



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В МИРЕ: ОБЗОР МАГАТЭ 2024 ГОДА

2-е ИЗДАНИЕ

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ
СИНТЕЗ В МИРЕ:
ОБЗОР МАГАТЭ
2024 ГОДА

«Путь к освоению термоядерной энергии — это свидетельство человеческой изобретательности и упорства».

**Генеральный директор МАГАТЭ
Рафаэль Мариано Гросси**

Сегодня развитие термоядерной энергетики набирает обороты, и этого нельзя отрицать. Будучи воодушевлен таким прогрессом, в прошлом году я дал старт выпуску публикации «Термоядерный синтез в мире: обзор МАГАТЭ». Она представляет собой всеобъемлющий глобальный источник информации, в котором отражены последние достижения в области термоядерной энергетики. Я очень рад, что эта публикация получила положительные отклики.

Путь к освоению термоядерной энергии — это свидетельство человеческой изобретательности и упорства. Чтобы мы могли и дальше продвигаться по этому пути, мною была создана Всемирная группа по термоядерной энергии — глобальная инициатива, призванная дать толчок сотрудничеству по всем направлениям. Перед нами стоит амбициозная и в то же время ясная задача: ускорить исследования, разработки, реализацию демонстрационных проектов, а также внедрение технологий термоядерного синтеза. Объединяя усилия представителей отрасли, правительств, научных кругов и регулирующих органов, мы закладываем основу сплоченного термоядерного сообщества, стремящегося к достижению общих целей.

Ключевая роль в этом процессе принадлежит правительствам. Переход от научных исследований энергии термоядерного синтеза к ее промышленному применению невозможен без стратегических государственных инвестиций, активной политической поддержки и международного взаимодействия. От таких последовательных усилий зависит успех глобального термоядерного сообщества. Я призываю заложить такую нормативную базу регулирования, которая была бы соразмерна уровню рисков и обеспечивала

ясность, необходимую для ускоренного развития термоядерной энергетики и привлечения инвестиций в эту отрасль.

В этом году я также пригласил группу международных экспертов с целью определить набор ключевых элементов термоядерного синтеза, которые лягут в основу всеобъемлющей дорожной карты и станут полезным подспорьем в краткосрочной и среднесрочной перспективе для ученых, инженеров, представителей регулирующих органов, предпринимателей, политиков и заинтересованных сторон во всем мире.

Сегодня, когда мы вступаем в решающую фазу развития термоядерной энергетики, мы должны активизировать усилия по всем направлениям: разработке технологий и материалов, необходимых для решения поставленных задач, укреплению партнерства между государственным и частным секторами, привлечению частного капитала для обеспечения рентабельности и формированию глобального кадрового потенциала. В термоядерной отрасли требуются специалисты из самых разных областей: от квалифицированных рабочих до экспертов в сфере права, политики и коммуникаций — все они вносят свой вклад в мировую экономику.

Инвестиции в изучение и промышленное внедрение энергии термоядерного синтеза сулят значительные экономические выгоды, и отнюдь не только с точки зрения потенциальной декарбонизации. Побочные технологии термоядерного синтеза могут применяться, среди прочего, в здравоохранении, разработке силовых установок для космических аппаратов, промышленной визуализации, геотермальном бурении и в сфере обращения с ядерными отходами, что открывает новые возможности для предпринимательской деятельности, помимо генерации энергии.

Решая сложные задачи, связанные с этой революционной технологией, мы непоколебимы в своем стремлении овладеть энергией термоядерного синтеза ради того, чтобы жить в устойчивом, благополучном и безопасном мире. Эра термоядерного синтеза — это уже не просто мечта, а вполне достижимая реальность, и вместе мы сможем приблизить ее наступление.

В этом году в публикации «Термоядерный синтез в мире: обзор МАГАТЭ» рассказывается не только о новостях и ключевых достижениях отрасли, но и о новых концепциях установок, прогнозируемых сроках их разработки, механизмах, действующих на политическом уровне, и тенденциях в области государственных и частных инвестиций. В ней также приводятся данные о результатах научных исследований и обзоры по регионам и отраслям. Я уверен, что публикация «Термоядерный синтез в мире: обзор МАГАТЭ» будет и впредь служить ценным источником информации для специалистов из сфер энергетики, государственного управления и научных исследований, занимающихся вопросами освоения термоядерной энергии. ■



▲
Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль
Мариано Гросси во время выступления в
Бельгии в марте 2024 года.



«Освоение термоядерной энергии — это потенциальный поворотный момент в жизни человечества в отдаленной перспективе и важный инструмент для обеспечения устойчивого мира и безопасности в будущем».

Антонио Таяни,
вице-председатель Совета министров Италии, министр
и иностранных дел и международного сотрудничества



Антонио Таяни, вице-председатель Совета министров Италии, министр иностранных дел и международного сотрудничества (публикуется с разрешения правительства Италии).

**Энергия термоядерного синтеза:
 беспрецедентный вызов,
 перспектива на будущее**

Для нас большая честь стать одним из организаторов и принимающей стороной первого совещания на уровне министров Всемирной группы по термоядерной энергии. Созыв этого форума свидетельствует о поддержке правительством Италии международного сотрудничества и нашей давней приверженности техническому прогрессу — главной движущей силе роста, благополучия и процветания.

Энергетическая безопасность — это приоритет в нынешних условиях растущей геополитической турбулентности. С политической точки зрения термоядерная энергетика таит в себе огромные возможности для того, чтобы дать ответ на эти вызовы и обеспечить энергетическую независимость, снизив при этом геополитическую

напряженность, связанную с эксплуатацией ресурсов органического топлива. Мне также кажется, что она повысит доступность электричества для обширных регионов нашей планеты, где до сих пор отсутствует эффективная электроэнергетическая инфраструктура.

Разработка новых технологий в ядерном секторе может стать важным шагом на пути к энергетическому переходу и в борьбе с последствиями изменения климата. Ядерная энергия была включена в таксономию Европейского союза как экологически чистый источник энергии, и я считаю, что мы не можем упустить возможность, которая открывается с началом работы новых европейских законодательных структур. Чтобы уменьшить нашу зависимость от органического топлива, мы должны задуматься о диверсификации структуры энергопроизводства, в которой термоядерная энергия могла бы сочетаться с возобновляемыми источниками энергии, водородом и новейшими ядерными технологиями, такими как малые модульные реакторы. Это также положительно отразится на стоимости энергии, повысит конкурентоспособность наших предприятий и даст толчок экономическому росту.

