

Атомная физика, физика кластеров и наноструктур

Обзорная статья

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM17406>

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТАНОВЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ К ЭТАПУ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ

В. В. Кораблев [✉], **В. А. Рожанский**, **А. И. Сарыгулов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия;

[✉] korablev@spbstu.ru

Аннотация. В данной обзорной статье анализируются физико-технические проблемы и оцениваются перспективы освоения энергии термоядерного синтеза; при этом учитываются и результаты, полученные международным консорциумом ученых в рамках таких проектов, как ITER, и результаты отдельных национальных программ. Обеспечение энергией – один из самых сложных вызовов, с которыми человечество сталкивается в XXI веке. В наше время около 75 % нужд человечества обеспечивают ископаемые носители энергии: нефть, газ и уголь. Сейчас уже очевидно, что возобновляемые источники энергии имеют свой предел использования, в силу, прежде всего, нестабильности выработки ими энергии и отсутствия технологий по созданию запасов в больших объемах вырабатываемой ими энергии. Все это заставляет нас обратить внимание на такой источник, как энергия управляемого термоядерного синтеза. Нами также проведен анализ новых трендов в освоении термоядерной энергии, основанных на консорциумах ученых и частного сектора, которые ставят перед собой задачи ее ускоренной коммерциализации и промышленного освоения.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, фундаментальные исследования, промышленное освоение

Финансирование: Мегагрант «Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях энергетических переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

Для цитирования: Кораблев В. В., Рожанский В. А., Сарыгулов А. И. Физико-технические проблемы становления термоядерной энергетики: от фундаментальных исследований к этапу промышленного освоения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 4. С. 68–87. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17406>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Review article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17406>

**PHYSICAL AND TECHNICAL PROBLEMS
OF FUSION ENERGY DEVELOPMENT:
FROM FUNDAMENTAL RESEARCH
TO THE STAGE OF INDUSTRIAL OPENING UP**
V. V. Korablev [□], V. A. Rozhansky, A. I. Sarygulov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

[□] korablev@spbstu.ru

Abstract. This review article analyzes the physical and technical problems and judges the prospects for the development of fusion energy, taking into account both the results obtained by an international consortium of scientists within the framework of such projects as ITER and within the framework of individual national programs. Energy supply is one of the most complex challenges that mankind faces in the 21st century. In modern times, about 75 % of humanity's needs are provided by fossil energy carriers: oil, gas and coal. It is obvious now that renewable energy sources have their limit of use, primarily due to the instability of their energy production and the lack of technologies to create reserves in large volumes of energy produced by them. All this forces us to pay attention to such a source as the energy of controlled thermonuclear fusion. The article also analyzes new trends in the development of fusion energy based on consortia of scientists and the private sector, which set themselves the tasks of its accelerated commercialization and industrial opening up.

Keywords: controlled thermonuclear fusion, fundamental research, industrial development

Funding: Megagrant “Technological Challenges and Socio-Economic Transformation in the Context of Energy Transitions” (Agreement No. 075-15-2022-1136, dated 01.07. 2022).

For citation: Korablev V. V., Rozhansky V. A., Sarygulov A. I., Physical and technical problems of fusion energy development: From fundamental research to the stage of industrial opening up, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (4) (2024) 68–87. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Стабильное и повсеместное обеспечение энергией – одна из самых важных задач XXI века. Рост численности населения Земли, высокий уровень использования нефти, газа и угля, резко изменяющийся климат Земли и осознание того, что нынешние темпы глобального использования возобновляемых источников энергии как реальной альтернативы ископаемым видам топлива не могут решить проблему «нулевых» выбросов углекислого газа – эти тренды только обостряют накопившиеся энергетические проблемы. Надо учитывать и ограниченность геологических ресурсов критически важных природных материалов для решения проблем цифрового и энергетического перехода (данная проблема освещена в отдельных работах, см., например [1 – 5]).

Действие перечисленных выше факторов обуславливает необходимость поиска новых решений в области энергетики. Одним из таких перспективных направлений, несомненно, является энергетика управляемого термоядерного синтеза, тем более что за последних два десятилетия в этой области достигнут значительный прогресс.

Как показало время, освоение технологии использования термоядерной энергии оказалось очень сложной задачей. История термоядерных исследований началась со статьи Г. А. Гамова об α -распаде ядер в июле 1928 г. В 1944 г. Э. Ферми предложил идею быстрого реактора деления, а шесть лет спустя А. Д. Сахаров совместно с И. Е. Таммом

предложили первый вариант термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы. Важным этапом формирования экспериментальной базы исследований стало создание первого в мире токамака советскими учеными под руководством академика Л. А. Арцимовича и его сотрудников [6]. Надо заметить, что еще в 1955 г. было предсказано, что проблема термоядерной энергии будет решена через 20 лет [4]. Если взять за точку отсчета статью Г. А. Гамова 1928 года, то проблема осталась нерешенной и через почти что сто лет.

Основная сложность в освоении энергии термоядерного синтеза связана с тем, что в естественных земных условиях таких реакций просто не существует. Ученым пока не удалось решить задачу длительной самоподдерживающейся термоядерной реакции. Существующие системы хотя и позволяют достичь необходимых для синтеза температур, но только с помощью дополнительного внешнего нагрева. Устройства дополнительного нагрева расходуют энергии больше, чем вся система в целом производит. И эта проблема на сегодня не решена.

Существует ряд других научно-технологических проблем, которые еще ждут своего решения:

- длительное удержание горячей плазмы внутри камеры;
- создание первой стенки термоядерной установки, способной выдерживать экстремальные условия;
- замыкание топливного цикла;
- промышленное извлечение и использование огромного количества производимой энергии.

В 2023 году были достигнуты три важных результата, которые помогут в решении этих проблем. Первым является китайский токамак EAST, который продемонстрировал режим работы, значительно улучшающий долгосрочное удержание плазмы без накопления примесей. Второй – это рекордные характеристики самого большого стелларатора W7-X в Германии, который достиг длительного плазменного разряда, продемонстрировав тем самым возможность связывания больших количеств энергии в плазме и отвода тепла контролируемым способом. Наконец, в США добились еще большего прироста получаемой энергии, по сравнению с ранее полученными результатами [2].

На фоне таких успехов ряд стран объявил о принятии конкретных решений по созданию новых правительственных структур, ответственных за практическую реализацию технологий термоядерного синтеза. Так, Великобритания объявила о создании в феврале 2023 года компании UK Industrial Fusion Solutions Ltd, которая является новым органом по реализации программы термоядерного синтеза для получения недорогой низкоуглеродной энергии^{1,2}. В Российской Федерации координатором комплексной термоядерной энергетической программы, согласно указу Президента, была определена Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»³. В апреле 2023 года Япония объявила о создании Совета термоядерной промышленности Японии и других систем термоядерного синтеза посредством сотрудничества промышленности, научных кругов и правительства⁴. В США принято решение о создании нового агентства в составе Министерства энергетики, на которое возложены функции координатора по термоядерной энергетике⁵. В 2023 г. Европейская комиссия приняла закон о чистой нулевой промышленности, где

¹ G. Freeman. UK Takes Major STEP Towards near Limitless, Low-carbon Energy. Режим доступа: <https://www.gov.uk/government/news/uk-takes-major-step-towards-nearlimitless-low-carbon-energy> (дата обращения: 25.05.2024).

² Towards Fusion Energy 2023. Режим доступа: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf> (дата обращения: 25.05.2024).

³ Указ Президента Российской Федерации от 16.04.2020 № 270 «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации». Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004160030> (дата обращения: 24.05.2024).

⁴ Fusion Energy Innovation Strategy (2023). Режим доступа: https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf (дата обращения: 23.05.2024).

⁵ Readout of the White House Summit on Developing a Bold Decadal Vision for Commercial Fusion Energy. Режим доступа: <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/04/19/readout-of-the-white-house-summit-on-developing-a-bold-decadal-vision-for-commercial-fusion-energy/> (дата обращения: 23.05.2024).

