случае с реакторами расщепления. В случае любой аварии плазма естественным образом остынет, и реакция прекратится. Еще одним значительным экологическим преимуществом является отсутствие выбросов парниковых газов в процессе эксплуатации и образование лишь небольшого объема средне- и низкоактивных отходов, не требующих геологического захоронения в течение тысячелетий.

Несмотря на обнадеживающие прогнозы, путь к коммерциализации термоядерной энергии лежит через решение ряда сложнейших научно-технических проблем. Одной из самых серьезных является проблема материалов. Компоненты реактора, особенно первая стенка, будут подвергаться беспрецедентной бомбардировке высокоэнергетическими нейтронами. Как отмечается в дорожной карте Министерства энергетики США, «исключительная деградация материалов, вызванная большим количеством термоядерных нейтронов, является одним из крупнейших факторов, ограничивающих экономику и безопасность термоядерной энергии».

Нейтронная радиация может сделать конструкционные материалы хрупкими, и до сих пор не существует проверенных решений, способных выдержать такие условия в течение всего срока службы коммерческой

электростанции. Создание материалов с низкой активацией, которые не становятся высокорadioактивными, — ключевая задача для обеспечения экономической конкурентоспособности и общественного признания [5].

Ответом на эти вызовы становится диверсификация технологических подходов. Хотя токамак, лежащий в основе ИТЭР, остается наиболее развитой концепцией, активно развиваются и другие методы удержания плазмы. Среди них — стеллараторы, предлагающие более стабильную конфигурацию магнитного поля, а также системы на основе инерционного удержания, где для обжаривания и нагрева топливной мишени используются мощные лазеры.

Прорыв, совершенный в 2022 году на установке National Ignition Facility (NIF) в США, где впервые удалось добиться чистого прироста энергии (выход энергии превысил энергию, поглощенную мишенью), доказал жизнеспособность и этого направления, хотя общий КПД лазерной системы все еще остается крайне низким. Параллельно ведутся работы над другими концепциями, такими как открытые ловушки, Z-пинчи и магнитно-инерциальный синтез, что в совокупности укрепляет всю отрасль, увеличивая шансы на успех.

Отдельного внимания заслуживает революция в области высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) магнитов. Эти технологии позволяют создавать значительно более сильные магнитные поля, что, в свою очередь, позволяет проектировать гораздо более компактные и мощные термоядерные устройства. Проекты вроде SPARC и WHAM активно интегрируют ВТСП-катушки для повышения производительности и сокращения размеров, стоимости и сроков разработки. Именно компактность становится залогом потенциальной экономической эффективности будущих термоядерных электростанций, делая их привлекательными для частных инвесторов [4].

Глобальный характер термоядерных вызовов обуславливает необходимость тесного международного сотрудничества. ИТЭР является ярчайшим примером такого партнерства, но его дополняют и другие

многосторонние инициативы. Созданная в 2024 году Всемирная группа МАГАТЭ по термоядерной энергии (ВГТЭ) призвана способствовать глобальному диалогу и обеспечению согласованности усилий. На стадии эксплуатации, строительства или планирования по всему миру находятся более 160 термоядерных установок, что требует выработки общих стандартов и нормативных рамок. Уже сейчас разные страны демонстрируют различные, но взаимодополняющие подходы к достижению общей цели.

Китай лидирует по длительности удержания плазмы на токамаке EAST и достиг температуры ионов свыше 100 миллионов градусов на установке HL-3. США поддерживают термоядерные исследования государственным финансированием и активностью частного сектора, а Закон о термоядерной энергии упрощает регулирование. Россия, родина токамаков, участвует в ИТЭР и развивает проект ТРТ.

Таким образом, термоядерный синтез становится все более реалистичным благодаря международным проектам, частному сектору, новым технологиям и политической поддержке. Оптимистичные прогнозы говорят о первых пилотных коммерческих проектах в 2030-х годах и о значительной доле термоядерной энергии в глобальном энергобалансе к концу века. Освоение этой технологии обеспечит человечество чистой, безопасной и практически неиссякаемой энергией.

Список литературы

1.Кругляков Э. П. Перспективы термоядерной энергетики // Проблемы развития российской энергетики: материалы научной сессии Президиума СО РАН, г. Новосибирск, 24 февраля 2005 г. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2025. – С. 118–134.

2.Конн Р. У., Чуянов В. А., Иное Н., Свитлин Д. Р. Международный термоядерный экспериментальный реактор // В мире науки. – 2022. – № 6. – С. 43–49.

3.Ушаков В. Я. Термоядерная энергетика: реальность и надежды // Известия Томского политехнического университета [Электронный ресурс]. – 2020. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernaya-energetika-realnost-i-nadezhdy> (дата обращения: 24.11.2025).

4.Хисамов А. Р., Терегулов Т. Р. Термоядерный синтез – будущее энергетика // Наука, техника и образование [Электронный ресурс]. – 2016. – № 12 (30). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernyy-sintez-budushchee-energetiki> (дата обращения: 24.11.2025).

5.Гарипов М. Г. Термоядерная энергетика // Вестник Казанского технологического университета [Электронный ресурс]. – 2023. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernaya-energetiki> (дата обращения: 24.11.2025).

References

1.Kruglyakov E. P. Prospects of thermonuclear energy // Problems of the development of Russian energy: materials of the scientific session of the Presidium of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, February 24, 2005 – Novosibirsk : Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. – pp. 118-134.

2.Conn R. U., Chuyanov V. A., Otho N., Svitlin D. R. International thermonuclear experimental reactor // In the World of Science. - 2022. – No. 6. – pp. 43-49.

3. Ushakov V. Ya. Thermonuclear energy: reality and hopes // Proceedings of Tomsk Polytechnic University [Electronic resource]. – 2020. – No. 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernaya-energetika-realnost-i-nadezhdy> (date of request: 11.24.2025).

4. Khisamov A. R., Teregulov T. R. Thermonuclear fusion – the future of energy // Science, technology and education [Electronic resource]. – 2016. – № 12

(30). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernyy-sintez-budushchee-energetiki> (date of request: 11.24.2025).

5. Garipov M. G. Thermonuclear power engineering // Bulletin of Kazan Technological University [Electronic resource]. – 2023. – No. 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termoyadernaya-energetiki> (date of request: 11.24.2025).