Другими словами, освоение термоядерной энергии — это потенциальный поворотный момент в жизни человечества в отдаленной перспективе и важный инструмент для обеспечения устойчивого мира и безопасности в будущем.

Запрос на инновации и растущие инвестиции сделают термоядерную энергию реальностью уже в самом скором времени. Италия намерена оставаться в авангарде этих усилий благодаря ноу-хау многочисленных государственных и частных организаций, которые в них вовлечены.

Слагаемыми успеха для нас являются усилия на технологическом, научном и финансовом направлениях. Для того чтобы мобилизовать столь необходимые крупные инвестиции и на регулярной основе задействовать современную инфраструктуру и узких специалистов, чрезвычайно важно развивать международное сотрудничество и партнерство между государственным и частным секторами. Это также входит в задачи Всемирной группы по термоядерной энергии, роль которой крайне важна для

недопущения того, чтобы такие научные усилия превратились в новую арену геополитического соперничества.

Италия всегда была на передовом рубеже технологических исследований и инноваций в области ядерной энергии — еще со времен создания первого ядерного реактора, благодаря которому итальянский физик Энрико Ферми заложил основы современной ядерной физики.

«Запрос на инновации и растущие инвестиции сделают термоядерную энергию реальностью уже в самом скором времени».

Сегодня наше Национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию (ЭНЕА) является головным учреждением в области изучения термоядерной энергии, а его исследовательский центр во Фраскати служит ярким примером плодотворного партнерства между государственным, частным и научным секторами.

Я хотел бы также вспомнить о наших ведущих энергетических компаниях, которые вывели нашу инновационную деятельность за пределы национальных границ, участвуя во многих инновационных проектах.

Италия готова поделиться опытом и внести собственный вклад в радикальное сокращение разрыва в уровне знаний между промышленно развитыми и развивающимися странами. Сотрудничество между учеными, образование и профессиональная подготовка — наряду с привлечением частного сектора — составляют суть нашего нового подхода к работе с партнерами по развитию, особенно в Африке. Это позиция, которая также лежит в основе итальянского председательства в Группе семи и наших действий на европейском уровне.

Это чрезвычайно важно, поскольку расцвет новой эпохи ядерной и термоядерной энергетики будет зависеть от самоотверженной работы молодых ученых и инженеров.

Лежащий впереди путь долог и сложен, а ставки высоки. Мы должны понимать, что выбор, который мы сделаем сегодня, определит социальный, экономический и геополитический ландшафт будущего мира.

Давайте же сообща потрудимся ради светлого будущего для нового поколения.



Все мы осознаем необходимость раз и навсегда решить глобальные проблемы, связанные с изменением климата и энергетической безопасностью. Для этого мы должны уверенно пойти по пути декарбонизации и вспомнить об уже принятых нами обязательствах в области климатической, энергетической и природоохранной политики. Это предполагает достижение нулевого уровня выбросов парниковых газов к 2050 году, чтобы не допустить повышения глобальной температуры более чем на 1,5°C. В то же время нам необходимо преобразовать наши экономические и социальные системы, сосредоточив внимание на решении задач достижения нулевого уровня выбросов и создания безотходной и устойчивой к изменению климата экономики, обеспечивая при этом устойчивый и инклюзивный рост, укрепляя нашу экономику и ускоряя энергетический переход.

Стоит еще раз подчеркнуть важность научно обоснованных подходов к разработке политики, направленной на преодоление глобального климатического и экологического кризиса. Для этого необходим нейтральный в технологическом отношении подход, при котором изучаются все возможные пути удовлетворения растущих глобальных потребностей в энергии для нужд устойчивого развития.

Энергия термоядерного синтеза может дать ключ к решению этой проблемы в долгосрочной перспективе. Успешное налаживание производства термоядерной энергии как безопасного, надежного и практически неисчерпаемого источника чистой энергии с потенциально нулевым уровнем выбросов может дать значительные социальные, экологические и экономические преимущества. Перспектива промышленного внедрения будущих термоядерных электростанций дает стимул к созданию в течение следующего десятилетия демонстрационных установок, за которыми будут стоять крупные программы научных исследований, финансируемые правительствами, Европейским союзом и компаниями по всему миру. Процессы разработки и демонстрации технологий термоядерного синтеза будут ускоряться благодаря международному сотрудничеству, что подтверждает необходимость глобального взаимодействия в решении научно-исследовательских задач, создании международных цепей поставок и формировании кадрового потенциала.

Мировой сектор термоядерной энергетики развивается ускоренными темпами — все больше частных компаний берутся за разработку технологий термоядерного синтеза как с магнитным, так и с инерционным удержанием плазмы либо комбинированных методов, которые привлекают значительные инвестиции со стороны частных компаний и государств. Некоторые компании планируют построить термоядерные станции, которые будут способны



Джильберто Пикетто-Фратин, министр окружающей среды и энергетической безопасности Италии (публикуется с разрешения правительства Италии).

«Все мы осознаем необходимость раз и навсегда решить глобальные проблемы, связанные с изменением климата и энергетической безопасностью».

Джильберто Пикетто-Фратин
министр окружающей среды и энергетической безопасности

производить электроэнергию, в период между 2040 и 2050 годами, что опережает контрольные сроки сооружения таких установок к середине столетия, установленные в государственных научно-исследовательских программах. В предстоящие годы проект ИТЭР станет источником ценной информации о пусконаладке, плазменных сценариях, обращении с тритием и ядерных аспектах, безопасности и доступности установки, удаленном манипулировании, выводе энергии и обращении с радиоактивными отходами. Проект ИТЭР уже позволил получить необходимую информацию о многих технологиях строительства компонентов и подсистем установки для производства термоядерной электроэнергии. Недавно руководство ИТЭР объявило о планах расширить практику партнерства между государственным и частным секторами, привлекая частные компании к реализации инициатив в области термоядерного синтеза с участием компаний, занимающихся разработкой термоядерных установок, конечных пользователей, цепей поставок, университетов и научно-исследовательских центров. Наряду с созданием новых агрегатов, в проекте ИТЭР делается акцент на необходимости вовлечения поставщиков в процесс проектирования на самых начальных этапах с целью оптимизировать опыт и навыки.

На саммите Группы семи под председательством Италии лидеры семи государств-членов, напомнив об обязательстве, принятом в коммюнике совещания министров стран Группы семи по вопросам климата,

энергетики и окружающей среды (Туринское коммюнике), включили термоядерную энергию в число направлений сотрудничества для решения глобальных проблем и обязались создать в рамках Группы семи рабочую группу по термоядерной энергии. Это в очередной раз подтверждает растущее признание важной роли термоядерной энергии в достижении долгосрочных целей в области энергетической безопасности и климата.