термоядерная энергия указана как одна из целей инвестиций в технологии⁶. В 2023 г. Германия приняла меморандум об энергии лазерного инерционного термоядерного синтеза и объявила о новой схеме финансирования национальной термоядерной деятельности, включая частное партнерство^{7,8}. Важным параллельным шагом стало анонсирование больших научных программ по развитию термоядерной энергетики. Так, Великобритания объявила о планах инвестировать до 650 млн. фунтов стерлингов в разработку термоядерного синтеза до 2027 г. и предложила конкретные варианты термоядерного синтеза и правил регулирования, выходящие за рамки требований ядерного лицензирования^{9,10}. Федеральное министерство образования и исследований Германии объявило об инвестициях более 1 млрд. евро в развитие термоядерной энергетики в течение следующих пяти лет¹¹. Согласно оценке МАГАТЭ, сейчас наблюдается значительный рост инвестиций со стороны частного сектора в сферу термоядерной энергетики: 43 компании частного сектора уже инвестировали 6,2 млрд. долларов [2]. Именно растущая активность частного сектора свидетельствует о том, что очертания энергетики будущего находятся не за горами.

Низкоуглеродные конкуренты термоядерной энергетики

В обозримом будущем основными конкурентами термоядерной энергетики будут возобновляемые источники энергии, такие как гидроэнергетика, солнечная, ветровая, геотермальная, биоэнергия и энергия приливов. Экономически значимыми на сегодняшний день являются первые три вида. В 2022 г. в мире было произведено 29165,1 ТВт·ч электроэнергии, из которых на долю гидроэнергетики приходилось 14,8 %, солнечной и ветровой – 11,7 %, других видов возобновляемой энергии – 2,7 %, т. е. всего 29,2 %¹².

Развитие гидроэнергетики сдерживается рядом факторов, среди которых следует отметить нестабильность водного цикла, которая влияет на способность электростанций производить электроэнергию, а также ограниченность объемов инвестиций из-за высокой капиталоемкости крупных ГРЭС и дополнительных затрат на устранение социальных и экологических последствий реализации таких проектов.

Начиная с 2000 г. быстро растущим сегментом мировой энергетики становятся ветряная и солнечная энергетика. Экономическая конкурентоспособность становится основным фактором распространения различных технологий генерации энергии. На данном этапе все экономически значимые технологии возобновляемой энергетики находятся в стадии зрелости и вряд ли могут быть изменены коренным образом. В настоящее время в качестве перспективного низкоуглеродного источника рассматривается водород. На горизонте до 2050 г. необходимы инвестиции в размере 1-2 трлн. долларов, чтобы доля водорода в мировом конечном потреблении энергии достигла не менее 10 %, а сам водородный сектор был бы с нулевыми выбросами [7].

Все существующие и перспективные технологии возобновляемой энергетики, рассмотренные выше, представляют собой тот конкурентный ландшафт, который условно можно назвать «полем битвы энергетических технологий». На этом «поле битвы» пока отсутствуют технологии ядерного синтеза.

Ядерная энергетика является низкоуглеродной, и на нее в 2022 г. приходилось 9,2 %

⁶ Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs. Режим доступа: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1665 (дата обращения: 23.05.2024).

⁷ Memorandum Laser Inertial Fusion Energy. Режим доступа: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.html> (дата обращения: 20.05.2024).

⁸ Positionspapier Fusionsforschung (2023), https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.html (дата обращения: 20.05.2024).

⁹ Energy Security Bill factsheet: Fusion regulation. Режим доступа: <https://www.gov.uk/government/publications/energy-security-bill-factsheets/energy-security-bill-factsheet-fusion-regulation> (дата обращения: 20.05.2024).

¹⁰ Government Announces up to £650 Million for UK Alternatives to Euratom R&T (2023), <https://www.gov.uk/government/news/government-announces-up-to-650-million-for-uk-alternatives-to-euratom-rt> (дата обращения: 20.05.2024).

¹¹ Statement Fusionsforschung. Режим доступа: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Videos/de/bmbf/5/59/59247.html> (дата обращения: 20.05.2024).

¹² Energy Institute Statistical Review of World Energy 2023. Режим доступа: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads> (дата обращения: 25.05.2024).

мировой выработки электроэнергии. Становление этого сегмента мировой энергетики заслуживает особого внимания по трем причинам:

- а) в ее основе лежат фундаментальные открытия в области физики;
- б) существенный временной лаг между самым научным открытием и появлением первых промышленных станций, использующих энергию атома для производства электроэнергии;
- в) бурный рост ядерной энергетики, сопровождавшийся общественным противостоянием со стороны экологических организаций, так и его спад в периоды значительных аварий на АЭС, что не обещает «столбовой» дороги близкому «физическому» родственнику – термоядерной энергетике.

Научные основы атомной энергетики непосредственно связаны с рядом открытий в области физики, среди которых можно отметить следующие:

открытие явления радиоактивности на основе работ немецкого ученого В. К. Рентгена (1895);

открытие электрона английским физиком Дж. Дж. Томсоном (1897);

получение первого радиоизотопного источника электроэнергии английским физиком Г. Г. Дж. Мозли (1913);

первая ядерная реакция, проведенная английским физиком Э. Резерфордом (1919).

Первая в мире АЭС опытно-промышленного назначения мощностью 5 МВт была построена в 1954 г. в г. Обнинске (СССР). Как можно видеть, между первым открытием и первой промышленной установкой лежало почти 60 лет. И если бы не военные программы, связанные с атомным оружием, может быть, этот временной лаг был бы еще более значительным. Действительно, если брать за точку отсчета начало работы первого ядерного реактора CP-1 в декабре 1942 г. (США), имевшего целью получение оружейного плутония, то временной лаг сжимается до 14 лет.

Атомная энергетика, основанная на делении ядер, прошла путь от лабораторных опытов до производства электроэнергии в промышленных масштабах за два десятилетия. Если иметь в виду технологическую составляющую процесса получения энергии, то она состоит в следующем: топливо для реакторов деления состоит из урана в твердой форме, в котором проходит цепная реакция с участием нейтронов и с выделением энергии. Среди продуктов реакции оказывается большое количество радиоактивных актиноидов с большим временем полураспада, вплоть до нескольких тысяч лет. Реакторы деления сталкиваются с опасностью аварий с расплавлением активной зоны ядерного реактора, что налагает строгие требования на систему контроля и водяного охлаждения. С учетом этих потенциальных рисков, советским ученым и промышленности удалось построить первую в мире АЭС в 1954 г. (г. Обнинск Калужской области). За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 г. в Колдер-Холле (Великобритания) и через год вступила в строй АЭС мощностью 60 МВт в Шиппингпорте (США). К концу 1956 г. в мире был введен в строй 21 реактор общей мощностью 1,5 ГВт, и к середине 1960-х гг. в среднем в год вводилось около 10 новых реакторов. Пик активного строительства новых АЭС пришелся на 1975 г., когда были введены в строй 40 реакторов [8].

Необходимо отметить, что позитивная динамика в развитии атомной энергетики не приветствовалась экологическими организациями, особенно в промышленно развитых странах. Первая крупная авария, случившаяся в 1979 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (Three Mile Island) в США, способствовала формированию организованной оппозиции атомной энергетике, и к концу 1970-х гг. число строящихся АЭС сократилось, часть из которых была полностью остановлена, а для других отложены сроки строительства. В период до аварии в 1986 г. на Чернобыльской АЭС (СССР), в среднем в год вводилось от 12 до 20 новых реакторов, но большой выброс радиоактивности и человеческие жертвы подвергли серьезному потрясению сами основы ядерной энергетики. Тем не менее, к концу 1986 г. в 23 странах строилось 133 реактора мощностью 118 ГВт [8]. Следующее серьезное испытание на долю мировой ядерной энергетики выпало в 2011 г., когда в результате сильного землетрясения и последовавшего вслед за ним цунами, на АЭС «Фукусима-дайити» (Япония) была расплавлена активная зона реакторов на трех энергоблоках. Кроме самого природного фактора, недоработки в проекте и пробелы в системе регулирования также



оказались в числе основных причин этой крупной аварии. Согласно оценке отдельных экспертов из Массачусетского технологического института (Кембридж, США), в течение следующего десятилетия в развитых странах основной тренд развития ядерной энергетики примет форму продления срока службы работающих реакторов, умеренного повышения их мощности и скромного уровня нового строительства, что в целом не будет способствовать расширению ядерной энергетики в их энергобалансе¹³.

Сегодня, спустя 13 лет после аварии на АЭС «Фукусима-дайити», встает вполне закономерный вопрос о текущей ситуации в мировой ядерной энергетике и перспективах ее развития. Климатическая повестка, которая стала одной из основных при формировании энергетической политики промышленно развитых стран, в значительной степени ориентирована на поддержание возобновляемых источников энергии, прежде всего солнечной и ветряной. Нельзя не учитывать и политически мотивированные решения отдельных стран (прежде всего Германии и, в меньшей степени, Японии) о полном отказе от ядерной энергетики.