21 сентября 2023 года я учредил Национальную платформу по устойчивому развитию ядерной энергетики, поручив ведущим научным организациям и компаниям, работающим в ядерной сфере, разработать возможную дорожную карту для пересмотра места ядерной энергетики как безуглеродного и эффективного источника энергии в структуре энергопроизводства Италии. Платформа оценила целесообразность и возможность использования ядерной энергии в Италии в период после 2035 года для решения задач полномасштабного внедрения возобновляемых источников энергии и одновременно с этим проработала вопрос о термоядерной энергии с точки зрения проведения НИОКР и внедрения объектов термоядерной энергетики в средне- и долгосрочной перспективе.

В итоге с учетом ядерных данных и анализа, подготовленных Национальной платформой по устойчивому развитию ядерной энергетики, в Итальянском национальном плане в области энергетики и климата было пересмотрено место ядерной энергетики в структуре энергопроизводства Италии и взят курс на использование устойчивых технологий ядерной генерации, таких как малые модульные реакторы, усовершенствованные модульные реакторы и микрореакторы, наряду с возможным пуском в строй объектов термоядерной энергетики начиная примерно с 2050 года.

Хотя Италия прекратила производство энергии на АЭС почти 40 лет назад, государственные научно-исследовательские организации и промышленные предприятия продолжают инвестировать средства и развивать исследования в области ядерных технологий, включая термоядерную энергию. Таким образом, теперь Италия может использовать имеющиеся научно-технические знания и возможности своих исследовательских организаций, научных кругов, компаний и уже существующих предприятий для содействия созданию эффективной термоядерной отрасли как части единой национальной структуры.

Правительство Италии твердо настроено на развитие научных исследований и технологий в области термоядерной энергии. Под руководством Министерства окружающей среды и энергетической безопасности Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию (ЭНЕА) уже координирует деятельность 21 национального партнера, включая научно-исследовательские организации, университеты и ведущие компании, для ускорения прогресса в освоении термоядерных технологий. Итальянские компании заключили контракты на сумму более 1,5 млрд евро на разработку систем и компонентов для ИТЭР, в том числе на подготовку к эксплуатации ИТЭР и следующим этапам проекта.

Недавно государственная компания RSE также занялась разработкой материалов для инерционного термоядерного синтеза; благодаря этим экспертным знаниям RSE становится важным международным партнером в деле развития термоядерной энергетики.

В Италии находится целый ряд экспериментальных установок по термоядерному синтезу, в том числе в исследовательских центрах ЭНЕА во Фраскати, близ Рима, и в Бразимоне на северных Апеннинах, в консорциуме RFX в Падуе и в ISTEP-CNR в Милане. Все эти установки вносят большой вклад в научный прогресс в области термоядерной энергии. В исследовательском центре ЭНЕА во Фраскати силами государственно-частного консорциума ЭНЕА, энергетической компании «Эни» и различных итальянских институтов и университетов сооружается новая исследовательская установка — опытный реактор-токамак с дивертором, — чтобы продемонстрировать возможности диверторной технологии для будущих термоядерных установок.

«Эни» была одной из первых энергетических компаний, инвестировавших в термоядерные технологии, став в 2018 году стратегическим акционером компании «Коммонуэлт фьюжн системз», преследующей цель ускоренного промышленного внедрения термоядерного синтеза.

Чтобы найти решение оставшимся проблемам, связанным с демонстрацией технической осуществимости термоядерных проектов, мы должны расширить рамки международного взаимодействия путем налаживания новых партнерских связей для расширения НИОКР, поощрения партнерства между государственным и частным секторами и стимулирования инноваций и обмена ресурсами в области термоядерных разработок.

Теперь, когда термоядерный синтез превращается из предмета научного исследования в реальную промышленную технологию, и с учетом тех усилий, которые еще необходимо предпринять для заполнения технологических пробелов, крайне важно, чтобы мы продолжали поддерживать климат конструктивного сотрудничества и совместного использования инфраструктуры, который до сих пор характеризовал общемировую деятельность в области термоядерного синтеза. Необходимым условием для эффективной передачи технологий и содействия глобальному росту рынка термоядерных технологий является наличие ясных принципов защиты интеллектуальной собственности на процессы и продукты термоядерных установок.

В то же время я хотел бы подчеркнуть важность выработки новых подходов к нормативному регулированию с целью обеспечить высокий уровень безопасности, соразмерный весьма ограниченным опасностям технологии термоядерного синтеза. В этих подходах должен учитываться инновационный характер этой зарождающейся технологии, чтобы термоядерные установки могли безопасно сооружаться и эксплуатироваться. Для выработки согласованного подхода к регулированию странами, находящимися на передовых рубежах освоения термоядерного синтеза, необходимо международное сотрудничество между правительствами, МАГАТЭ и соответствующими ведомствами по вопросам безопасности, которое обеспечит сектору термоядерной энергетики требуемый уровень предсказуемости и уверенности.

Благодаря своему географическому положению Италии может в будущем стать средиземноморским центром термоядерной энергетики — в рамках Piano Mattei (плана Маттеи), — взяв на себя роль лидера в решении региональных проблем энергетической безопасности и устойчивости, а также в содействии созданию

необходимого потенциала. Италия готова поделиться своими обширными знаниями и опытом, чтобы оказать поддержку в развитии термоядерных технологий таким странам, как Алжир, Египет, Марокко и Тунис. Целенаправленная подготовка рабочей силы и образовательные программы могут стать отправной точкой для развития навыков, которые в дальнейшем могут быть расширены для применения в области термоядерного синтеза.

Италия гордится тем, что обладает почти уникальным сочетанием научных, технологических, инженерных и промышленных компетенций, позволяющим ей взять на себя ведущую роль в разработке и строительстве термоядерных установок в Италии и Европе.

По этим причинам Италия считает за честь стать одним из организаторов первого совещания на уровне министров Всемирной группы по термоядерной энергии (ВГТЭ). В этот переломный момент, когда для ускорения темпов освоения термоядерной энергетики столь важны совместные усилия, группа даст необходимый толчок этому процессу. По мере того как стремление мира овладеть термоядерной энергией набирает обороты, становится все более очевидным потенциал этой технологии как неисчерпаемого, экологически чистого и устойчивого источника энергии будущего, что признается Группой семи. Недавние открытия в области термоядерного синтеза вызвали большой интерес и привлекли значительные объемы инвестиций от широкого круга заинтересованных сторон.

Первое совещание ВГТЭ в Италии в преддверии КС-29 Конференции об изменении климата представляет собой поворотный момент в глобальном поиске перспективных решений в области энергетики. Его цель состоит в том, чтобы привлечь максимум внимания к обсуждению вопросов термоядерной энергии в более широком контексте международных переговоров по климату и по возможности увеличить эффект от этих обсуждений. ВГТЭ не только акцентирует внимание на важности научного прогресса в области термоядерной энергетики, но и создаст условия для международного сотрудничества и инвестиций в эту революционную технологию, призванную сыграть решающую роль в становлении энергетики будущего для достижения глобальных целей в области климата и обеспечения устойчивого производства энергии в длительной перспективе.

Италия надеется на прогресс в термоядерной энергетике в общемировом масштабе и твердо настроена на поддержку и финансирование научных исследований и инноваций в этом секторе. В итальянской программе по термоядерной энергетике, которая развивается бурными темпами, будут участвовать многочисленные итальянские исследовательские организации, научные круги и промышленные предприятия и предполагается международное сотрудничество с МАГАТЭ.

Италия приветствует работу МАГАТЭ и его государств-членов в области термоядерной энергетики и будет и в дальнейшем всячески ей содействовать.

Роль координатора публикации «Термоядерный синтез в мире: обзор МАГАТЭ 2024 года» выполнял Сайед Ашраф.
Процессом подготовки этой публикации руководил Маттео Барбарино.

Составители и рецензенты

Аникеев, А.	Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Российская Федерация
Артисюк, В.	Международное агентство по атомной энергии
Ascic, M.	Международное агентство по атомной энергии
Ashraf, S.	Международное агентство по атомной энергии
Barbarino, M.	Международное агентство по атомной энергии
Barton, J.	«Хилион энерджи», Соединенные Штаты Америки
Bellehumeur, C.	«Стелларекс», Соединенные Штаты Америки
Catena, G.	«Гаусс фьюжн», Германия
Chae Kim, W.	Корейский институт термоядерной энергии, Республика Корея
Cheong, C	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии
Donovan, J.	Международное агентство по атомной энергии
Federici, G.	EUROfusion, Германия
Finnerty, M.	Международное агентство по атомной энергии
Ganzarski, N.	nT-Taο, Израиль
Goodman, A	«ТАЕ технолоджиз», Соединенные Штаты Америки
Jasper, A.	«Зэп энерджи», Соединенные Штаты Америки
Johnson, D.	«Дженерал фьюжн», Канада
Kaneko, T.	Международное агентство по атомной энергии
Ma, T.	Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, Соединенные Штаты Америки
Paluska, J.	«Коммонуэлт фьюжн системз», Соединенные Штаты Аmericи
Sciortino, F.	«Проксима фьюжн», Германия
Solomon, W.	«Дженерал атомикс», Соединенные Штаты Америки
Strömstedt, L.	«Новатрон фьюжн груп», Швеция
Subbiah, I.	«Коммонуэлт фьюжн системз», Соединенные Штаты Аmericи
Surrell, J.	«Лонгвью фьюжн энерджи системз», Соединенные Штаты Аmericи
Wagner, R.	Международное агентство по атомной энергии
White, S.	«Токамак энерджи», Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии
Wurzel, S.	«Фьюжн энерджи бейс», Соединенные Штаты Америки
Yoshimura, N.	«Хеликал фьюжн», Япония
Yoshiteru, S.	Национальные институты квантовых наук и технологий, Япония
Zhuang, G.	Университет науки и технологий Китая, Китай

Эта публикация получила ценную поддержку со стороны правительства Японии.