Прежде всего, отметим, что спустя 11 лет после последней крупной аварии, имеется большой список стран, в которых в 2022 г. на долю АЭС приходилось более 30 % от всей вырабатываемой электроэнергии¹⁴:

Страна	Электроэнергия, %
Франция	62,6
Словакия.....	59,2
Венгрия	47,0
Бельгия	46,4
Словения	42,8
Чехия	36,7
Швейцария	36,4
Финляндия	35,0
Болгария	32,6
Армения	31,0
Корея	30,4

В 2022 г. в мире эксплуатировалось 416 реакторов с общей установленной мощностью 374 641 МВт, на стадии строительства находилось 59 реакторов в 15 странах с общей мощностью 61 637 МВт. Всего было выведено из эксплуатации 210 реакторов мощностью 3178 МВт, в том числе в США – 41 реактор, Великобритании – 36, Германии – 33, Японии – 27 и России – 11¹⁵.

В табл. 1 приведена информация о состоянии атомной отрасли в 10 странах, имеющих наибольший парк действующих реакторов. Как можно видеть из табл. 1, изменился географический тренд мировой ядерной энергетики: наиболее активное развитие происходит на азиатском континенте. Китай, Индия, Турция, Россия, Египет и Бангладеш планируют ввести в строй 46 реакторов.

Рисунок показывает более чем 30-летнюю динамику изменения доли атомной генерации в мировом производстве электроэнергии и отдельных странах, активно развивающих этот сегмент энергетики. Видно, что быстрый рост ядерной энергетики достиг своего пика в 1996 г., когда его доля в мировом производстве электроэнергии составила 17,7 %. После этого в течение почти 20 лет эта доля снижалась, пока не стабилизировалась в 2015 г. на уровне около 10 %. Япония пережила самое драматическое падение этого

¹³ Joskow, Paul L., Parsons, John E. The Future of Nuclear Power After Fukushima, *Economics of Energy and Environmental Policy*. 1(2) (2012) 1–30.

¹⁴ IAEA Share of Electricity Generation in 2022. Режим доступа: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx> (дата обращения: 25.05.2024).

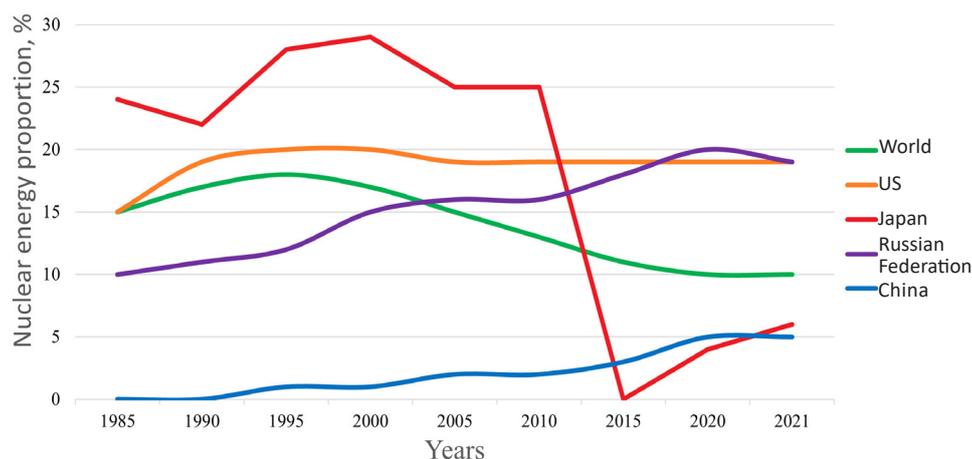
¹⁵ IAEA PRIS Country statistic. Режим доступа: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx> (дата обращения: 25.05.2024).

Таблица 1

Состояние атомной отрасли в отдельных странах

Страна	Количество реакторов			Мощность, МВт		
	В работе	Выведены	Строятся	В работе	Выведены	Строятся
США	94	41	0	96952	19976	0
Франция	56	14	1	61370	5549	1630
Китай	56	0	25	54152	0	26301
Россия	36	11	4	26082	4882	3850
Корея	26	2	2	25825	1237	2680
Индия	20	0	7	6920	0	5398
Канада	19	6	0	13661	2143	0
Украина	15	4	2	13107	3515	2070
Япония	12	27	2	11046	17128	2653
Великобритания	9	36	2	5883	7755	3260

Примечание. Таблица составлена авторами по данным, приведенным в источнике: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>



Динамика доли ядерной энергетики в производстве электроэнергии в мире в целом (World) и в отдельных странах

сектора энергетики после 2011 г. США и Россия смогли за этот период увеличить долю отрасли в выработке электроэнергии до 19 %, а Китай, начав практически с нуля, быстро наращивает мощности атомной отрасли.

В течение почти полувека основной доминантой развития мировой ядерной энергетики было укрупнение блоков с единичной мощностью от 500 до 1600 МВт и создание на их основе мощных атомных станций, стоимостью до 10 млрд. долларов. На рубеже веков этот тренд стал смещаться в сторону создания атомных станций малой мощности: плавучих, транспортабельных и стационарных.

Например, для России предварительные оценки показывают, что общая потребность для покрытия дефицита электрической и тепловой энергии за счет атомных станций малой мощности на период до 2030 г. для северо-востока страны составляет порядка 20 ГВт (100 – 2000 блоков мощностью 10 – 100 МВт) [9]. Россия имеет определенный задел в этом новом сегменте. В декабре 2019 г. началась эксплуатация плавучего энергетического блока «Академик Ломоносов», который предназначен для работы в составе плавучей атомной теплоэлектростанции и представляет собой новый класс энергоисточников на базе российских технологий атомного судостроения. В октябре 2021 г. «Атомэнергомаш»

заключил контракт с «Атомфлотом» на поставку модернизированных плавучих энергоблоков, которые будут обеспечивать электроэнергией Баимский горно-обогатительный комбинат на Чукотке, на основе плавучих атомных станций малой мощности с реакторами РИТМ-200. В 2026 г. должен вступить в строй опытный демонстрационный (ОД) реактор на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 (проект «Прорыв», г. Северск), мощностью 300 МВт – АЭС с замкнутым топливным циклом¹⁶. В США аналогичными являются проект TerraPower с быстрым натриевым реактором Sodium и проект «Xe-100» от X-energy. Кроме того, изучаются возможности строительства американских малых модульных реакторов компании NuScale в Румынии, Болгарии, Польше, Казахстане, Украине. Франция также анонсировала планы по финансированию разработок малых модульных реакторов¹⁷.

В качестве основных преимуществ малых АЭС считаются следующие:

возможность производства для них реакторных модулей крупными сериями в виде законченных блоков, что сокращает сроки и снижает сложность строительства АЭС;

потенциальная возможность быть дополняющим партнером для ветро-солнечной энергетики;

освоение новых рыночных ниш, которые коммерчески невозможны для больших АЭС;

возможность постепенного наращивания мощностей, что значительно упрощает поиск финансирования.

В связи с ростом интереса к разработке различных конструкций малых модульных реакторов, уже имеется обобщенная и всеобъемлющая экономическая модель от первого в своем роде малого модульного реактора (ФОАК) до n -го в своем роде (НОАК), учитывающая номинальную мощность, конфигурацию станции и финансовые условия, в которых реализуется проект [10]. В табл. 2 приведены оценочные приведенные затраты (LCOE) для малых АЭС, планируемых к вводу в эксплуатацию к 2025 году.

Таблица 2

Оценочные приведенные затраты для малых АЭС, планируемых к вводу в эксплуатацию к 2025 году

Страна	LCOE, \$/(МВт·ч)		
	$d = 3,0\%$	$d = 7,0\%$	$d = 10,0\%$
Франция	45,3	71,1	96,9
Япония	61,2	86,7	112,1
Южная Корея	39,4	53,3	67,2
Словакия	57,6	101,8	146,1
США	43,9	71,3	98,6
Китай	49,9	66,0	82,1
Россия	27,4	42,0	56,6
Индия	48,2	66,0	83,9

Обозначения: LCOE (Levelized Cost of Energy) – средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего цикла АЭС (включает все возможные инвестиции, затраты и доходы); d – ставка дисконтирования, т. е. процентная ставка, используемая для пересчета будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости.

Примечания. 1. LCOE здесь оценивается при коэффициенте мощности 85 % в текущих ценах 2018 г. 2. Таблица составлена авторами по данным литературного источника [11].