Прогресс в термоядерном синтезе

1

17 Термоядерные станции

Контекст и сценарии

29

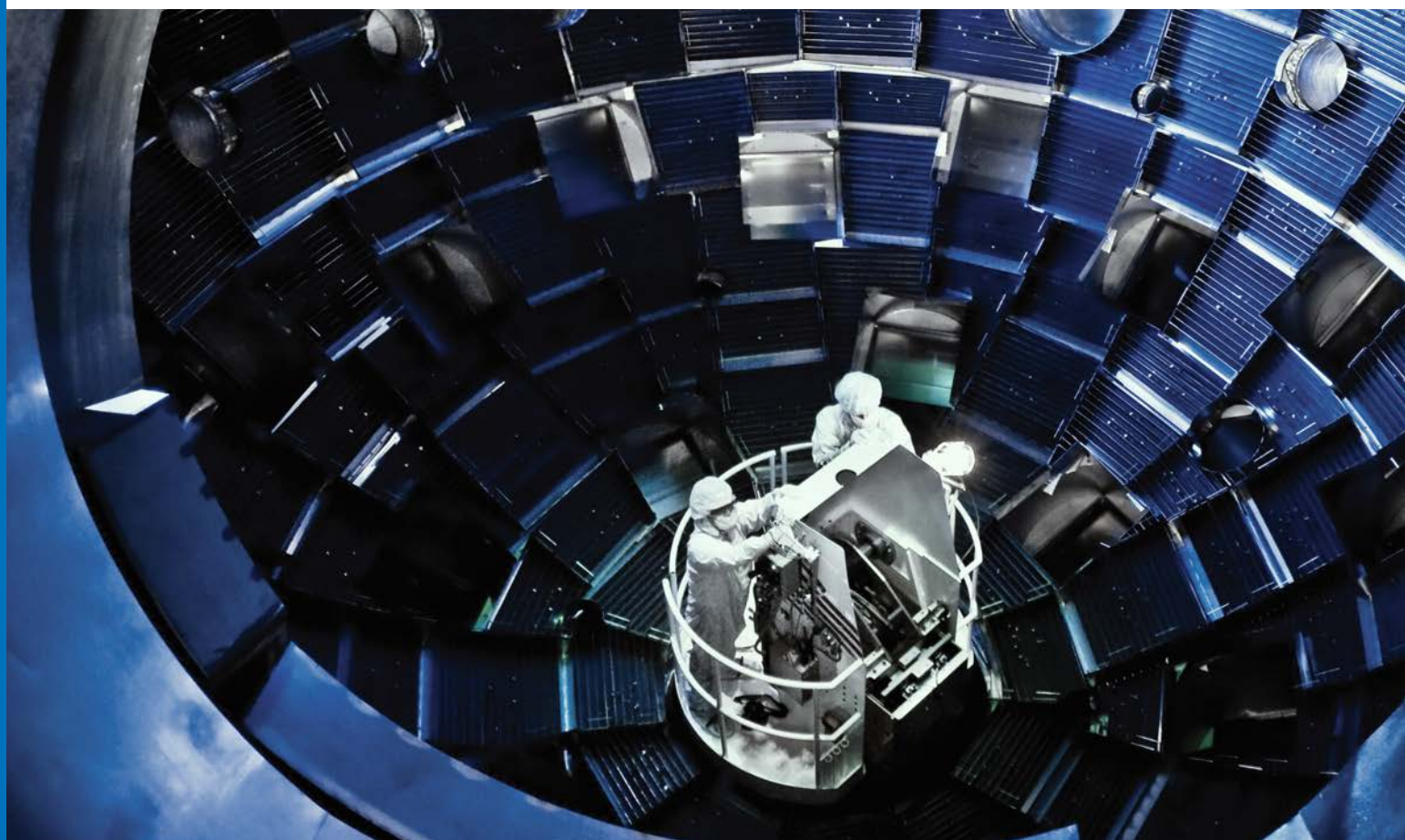
45 **Обзоры**

Термоядерный 63
синтез в цифрах

Прогресс в термояд синтезе

ерном

Последние
достижения
и открытия



Первая концепция
синтеза с инерционным
удержанием плазмы

1960 г.

Изобретение лазера

1970 г.

Лазер Janus

Публикация
оригинальной статьи

Argus

Shiva

1980 г.

Nova (30 кДж)

1990 г.