¹⁶ ОД-реактор на быстрых нейтронах Брест-ОД-300 (проект «Прорыв», г. Северск, Томская область). Режим доступа: https://psk-holding.ru/object/energeticheskie_obekty/od-reaktor-na-bystrykh-neyronakh-brest-od-300-proekt-proryv-g-seversk-tomskaya-oblast/ (дата обращения: 27.05.2024).

¹⁷ Мировая атомная энергетика в 2021 году. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/645793/> (дата обращения: 27.05.2024).

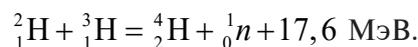
Как видим, ядерная энергетика в настоящее время переживает определенный подъем. Этот новый тренд связан с двумя факторами: во-первых, повышается надежность реакторов и всех систем АЭС; во-вторых, создается новая продуктовая ниша в виде малых АЭС различной мощностной конфигурации, что существенно расширяет круг потенциальных потребителей.

Повторит ли термоядерная энергетика путь атомной отрасли? Это во многом зависит от скорости преодоления научных, технологических и даже экономических барьеров, которые стоят сегодня перед ней.

Современное состояние научных исследований и технологий в сегменте термоядерного синтеза

Предварительные замечания. Термоядерный синтез – процесс, который дает энергию Солнцу и всем звездам, на Земле можно осуществлять с помощью лития и дейтерия (изотоп водорода) в качестве топлива. Оба эти вещества распространены на Земле (первое в земной коре, второе в морской воде), и они могут удовлетворять потребность человечества в энергии без сжигания углеводородов. На самом деле реакция синтеза происходит между изотопами водорода: дейтерием D и тритием T. Если дейтерий можно достаточно легко получать из воды, то тритий можно нарабатывать прямо в реакторе. Действительно, нейтроны, выделяемые в результате (D-T)-синтеза, поглощаются в литиевом blankets, окружающем реактор. При этом вырабатывается тритий для поддержания (D-T)-реакции, так что реально расходуется литий, который одновременно является теплоносителем. Выход энергии очень велик: 1 г дейтерий-тритиевого топлива производит столько же тепла, сколько 8 т нефти.

Реакция, осуществимая при наиболее низкой температуре – это реакция синтеза дейтерия D (${}^2_1\text{H}$) с тритием T (${}^3_1\text{H}$):



Ядра дейтерия и трития сливаются, образуя ядро гелия He (${}^4_2\text{He}$, альфа-частица) и высокоэнергетического нейтрона 1_0n . Такая реакция дает значительный выход энергии (17,6 МэВ).

Управляемый термоядерный синтез возможен при одновременном выполнении двух условий (для реакции D-T):

1. Скорость соударения ядер соответствует температуре плазмы T , т. е.

$$T > 108 \text{ К};$$

2. Соблюдается критерий Лоусона, а именно –

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3}\cdot\text{с},$$

где n – плотность высокотемпературной плазмы, τ – время удержания плазмы в системе.

Время τ зависит от размера установки и коэффициентов диффузии (температуроупругости) следующим образом:

$$\tau \sim a^2 / \chi,$$

где a – размер установки, χ – коэффициент температуропроводности, обратно пропорциональный квадрату индукции магнитного поля.

Следовательно, для эффективного синтеза необходимы большие установки с сильным магнитным полем.

Прирост энергии от плазмы, подвергающейся термоядерному синтезу, принято обозначать буквой Q , т. е. Q – это показатель, который сравнивает мощность, необходимую для работы термоядерной плазмы, с мощностью, выделяемой самой термоядерной плазмой.

Также различают «научную» (scientific) и «инженерную» (engineering) величины Q :

Q_{sci} сравнивает энергию, поступающую в плазму, с энергией, выделяемой на выходе; Q_{eng} учитывает энергию, поступающую и выходящую из всей термоядерной электростанции.

Ученые трудились последние 60 лет с целью подобрать наилучшие условия для проведения реакции.

Устройства с магнитным удержанием плазмы. Сейчас наиболее перспективным считается устройство токамак, предложенное в СССР в Курчатовском институте Академии наук СССР (г. Москва), в котором топливо, нагретое до 100 – 200 млн. град., помещено в тороидальное магнитное поле.

Термин «токамак» расшифровывается как тороидальная камера с магнитными катушками.

Концепция магнитного удержания плазмы была выдвинута в СССР академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом. Согласно этой концепции, заряженные частицы плазмы удерживаются в токамаке магнитным полем, создаваемым внешними катушками, а нагрев плазмы осуществляется током, протекающим по плазме.

При таких температурах вещество находится в плазменном состоянии, когда электроны полностью «оторваны» от ионов. Установки токамак первое время работали только в Курчатовском институте. В 1969 г. под руководством Л. А. Арцимовича на токамаке Т-3 была достигнута температура 10 млн. град. Английские ученые из национальной лаборатории в Калхэме (Culham) произвели измерения на Т-3 с помощью своей аппаратуры и подтвердили этот факт, в который поначалу отказывались верить. После этого в мире начался настоящий бум токамаков.

В СССР в 1975 году, в Курчатовском институте, был построен токамак следующего поколения Т-10; затем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) появились токамаки ТУМАН-3М, ФТ-2 и сферический токамак Глобус-М. В декабре 2020 г. в Курчатовском институте был запущен современный токамак Т-15МД.

В настоящее время основной целью российской термоядерной программы является создание токамака с реакторными технологиями (РТТ). Предполагается разработка и интеграция в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий.

При температурах 100 – 200 млн. град. вещество находится в плазменном состоянии. Заряженные частицы, электроны и ионы удерживаются в токамаке магнитным полем. В токамаке-реакторе происходит синтез и выделяется огромное количество энергии. Конечно, удерживать «солнце в ловушке» – непростая задача, особенно если учесть, что должна быть спроектирована система для выработки электроэнергии по конкурентоспособной цене. Зона удержания плазмы в токамаке представляет собой камеру в форме бублика. В ней образуется плазменное кольцо, по которому циркулирует большой электрический ток. Плазма удерживается мощным магнитным полем как тороидальным, созданным внешними токами, так и полоидальным (поле направлено вдоль линий, проходящих через полюсы сферической системы координат), созданным токами по плазме.

Установки с инерционным удержанием плазмы. Принципиально другой, соперничающий с токамаками, способ получения термоядерной энергии, – сжатие и разогрев капсул с топливом излучением мощных лазеров. Впечатляющие успехи в этой области были достигнуты на «Национальной установке зажигания» в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory's National Ignition Facility) в Калифорнии, США. Однако такой метод синтеза не может работать стационарно, что является требованием к будущей электростанции.

Преимущества термоядерного синтеза можно подытожить следующим образом: запасы топлива неисчислимы и равномерно распределены по Земле. Радиоактивные отходы при реакции синтеза появляются только как результат активации элементов конструкции реактора нейтронами, они обладают малой радиационной токсичностью. В противоположность реакторам деления, аварии с расплавлением активной зоны на реакторах синтеза невозможны, нет почти никакой опасности распространения радиоактивных отходов, кроме возможной, но маловероятной утечки трития.

В 1970-е гг. американские исследователи произвели оценку, доказав, что для получения коммерческой термоядерной энергии требуются ежегодные инвестиции в 2 – 3 млрд. долларов на период примерно до 1990 – 2005 г. (в зависимости от прилагаемых усилий). Также они оценили минимальный уровень финансирования, необходимый для исследований в этой области, которые хоть когда-нибудь увенчались бы успехом. К сожалению, бюджет исследований термоядерного синтеза оставался меньше этой планки на протяжении более чем тридцати лет.

Препятствия, стоящие на пути создания термоядерной энергетики. Уже прошло более пятидесяти лет, а мир так и не создал термоядерную энергетику. И причины этого кроются не только в сфере финансов. Есть причины научного и технологического характера, а также сложные задачи системного проектирования будущих станций.

Причины научного характера. Прежде всего, следует выделить проблему турбулентности плазмы. В установках для термоядерного синтеза, в силу требуемых для него высоких температур, необходимо создавать плазму. По сравнению с обычными жидкостями, в плазме задача усложняется из-за взаимодействия заряженных частиц посредством электромагнитного поля. Турбулентность – внутренне нелинейное и сильно разупорядоченное движение среды, возникающее только в открытых системах и имеющее много степеней свободы в пространстве и времени. Около 10 – 15 лет назад новые возможности суперкомпьютерных вычислений начали помогать в постижении тайны турбулентности. Задача математического описания турбулентности усложняется тем, что на термоядерную плазму оказывают влияние сжимаемость, анизотропия и неоднородность среды, вызванные вращением, токами по плазме и прочими факторами, в том числе влиянием стенок установки. Переход в описании турбулентности от жидкости к намагниченной многочастичной плазме осуществляется с помощью доступных ныне численных методов и мощных суперкомпьютеров. На сегодняшний день в целом достигнуто понимание механизмов турбулентности, а, следовательно, механизмов удержания плазмы в магнитных ловушках. Однако стоит отметить, что пока не хватает некоторых экспериментальных данных, необходимых для полной проверки этих механизмов. Кроме того, термоядерная плазма реакторов может проявлять пока неизвестное и трудно предсказуемое поведение. До сих пор почти все исследования проводились на плазме, нагретой внешним источником. По состоянию на март 2023 года только один объект – токамак JET – создал плазму с заметным выходом нейтронов.

Таким образом, большая часть научного понимания поведения плазмы на Земле основана на моделировании и экстраполяции современных результатов. При этом вполне возможно, что плазма в термоядерных энергетических устройствах будет вести себя иначе.

Причины технологического характера. Препятствия на пути развития термоядерной энергетики связаны и с разработкой новых материалов и технологий, с которыми человечество ранее не сталкивалось. Ключевой проблемой для развития термоядерной энергетики является то, что термоядерные энергетические системы, особенно компоненты, которые подвергаются непосредственному воздействию плазмы, должны будут выдерживать экстремальные физические нагрузки в течение длительных периодов времени, чтобы генерировать коммерческую электроэнергию. На коммерческой термоядерной электростанции материалы должны иметь сроки службы хотя бы несколько лет (а лучше дольше), чтобы избежать частого ремонта или замены компонентов. Однако доступные и существующие на сегодня материалы не выдерживают тех высоких напряжений, которые создает термоядерная плазма, что делает невозможным их коммерческое использование. Без достижений в области материаловедения будет невозможно построить термоядерные энергетические системы, которые бы смогли надежно производить коммерческую электроэнергию [12]. Например, магнитное поле в реакторе должно создаваться с помощью сверхпроводящих катушек, иначе омические потери, связанные с протеканием токов в таких катушках, будут слишком велики – ведь реактор должен вырабатывать энергию все время, а значит работать в стационарном режиме. Огромные сверхпроводящие катушки должны при этом охлаждаться до гелиевых температур, иметь заданную конфигурацию, выдерживать огромные механические напряжения и т. п.

Надо также признать, что получение энергии термоядерного синтеза идет по нескольким направлениям, как всякий научный поиск. Как уже было сказано выше, основных направлений пока два: использование магнитного поля для управления плазмой (магнитное удержание – токамаки) и использование лазера или электрических разрядов для сжатия плазмы (инерционное удержание).

Термоядерный синтез с инерционным удержанием. В данном случае используются мощные лазеры или электрические разряды для сжатия небольшой капсулы термоядерного топлива до экстремальных температур и давлений на короткое время. Именно при использовании мощных лазеров впервые показатель Q_{sci} достиг значения, превышающего

единицу $(1,5)^{18}$; в декабре 2022 г., в ходе экспериментов по термоядерному синтезу в Национальной установке зажигания (см. выше), в США. Как уже отмечено, токамак — это концепция магнитного удержания, которая удерживает плазму в форме тора (бублик) с помощью магнитных полей. Хотя рекорд Q_{sci} для токамаков составляет всего 0,67, поддерживающие технологии являются одними из самых передовых для термоядерного синтеза. Преимущество токамака в том, что его проще моделировать и создавать, чем другие конструкции, поскольку он тороидально симметричен. В настоящее время на базе этой концепции проводятся исследования в США (DIII-D, Сан-Диего, NSTX-U, Принстон), Японии (JT-60SA), Корее (KSTAR), Китае (EAST), Великобритании (MAST-Upgrade), Германии (ASDEX-Upgrade и России (Т-15МД, Глобус-М2) и др.

Стеллараторы. Это еще один тип концепции термоядерного синтеза с магнитным удержанием. Такой тип поддерживает плазму с помощью скрученных магнитов, которые сложно смоделировать и построить. Эта концепция активно продвигается в Германии (Wendelstein 7-X), Японии (Large Helical Device) и США (Helically Symmetric Experiment).

Z-пинч. Это гибридный подход, в котором для магнитного удержания и сжатия плазмы используется электрический ток. Производительность машин Z-пинча значительно ниже, чем у токамаков и термоядерного синтеза с инерционным удержанием. Экспериментальная конструкция не требует внешних магнитных полей, что обеспечивает более простую конструкцию и потенциально более низкую стоимость, по сравнению с другими концепциями, однако работа возможна только в импульсном режиме. Наиболее активно эта концепция разрабатывается в США (Lawrence Livermore National Laboratory, Sandia National Laboratories).

Сложные задачи системного проектирования. Они обусловлены необходимостью разработки систем для эффективного извлечения энергии из реакции термоядерного синтеза и обеспечения экономически состоятельного источника электроэнергии. Сама сложность термоядерных систем означает, что решение одной проблемы может выявить другую.

Можно привести следующие примеры таких сложных задач проектирования термоядерной энергетической системы:

- извлечение побочных продуктов термоядерного синтеза из плазмы;
- создание плазменных систем, которые легко обслуживать и заменять;
- управление экстремально высокими и низкими температурами [12].

Для решения вышеуказанных проблем в области термоядерного синтеза был инициирован ряд международных исследовательских программ. Среди них надо отметить в первую очередь Европейскую термоядерную программу (European fusion programme), основная цель которой — создание действующего реактора для демонстрации научной, технологической и экономической осуществимости термоядерной энергетики. Основой этой программы является серия токамаков: JET (Joint European Torus), ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) и DEMO (DEMONstration Power Plant).

Среди перечисленных JET — самый большой токамак в мире (работает с 1983 г.). Его основное предназначение — это реализация экспериментальных программ с целью обоснования физических основ ITER и проверка конкретных технических вариантов этого проекта.

ITER создается как машина «следующего шага», которая должна продемонстрировать научную и технологическую осуществимость термоядерного синтеза. Предполагается, что эти цели будут достигнуты за счет длительного поддержания (D-T)-плазмы в течение нескольких сотен секунд. Параллельно с ITER необходимо построить международную установку по облучению термоядерных материалов (IFMIF) для тестирования и квалификации конструкционных материалов, необходимых для третьего этапа DEMO.

DEMO должно стать первым термоядерным устройством, которое будет коммерчески рентабельным и вырабатывать значительное количество электроэнергии в результате термоядерного синтеза.

¹⁸ Энергия для питания лазеров составляла около 300 МДж, поэтому, если бы она использовалась в термоядерной электростанции, то Q_{eng} был бы не выше 0,01. Это означает, что в ходе эксперимента нужно было бы произвести как минимум в 100 раз больше энергии только для того, чтобы учесть энергию, необходимую для его запуска.

Проект ITER реализуется на юге Франции. Его оценочная стоимость составляет 20 млрд. евро, и он является одним из самых масштабных научных проектов в истории. В его реализации принимают участие Евросоюз, Индия, Китай, Россия, США, Южная Корея и Япония. Если этот проект будет успешным, реактор будет производить полгигаватта энергии синтеза и сделает возможной разработку коммерческих реакторов. Целью ITER является создание горячей плазмы, в которой тепло, необходимое для поддержания температуры в реакторе, возникает в самом реакторе как результат термоядерного синтеза. В цикле работы реактора вначале создается ионизованный газ, затем возникает ток по плазме, и ее нагревают с помощью внешних источников тепла до температуры, необходимой для синтеза; затем внешний нагрев отключают, и температура плазмы поддерживается за счет реакций синтеза. Для поддержания горячей плазмы доступно примерно 25 % энергии, выделяемой при синтезе. Строгий критерий достижения самоподдерживающейся реакции в термоядерном реакторе на такие параметры, как температура, концентрация и время удержания энергии в плазме, хорошо известен и носит название критерия Лоусона. Для проекта ITER планируется значение Q_{sci} более 10.

Реализация проекта ITER была бы невозможна без Концептуального исследования европейских электростанций (PPCS), проведенного в период 2001 – 2004 гг. [13, 14]. В рамках данного исследования были отработаны четыре модели установок PPCS A–D, основанные на концепции токамака.