Решение о создании НИФ

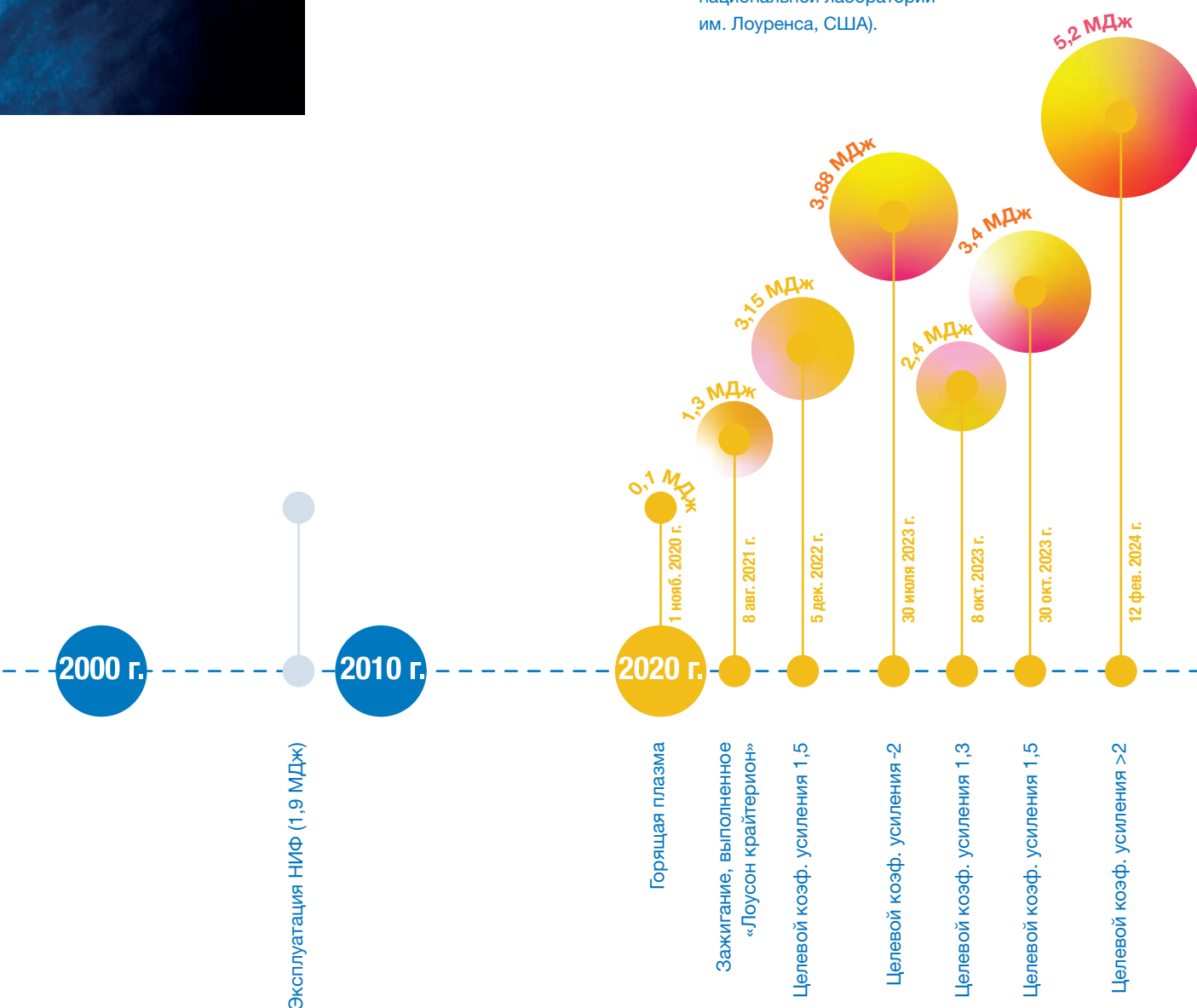


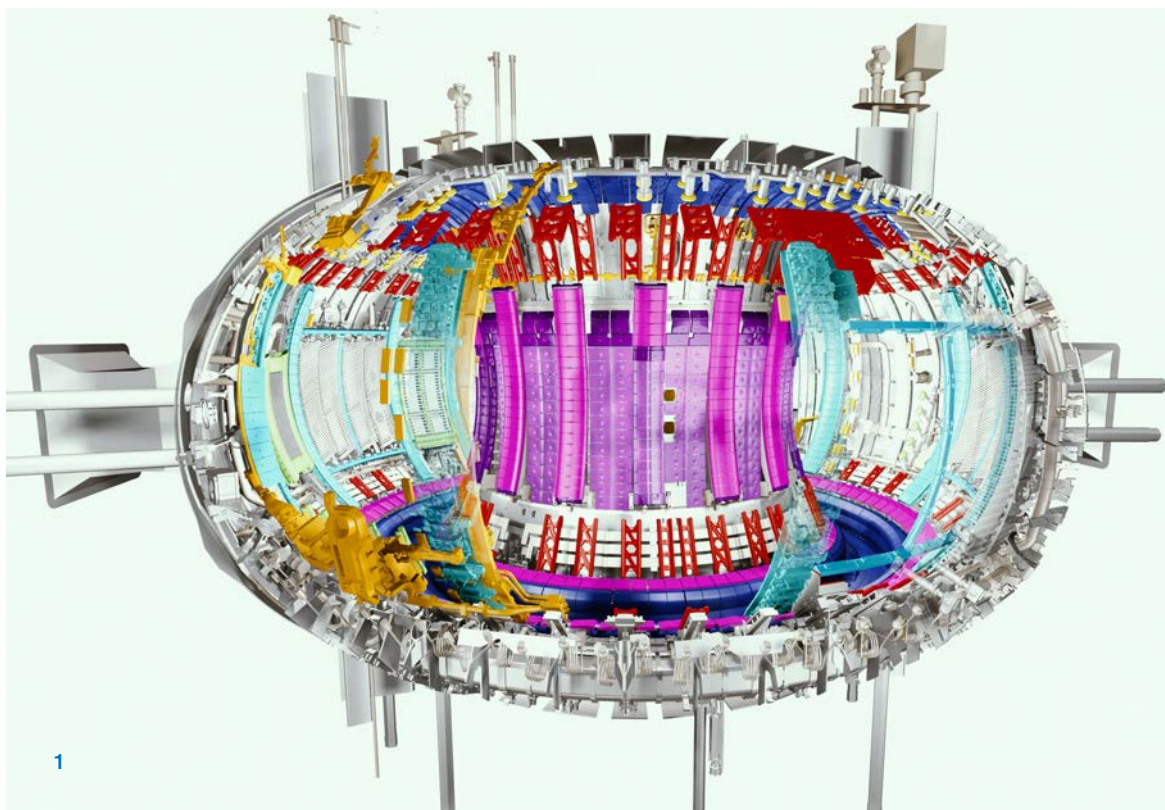
НИФ четырежды воспроизводит процесс зажигания

Успешно продолжается работа на Национальной установке по термоядерному зажиганию (НИФ)

После проведенного в декабре 2022 года [1] революционного эксперимента по зажиганию термоядерного реактора исследователям из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в Соединенных Штатах Америки (США) удалось успешно воспроизвести данный результат как минимум четыре раза. Зажигание было повторно выполнено в ходе четырех последовательных экспериментов в 2023 году и начале 2024 года. В результате последнего эксперимента удалось получить рекордные 5,2 мегаджоуля термоядерной энергии и достичь коэффициента усиления более 2. ■

НИФ в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в США (публикуется с разрешения Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, США).





Установив мировой рекорд, JET выводится из эксплуатации

После 40 лет эксплуатации и заключительных экспериментов с дейтерий-тритиевой плазмой, проводившихся в течение 2023 года, начались работы по выводу из эксплуатации Объединенного европейского тора (JET), которые продлятся примерно до 2040 года. В результате вывода JET из эксплуатации специалисты по термоядерному синтезу получают ценную информацию, которая позволит проанализировать изменение состояния материалов внутри корпуса за время эксплуатации.

Заключительные эксперименты на JET в декабре 2023 года дали беспрецедентные результаты [2]. Ученые установили мировой рекорд, поддерживая устойчивую реакцию термоядерного синтеза в течение 5 секунд, в результате которой было получено 69 мегаджоулей энергии при минимальном количестве топлива. Для лучшего удержания плазмы ученые применили инновационные методы, такие как инвертирование формы плазмы. Они также специально направили высокоэнергетический пучок электронов, образовавшихся в результате срыва плазменного разряда, на внутреннюю стенку, чтобы более детально изучить процесс управления пучком и механизмы повреждения. ■

1 Вид внутрикорпусных кабелей, компонентов и систем JET (публикуется с разрешения Управления по атомной энергии Соединенного Королевства (УАЭСК), Соединенное Королевство).

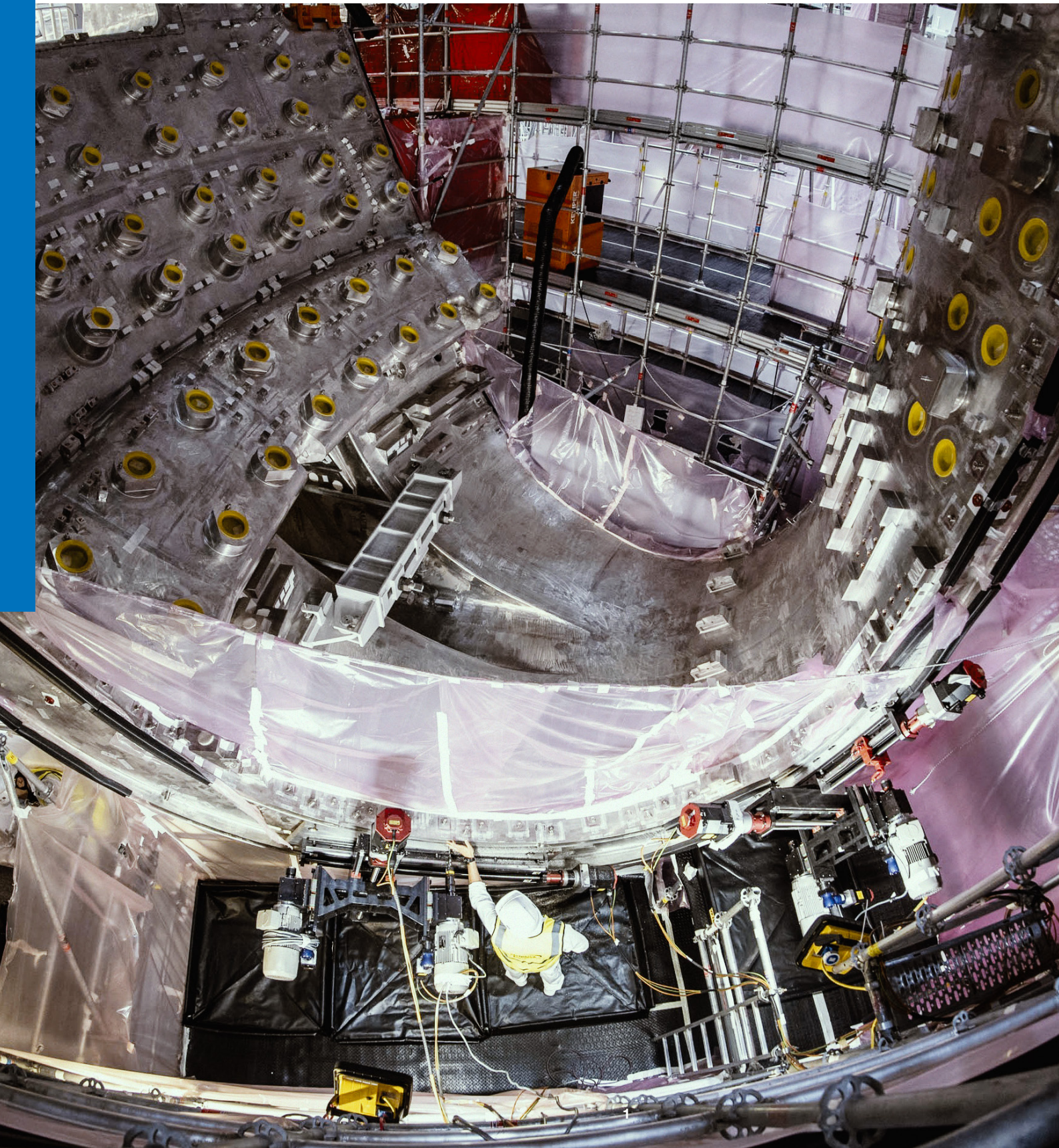
2 Вид с воздуха площадки ИТЭР по состоянию на июль 2024 года (публикуется с разрешения ИТЭР, Франция).