Каждую модель силовой установки характеризуют два основных элемента: бланкет¹⁹ и дивертор²⁰. Модели A и B основаны на ограниченной экстраполяции показателей физики плазмы, по сравнению с проектными показателями для ITER, и на краткосрочных технологических решениях для бланкета. Модели C и D основаны на последовательно более совершенных концепциях плазменной конфигурации и технологии материалов. Их технология основана, соответственно, на концепции «двойного» бланкета и концепции «самоохлаждающегося» бланкета. В рамках данного исследования были разработаны две ключевые инновационные концепции:

первая представляет собой схему плановой замены бланкета и дивертора, которая показывает потенциал хорошей общей эксплуатационной готовности установки (не менее 75 %);

вторая представляет собой концептуальный проект дивертора с гелиевым охлаждением, который допускает тепловые нагрузки (до 10 МВт/м²), вдвое превышающие таковые, ранее предусмотренные для концепций с гелиевым охлаждением.

Эти исследования также позволили определить основные этапы термоядерного синтеза, которые необходимо пройти до начала строительства термоядерной станции (это касается, прежде всего, аттестации материалов и различных систем) и оценить технологические и инженерные проблемы, стоящие за каждым этапом. В частности, в качестве ключевых определены внутренние компоненты (бланкет и дивертор), а программа технологических исследований и разработок скорректирована с целью анализа всех компонентов, в том числе тех, которые находятся за пределами основного корпуса станции.

Горизонты промышленного освоения термоядерной энергетики

Скорость решения научных и технологических задач, часть из которых была затронута выше, является основным фактором, предопределяющим временные горизонты появления первых термоядерных станций. В настоящее время есть разные оценки тех временных горизонтов, когда будут созданы первые термоядерные станции, способные генерировать и передавать электроэнергию в распределительные системы. Нескольким поколениям физиков известна фраза о том, что «термоядерный синтез будет доступен через 30 лет».

В поисках ответа на этот вопрос международная группа исследователей изучила самые значимые инициативы в области термоядерного синтеза с 1985 по 2022 г., используя 49

¹⁹ Бланкет – это компонент, в котором нейтроны, образующиеся в процессе термоядерного синтеза в горячей плазме, замедляются, передают свою энергию в виде тепла и поглощаются атомами лития с образованием промежуточного топлива – трития.

²⁰ Дивертор – это компонент, ответственный за отвод из плазменной камеры продуктов реакции термоядерного синтеза, главным образом гелия, и связанной с ним тепловой энергии.

источников. Обработка исходных данных на двух классах моделей, а именно – с постоянным прогрессом (Constant Progress Model) и динамическим (Dynamic Progress Model), показала, что «30 лет назад считалось, что термоядерный синтез будет промышленно освоен через 19,3 года; 20 лет назад предсказывался временной период в 28,3 года; 10 лет назад – 27,8 лет; теперь ученые полагают, что до освоения термоядерной энергии осталось всего 17,8 лет» [15]. Если обратиться к американским источникам, то указываются следующие сроки появления первых промышленных установок, способных генерировать электроэнергию: середина 2040-х²¹, с 2035 по 2040 гг.²² и даже начало 2030-х²³. Согласно оценкам, проведенным Ассоциацией термоядерной промышленности (Fusion Industry Association), коммерческое использование термоядерной энергии начнется с 2031 по 2035 годы, а отдельные страны, имеющие собственные программы термоядерного синтеза, указывают 2050 год как стартовую точку коммерческой эксплуатации первых термоядерных станций [12].

Если проект ITER будет завершен в 2040 г., как это планируется, то, скорее всего, следует ожидать, что потребуется не менее 5 лет для накопления критически необходимого объема экспериментальных данных, чтобы можно было приступить к производству первого промышленного образца термоядерной станции; поэтому окончание срока освоения технологий к 2050 г. кажется вполне правдоподобным.

Что касается самой экономической составляющей термоядерной энергетики, то текущие оценки носят лишь вероятностный характер. И это связано в первую очередь с большой неопределенностью, которая присутствует во всем: от масштабов самой станции до состояния глобальной энергетической системы. Основные оценки капитальных затрат на термоядерную установку были даны после публикации в 2005 г. итогового отчета концептуального исследования европейской термоядерной электростанции – PPCS [13]. Эти оценки лежат в пределах от 2700 до 9700 долларов за киловатт мощности, в предположении, что мощности электростанций составят от 1000 до 1500 МВт. Согласно сведениям в этом же отчете, наибольшая доля в общих капитальных затратах приходится на две составляющие:

стоимость магнитов и системы охлаждения,
возведение здания и подготовка строительной площадки.

Если предположить, что капитальные затраты на киловатт мощности почти не зависят от размера, то расчетные капитальные затраты на термоядерную электростанцию мощностью 1000 МВт будут варьироваться от 2,7 до 9,7 млрд. долларов [13, 16, 17].

В современных экономических системах важным фактором коммерческой окупаемости проектов является развитость используемых в них технологий. Поэтому следует ожидать, что по мере развития технологий, установки термоядерного синтеза будут снижаться в цене. Поскольку масштабы производства зависят от зрелости технологий, то априори можно предположить, что первые промышленные образцы будут более дорогими, чем последующие.

В случае с созданием промышленных установок термоядерного синтеза, критически важным следует считать время прохождения через «долину смерти» – периода времени между фундаментальными исследованиями и коммерциализацией нового продукта, характеризуемого, как правило, дефицитом финансирования. В работе [18] показано, например, что вопрос о выходе на рынок наиболее актуален на ранней стадии, когда с технологической точки зрения термоядерный синтез готов предложить первое поколение, например 10 электростанций. По мнению автора этого исследования, инвесторы не станут заказывать станции второго поколения, например, в количестве 100 единиц, не

²¹ Fusion Energy Sciences Advisory Committee, Powering the Future, Fusion & Plasmas: A Long-Range Plan to Deliver Fusion Energy and to Advance Plasma Science. Режим доступа: http://firefusionpower.org/DRAFT_Fusion_and_Plasmas_Report_120420.pdf (дата обращения: 10.06.2024).

²² Bringing Fusion to the U.S. Grid. Режим доступа: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25991/bringing-fusion-to-the-us-grid> (дата обращения: 10.06.2024).

²³ White House, Fact Sheet: Developing a Bold Vision for Commercial Fusion Energy. Режим доступа: <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/03/15/fact-sheet-developing-a-bold-vision-for-commercial-fusion-energy/> (дата обращения: 10.06.2024).

увидев результаты работы 10 станций первого поколения. Это означает, что между двумя поколениями станций будет существенный временной лаг, поскольку только опытная эксплуатация может обеспечить технологическую эволюцию изделия. В этой же работе исключается вариант ускоренного инновационного цикла, как, например, для солнечной и ветряной энергетики, когда в периоды наиболее быстрого роста, имело место удвоение мощностей каждые 2,5 года, поскольку термоядерные электростанции – это большие и сложные установки, строительство которых требует длительного времени и больших единовременных вложений.

Тем не менее, в 2022 г. в США была принята амбициозная по своим замыслам и временным рамкам программа²⁴, направленная на ускоренное освоение энергии термоядерного синтеза: «Смелое десятилетнее видение коммерческой термоядерной энергетики» (Bold Decadal Vision for Commercial Fusion Energy). Эта программа ставит целью разработку десятилетней стратегии по ускорению реализации коммерческой термоядерной энергии, обеспечение жизнеспособности коммерческой термоядерной энергии в координации с частным сектором и обеспечение финансирования в размере 50 млн. долларов США, которые будут поддерживать фундаментальные научные и технологические исследования, связанные с высокоприоритетными вопросами будущей пилотной термоядерной установки. Согласно отдельным источникам, за 70 лет, начиная с 1951 года, США вложили около 35 млрд. долларов в исследования по термоядерной энергетике, причем пик таких вложений пришелся на 1970-е гг., когда ежегодное финансирование росло с 200 млн. в 1970 г. до 1400 млн. долларов в 1980 г. [19]. Правда, среди самих американских физиков сразу появился большой скепсис относительно успешности такой программы по двум причинам: во-первых, принцип «параллельной» работы по созданию технологий и материалов здесь просто не работает, и во-вторых, для управления термоядерным синтезом необходимо иметь достаточно большую установку [20].

Несмотря на определенный скепсис со стороны отдельных ученых, которые считают, что только на больших установках можно достичь весомых практических результатов по управлению термоядерным синтезом, частные коммерческие структуры в лице стартапов рассматривают как возможный вариант ускорения инновационного цикла создание компактных термоядерных установок. Эксперты отмечают резкий рост стартапов в сегменте создания компактной термоядерной энергетики за последние 5 – 6 лет, а 32 самые успешные компании уже привлекли только частных инвестиций в размере 6,2 млрд. долларов²⁵.

Наиболее крупным стартапом является американская компания Commonwealth Fusion Systems, которая намерена построить небольшую термоядерную электростанцию на основе конструкции токамака ARC, где будут использованы мощные магниты, изготовленные из высокотемпературных сверхпроводников²⁶. Самые агрессивные стартапы – Commonwealth Fusion Systems, Avalanche Energy, TAE Technologies, Helion Energy (США), General Fusion (Канада) смогли мобилизовать более 3,6 млрд. долларов²⁷.

Необходимо отметить, что такие смелые намерения базируются на отдельных научных достижениях, которые получены вне рамок ИТЕР. Так, консорциум, состоящий из исследовательских и бизнес-структур, а именно – Tokamak Energy Ltd (Великобритания), Princeton and Oak Ridge National Laboratory (США) и Institute for Energy and Climate Research (Германия) на сферическом токамаке ST40, реактор которого имеет диаметр 0,8 м, достигли температуры в 100 млн. К [21]. Все большее распространение получает совместная деятельность частных и исследовательских структур: в Японии Токийский

²⁴ Там же.

²⁵ \$6.2 Billion Fusion Energy Funding Race: Turning the Dream of Creating a Star on Earth into Reality. Режим доступа: <https://www.nuclearbusiness-platform.com/media/insights/62-billion-fusion-energy-funding-race-turning-the-dream-of-creating-a-star-on-earth-into-reality> (дата обращения: 10.06.2024).

²⁶ Clery D. Fusion startup plans reactor with small but powerful superconducting magnets. Commonwealth Fusion Systems announces site for compact reactor. Режим доступа: <https://www.science.org/content/article/fusion-startup-plans-reactor-small-powerful-superconducting-magnets> (дата обращения: 10.06.2024).

²⁷ Wesoff E. This tiny fusion reactor is made out of commercially available parts Nuclear Startup Avalanche Energy has modest funding, a skeleton crew, a pocket-sized prototype — and grand ambitions. Режим доступа: <https://www.canarymedia.com/articles/nuclear/this-tiny-fusion-reactor-is-made-out-of-commercially-available-parts> (дата обращения: 12.06.2024).



технологический институт (Tokyo Tech) и EX-Fusion Inc. (EX-Fusion) создали совместный исследовательский кластер, занимающийся разработкой жидкометаллических устройств (liquid metal devices) для реализации коммерческих термоядерных реакторов на лазерах, а сотрудничество компаний Sumitomo Corporation и Tokamak Energy позволит утвердиться в качестве лидера мирового рынка в области финансирования, строительства и эксплуатации термоядерных электростанций, а кроме того, – ускорить коммерциализацию и промышленное производство своих сферических токамаков в конце 2030-х гг.²⁸

Заключение

Освоение термоядерной энергии в промышленных масштабах зависит от решения многих вопросов, которые лежат в плоскости фундаментальных исследований, создания передовой экспериментальной базы, новых материалов и технологий. Крайне важно также сохранять кооперацию ученых тех стран, которые имеют собственные научные программы в области термоядерного синтеза. Определенным недостатком сложившейся системы исследований в области термоядерного синтеза, в силу значительного привлечения к ним государственных средств, надо признать линейную модель инноваций, в которой коммерческие аспекты не учитываются до более поздних стадий разработки.

Это стало основной причиной, по которой многие инициативы частного сектора в форме стартапов авансируют сейчас очень сжатые сроки в освоении термоядерной энергии, основываясь прежде всего на новых методах технологического планирования, когда технологии разрабатываются гибко и итеративно для достижения явной коммерческой цели [22]. Дальнейшие темпы развития будут в значительной степени зависеть от того, как быстро будет накоплена та критическая масса знаний и технологий, которые развитая индустрия могла бы тиражировать в промышленных масштабах. Эта критическая масса знаний и технологий может создаваться как в рамках программ международного сотрудничества (ITER), так и в рамках отдельных национальных программ (китайские токамак EAST и «HH70», немецкий стелларатор W7-X, американский Ignition Facility) или научных стартапов, подобно тем, которые на сферическом токамаке ST40 получили хорошие результаты. В случае последних двух видов программ мы являемся свидетелями существенной компрессии во времени, в течение которого получают новые фундаментальные знания. Именно эта компрессия во времени может значительно ускорить появление первых термоядерных станций. Как показало развитие солнечной и ветряной энергетики, которые получили высокие темпы развития в период активного инвестирования со стороны частного сектора, именно вовлеченность бизнеса существенно ускоряет темпы создания новых технологий генерации энергии.

Единственный фактор, который может затормозить развитие новой энергетики, – это политика научного изоляционизма, которая становится европейской практикой²⁹. К счастью, это не относится к проекту ITER, где активное международное сотрудничество не прекращается. Тем не менее, Российская академия наук и многопрофильный холдинг «РОСАТОМ» должны активно развивать национальную термоядерную программу. Очевидно, что создание достойных условий, в том числе хорошая экспериментальная база, будет только отвечать национальным интересам России.

²⁸ White S. Tokamak Energy and Sumitomo Corporation sign collaboration agreement to accelerate industrialisation of fusion energy. Режим доступа: <https://tokamakenergy.com/2023/07/27/tokamak-energy-and-sumitomo-corporation-sign-collaboration-agreement-to-accelerate-industrialisation-of-fusion-energy/> (дата обращения: 10.06.2024); Japan drives laser fusion energy closer to commercialization. Tokyo Tech and Ex-Fusion establish R&D cluster to develop laser fusion reactors. Режим доступа: <https://www.titech.ac.jp/english/news/2023/067617> (дата обращения: 10.06.2024).

²⁹ В марте 2024 г. ЦЕРН объявил о расторжении контрактов с 500 российскими учёными, что принесёт вред самим программам ядерных исследований. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/society/articles/2024/03/20/1026718-tsern-prekratit-sotrudnichestvo-s-rossiiskimi-uchenimi> (дата обращения: 30.05.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Devezas T., Ruão H., Gonçalves J., Bento B., Liana H.** How green is the green energy transition? On the road to decarbonization // Devezas T., Leitro J. C. C., Yegorov Y., Chistilin D. (Eds.) Global challenges of climate change (Chapter). Book Series “World-Systems Evolution and Global Futures”. Vol. 1. Cham, Switzerland: Springer, 2022. Pp. 9–28.
2. IAEA (2023). World fusion outlook 2023. Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/FusionOutlook2023_web.pdf (Дата обращения: 24.05.2024).
3. **Pitron G.** The rare metals war: The dark side of clean energy and digital technologies. London: Scribe UK Publications, 2020. 288 p.
4. **Post R.** Controlled fusion research – an application of physics of high temperature plasmas // Reviews of Modern Physics. 1956. Vol. 28. No. 3. Pp. 338–362.
5. Critical materials factsheet, Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Режим доступа: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/material-resources/critical-materials-factsheet> (Дата обращения: 25.05.2024).
6. **Арцимович Л. А.** Избранные труды. Атомная физика и физика плазмы. М.: Наука, 1978. 302 с.
7. IEA (2021). Global hydrogen review 2021. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (Дата обращения: 26.05.2024).
8. Nuclear power development: History and outlook. IAEA Bulletin No. 3. Режим доступа: <https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/29-3/nuclear-power-development-history-and-outlook> (Дата обращения: 24.05.2024).
9. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2. Под ред. акад. РАН Саркисова А. А. М.: Академ-Принт, 2015. 387 с.
10. **Boldon L. M., Sabharwall P.** Small modular reactor: First-of-a-Kind (FOAK) and Nth-of-a-Kind (NOAK) economic analysis. Режим доступа: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6293982.pdf> (Дата обращения: 24.05.2024).
11. IEA (2020). Projected costs of generating electricity. Режим доступа: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf (Дата обращения: 26.05.2024).
12. Fusion energy: Potentially transformative technology still faces fundamental challenges. Режим доступа: <https://www.gao.gov/products/gao-23-105813> (Дата обращения: 25.05.2024).
13. **Maisonnier D.** A conceptual study of commercial fusion power plants. Final report of the European fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS). Режим доступа: https://www.academia.edu/98314122/A_conceptual_study (Дата обращения: 24.05.2024).
14. **Maisonnier D., Campbell D., Cook I., et al.** Fusion power plant studies in Europe // Nuclear Fusion. 2007. Vol. 47. No. 11. Pp. 1524–1532.
15. **Takeda S., Keeley A. R., Managi S.** How many years away is fusion energy? A review // Journal of Fusion Energy. 2023. Vol. 42. No. 1. P. 16.
16. **Bustreo C., Casini G., Zollino G., Bolzonella T., Piovon R.** FRESCO, a simplified code for cost analysis of fusion power plants // Fusion Engineering and Design. 2013. Vol. 88. No. 12. Pp. 3141–3151.
17. **Han W. E., Ward D. J.** Revised assessments of the economics of fusion power // Fusion Engineering and Design. 2009. Vol. 84. No. 2–6. Pp. 895–898.
18. **Cardozo N. J. Lopes.** Economic aspects of the deployment of fusion energy: The valley of death and the innovation cycle // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2019. Vol. 377. No. 2141. P. 20170444.
19. **Margraf R.** A brief history of U.S. funding of fusion energy. Stanford University. Режим доступа: <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph241/margraf1/> (Дата обращения: 24.05.2024).
20. **Gilinsky V.** What’s fueling the commercial fusion hype? Bulletin of the Atomic Scientists. Режим доступа: <https://thebulletin.org/2024/02/whats-fueling-the-commercial-fusion-hype/> (Дата обращения: 25.05.2024).
21. **McNamara S. A. M., Asunta O., Bland J., et al.** Achievement of ion temperatures in excess of 100 million degrees Kelvin in the compact high-field spherical tokamak ST40 // Nuclear Fusion. 2023. Vol. 63. No. 5. P. 054002.