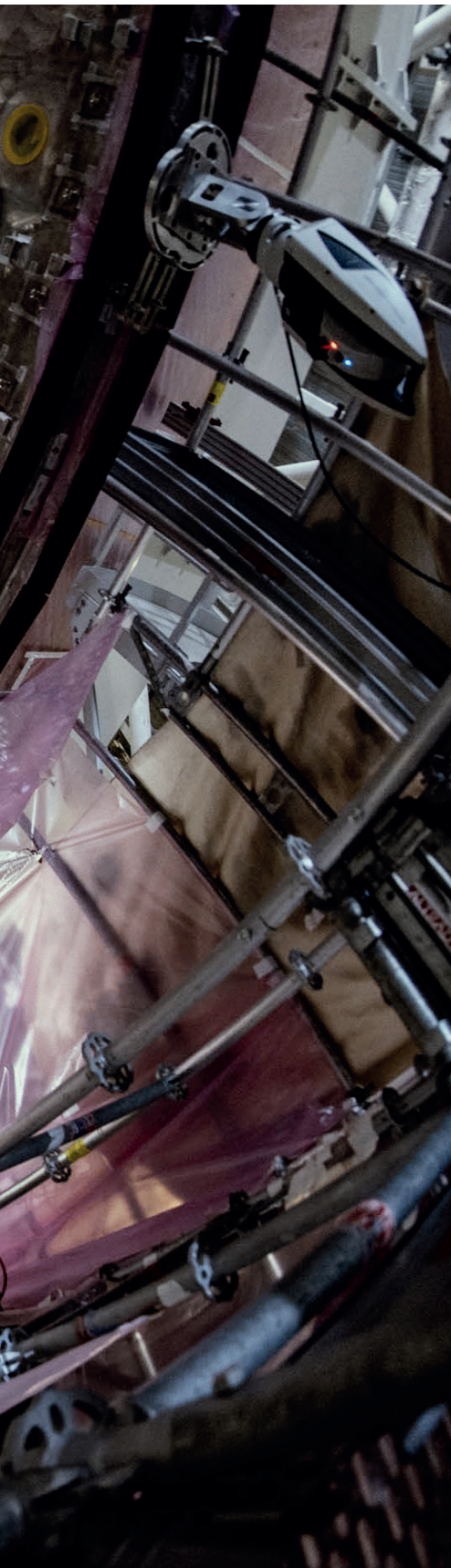


ИТЭР переходит на новую «базовую линию»

По завершении переходного периода реализация проекта ИТЭР продолжается в соответствии с новой «базовой линией». Ремонт основных компонентов выполняется по графику. Полным ходом идут работы по строительству, производству, сборке и вводу систем в эксплуатацию. По итогам более чем годичного рассмотрения предложение о новой «базовой линии» было в июне 2024 года направлено в Совет ИТЭР и теперь служит контрольным графиком выполнения работ.

Обнаружение и исследование геометрических несоответствий в сварных швах нескольких секторов вакуумного сосуда, а также хлоридного коррозионного растрескивания в трубах системы охлаждения тепловых экранов стало причиной того, что процесс сборки токамака ИТЭР замедлился, пока проводились ремонтные работы. Параллельно с этим оценка первопричинных дефектов наряду с самооценкой культуры обеспечения качества проекта привели к реорганизации для подготовки к решению предстоящих задач. С Управлением по ядерной безопасности Франции были обстоятельно обсуждены вопросы улучшения демонстрации безопасности, сопровождающей процесс лицензирования ИТЭР. В то же время были завершены работы по монтажу систем энергоснабжения, криогенной установки и системы охлаждающей воды, которые по большей части введены в эксплуатацию. Была произведена отгрузка всех катушек полоидального и тороидального поля, большинства модулей центрального соленоида и прочих важнейших компонентов. ■





Ключевой задачей за прошедший год была интеграция этих элементов в реалистичную обновленную «базовую линию» проекта.

Предусмотренные ранее этапы сборки и эксплуатации объединены в итоговом предложении. Технические и эксплуатационные риски минимизированы за счет установки дивертора, защитных экранов, первой стенки из жертвенного материала и прочих снижающих риски компонентов на более укомплектованный агрегат перед пуском в эксплуатацию, а также проведения полного цикла испытаний некоторых катушек полоидального и тороидального полей перед монтажом.

Запланированные на 2034 год научно-исследовательские работы положат начало 27-месячному периоду фундаментальных экспериментов с водородной и дейтерий-дейтериевой плазмой, благодаря чему в 2036 году токамак сможет работать в режиме длинных импульсов при максимальных значениях энергии магнитного поля и тока плазмы (15 МА).

Начало этапа исследовательских работ будет в значительной степени посвящено демонстрации внедрения систем, необходимых для перевода термоядерного синтеза на промышленные рельсы. Начало работы с дейтерий-третиевой плазмой будет отложено на четыре года и перенесено с 2035 года, запланированного в предыдущей «базовой линии», на 2039 год. ■

◀ Ключевую роль в ремонте секторов вакуумного сосуда ИТЭР играет метрология, что, в частности, предполагает расположение с точностью до микрометра фрезерных станков, срезающих излишки материала и возвращающих компонент к его номинальным параметрам (публикуется с разрешения ИТЭР, Франция).