22. **Pearson R. J., Costley A. E., Phaal R., Nuttall W. J.** Technology Roadmapping for mission-led agile hardware development: a case study of a commercial fusion energy start-up // *Technological Forecasting and Social Change*. 2020. Vol. 158. September. P. 120064.

23. **Арцимович Л. А.** Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматгиз, 1961. 468 с.

24. **Арцимович Л. А.** Исследования по управляемым термоядерным реакциям в СССР // *Ядерная физика*. Под общ. ред. акад. А. И. Алиханова и др. Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. В 16 тт. Доклады советских ученых. Т. 1. М.: Изд-во Главатома при Совете Министров СССР, 1959. С. 5–30.

25. Critical materials for energy transition IRENA. Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf (Дата обращения: 25.05.2024).

26. IEA (2022). The role of critical minerals in clean energy transitions. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения: 24.05.2024).

REFERENCES

1. **Devezas T., Ruão H., Gonçalves J., et al.**, How green is the green energy transition? On the road to decarbonization, In book: *Devezas T., Leitro J. C. C., Yegorov Y., Chistilin D. (Eds.) Global challenges of climate change (Ch.)*. Book Ser. “World-Systems Evolution and Global Futures”, Vol. 1. Cham, Switzerland: Springer (2022) 9–28.

2. IAEA (2023). World Fusion Outlook 2023. Access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/FusionOutlook2023_web.pdf (Access date: 24.05.2024).

3. **Pitron G.**, The rare metals war: The dark side of clean energy and digital technologies, Scribe UK Publications, London, 2020.

4. **Post R.**, Controlled fusion research – an application of physics of high temperature plasmas, *Rev. Mod. Phys.* 28 (3) (1956) 338–362.

5. Critical Materials Factsheet, Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Access: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/material-resources/critical-materials-factsheet> (Access date: 25.05.2024).

6. **Artsimovich L. A.**, *Izbrannyye trudy. Atomnaya fizika i fizika plazmy [Selected works. Atomic physics and plasma physics]*, Nauka Publishing, Moscow, 1978 (in Russian).

7. IEA (2021). Global Hydrogen Review 2021. Access: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (Access date: 26.05.2024).

8. Nuclear power development: History and outlook. IAEA Bulletin No. 3. Access: <https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/29-3/nuclear-power-development-history-and-outlook> (Access date: 24.05.2024).

9. **Sarkisov A. A.** (Ed.), *Atomnyye stantsii maloy moshchnosti: novoye napravleniye razvitiya energetiki: T. 2 [Low-power nuclear power plants – a new line in the development of power systems. Vol. 2]*, Akadem-Print Publ., Moscow, 2015 (in Russian).

10. **Boldon L. M., Sabharwal P.**, Small modular reactor: First-of-a-Kind (FOAK) and Nth-of-a-Kind (NOAK) economic analysis. Access: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6293982.pdf> (Access date: 24.05.2024).

11. IEA (2020). Projected costs of generating electricity. Access: https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf (Access date: 26.05.2024).

12. Fusion energy: Potentially transformative technology still faces fundamental challenges. Access: <https://www.gao.gov/products/gao-23-105813> (Access date: 25.05.2024).

13. **Maisonnier D.**, A conceptual study of commercial fusion power plants. Final report of the European fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS). Access: https://www.academia.edu/98314122/A_conceptual_study_of_commercial_fusion_power_plants_Final_report_of_the_European_Fusion_Power_Plant_Conceptual_Study_PPCS (Access date: 24.05.2024).

14. **Maisonnier D., Campbell D., Cook I., et al.**, Fusion power plant studies in Europe, *Nucl. Fusion*. 47 (11) (2007) 1524–1532.

15. **Takeda S., Keeley A. R., Managi S.**, How many years away is fusion energy? A review, *J. Fusion Energy*. 42 (1) (2023) 16.

16. **Bustreo C., Casini G., Zollino G., et al.**, FRESCO, a simplified code for cost analysis of fusion power plants, *Fusion Eng. Des.* 88 (12) (2013) 3141–3151.
17. **Han W. E., Ward D. J.**, Revised assessments of the economics of fusion power, *Fusion Eng. Des.* 84 (2–6) (2009) 895–898.
18. **Cardozo N. J. Lopes**, Economic aspects of the deployment of fusion energy: The valley of death and the innovation cycle, *Phil. Trans. R. Soc. A.* 377 (2141) (2019) 20170444.
19. **Margraf R.**, A brief history of U.S. funding of fusion energy. Stanford University. Access: <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph241/margraf1/> (Access date: 24.05.2024).
20. **Gilinsky V.**, What’s fueling the commercial fusion hype? *Bulletin of the Atomic Scientists*. Access: <https://thebulletin.org/2024/02/whats-fueling-the-commercial-fusion-hype/> (Access date: 25.05.2024).
21. **McNamara S. A. M., Asunta O., Bland J., et al.**, Achievement of ion temperatures in excess of 100 million degrees Kelvin in the compact high-field spherical tokamak ST40, *Nucl. Fusion.* 63 (5) (2023) 054002.
22. **Pearson R. J., Costley A. E., Phaal R., Nuttall W. J.**, Technology Roadmapping for mission-led agile hardware development: a case study of a commercial fusion energy start-up, *Technol. Forecast. Soc.* 158 (Sept) (2020) 120064.
23. **Artsimovich L. A.**, *Upravlyayemye termoyadernye reaktsii [Controlled thermonuclear reactions]*, Fismatgis Publ., Moscow, 1961 (in Russian).
24. **Artsimovich L. A.**, *Issledovaniya po upravlyayemyim termoyadernym reaktsiyam v SSSR [Research on controlled thermonuclear reactions in the USSR]*, In book: Alikhanov A. I. (Ed.) *Nuclear Physics. Proc. 2-nd Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1958. In 16 Vols., *Reports of Soviet Scientists*, Vol. 1; Published by the Main Directorate for the Use of Atomic Energy under the Council of Ministers of the USSR, Moscow (1959) 5–30 (in Russian).
25. *Critical Materials for Energy Transition IRENA*. Access: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf (Access date: 25.05.2024).
26. IEA (2022). *The role of critical minerals in clean energy transitions* Access: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (Access date: 24.05.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРАБЛЕВ Вадим Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО «Управление качеством образования в интересах устойчивого развития», советник при ректорате Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 korablev@spbstu.ru
 ORCID: 0000-0002-4363-9352

РОЖАНСКИЙ Владимир Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований, заведующий научной лабораторией «Теория и моделирование плазмы токамаков» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 rozhansky@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-0723-622X

САРЫГУЛОВ Аскар Исламович – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Междисциплинарные исследования и образование по технологическим и экономическим проблемам энергетического перехода» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 dept.cfr@unecon.ru
 ORCID: 0000-0002-8165-0122

THE AUTHORS

KORABLEV Vadim V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
korablev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-4363-9352

ROZHANSKY Vladimir A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
rozhansky@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0723-622X

SARYGULOV Askar I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
dept.cfr@unecon.ru
ORCID: 0000-0002-8165-0122

*Статья поступила в редакцию 17.06.2024. Одобрена после рецензирования 02.07.2024.
Принята 03.07.2024.
Received 17.06.2024. Approved after reviewing 02.07.2024. Accepted 03.07.2024.*