2034 год — начало экспериментов с водородной и дейтерий-дейтериевой плазмой



2036 год — начало работы в режиме длинных импульсов при полной магнитной энергии и плазменном токе



2039 год — начало работы с дейтерий-третиевой плазмой

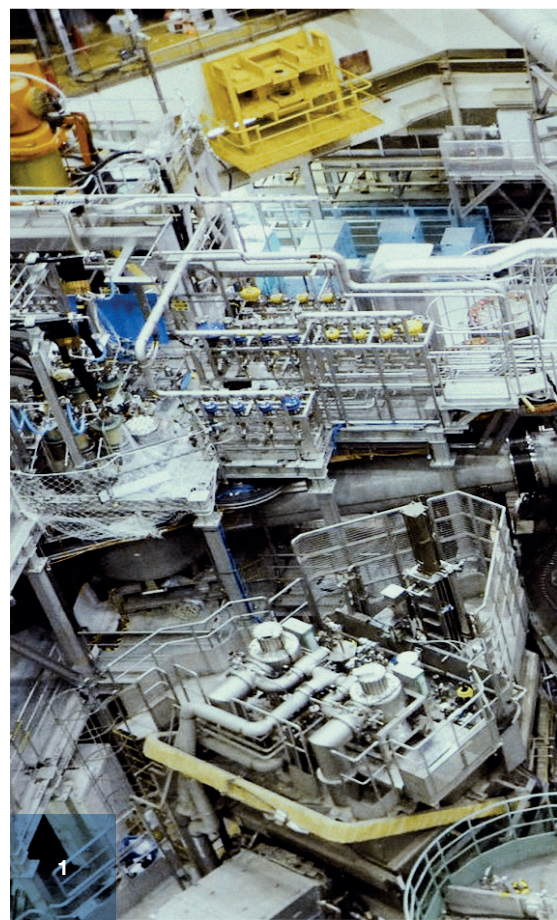
Другие события со времени публикации первого обзора МАГАТЭ по термоядерному синтезу в мире

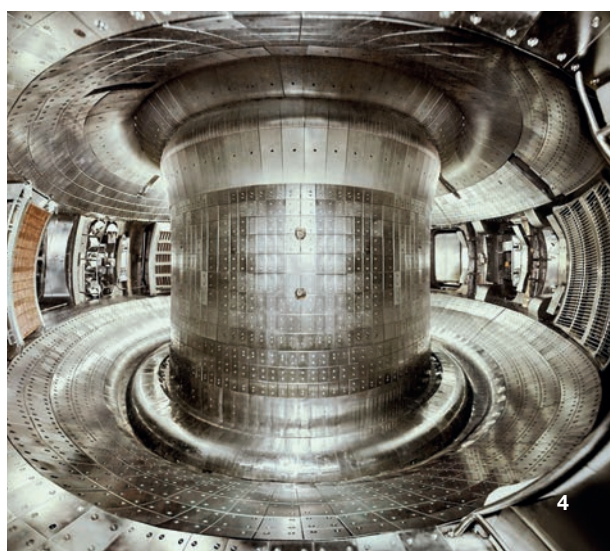
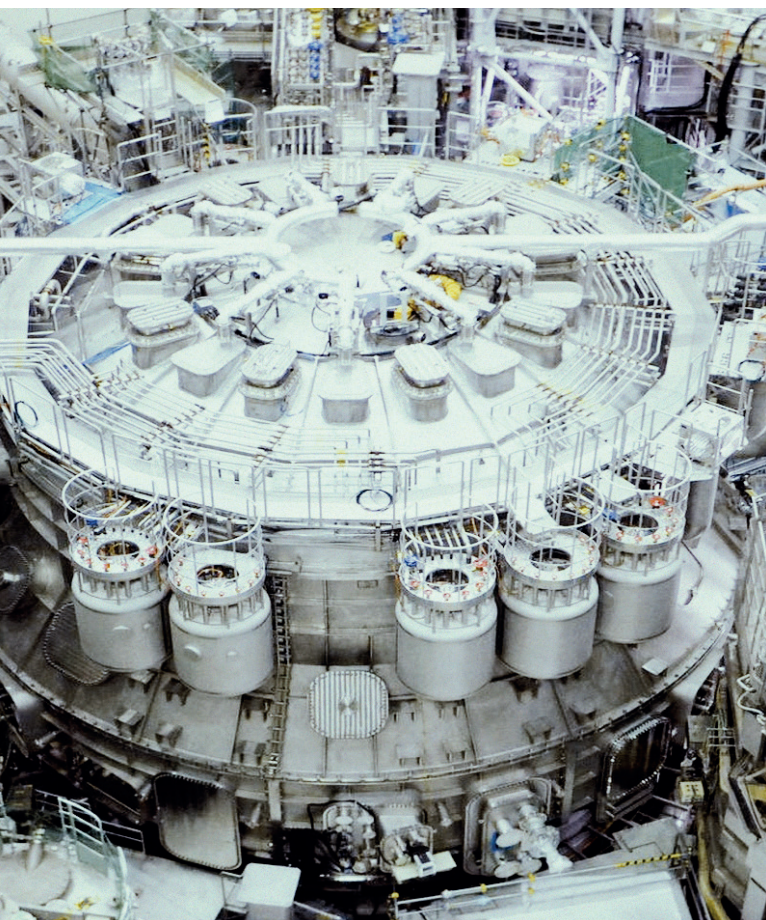
В токамаке JT-60SA была получена первая плазма [3]. Этот агрегат высотой с четырехэтажный дом рассчитан на удержание плазмы, нагретой до 200 миллионов градусов по Цельсию, в течение примерно 100 секунд, что значительно дольше, чем у предыдущих больших токамаков. Плазма в JT-60SA будет очень похожа на ту, которую планируется получать на ИТЭР, и это даст возможность физикам изучить стабильность плазмы и ее влияние на выработку термоядерной энергии в течение длительных временных интервалов, тем самым получив опыт, применимый при создании токамаков следующего уровня. Еще на одной площадке в Японии — в Роккасё — установлен прототип линейного ускорителя Международной установки по облучению материалов для термоядерного синтеза (ИФМИФ).■

На токамаке EAST в Китае удалось достичь функционирования в стационарном режиме с высокой степенью удержания плазмы в течение 403 секунд [4]. Этот показатель превысил первоначальный рекорд в 101 секунду, который был установлен на нем в 2017 году. В режиме работы с высокой степенью удержания плазмы были значительно увеличены температура и плотность частиц, что повысит эффективность выработки энергии на будущих термоядерных электростанциях. Кроме того, токамак HL-3 в Китае был впервые выведен в режим с высокой степенью удержания плазмы с током плазмы в один миллион ампер благодаря модернизированным системам нагрева, эксплуатации, управления, диагностики и электропитания.■

Исследователи из Корейского института термоядерной

энергии в ходе экспериментов на Корейском усовершенствованном исследовательском токамаке со сверхпроводящим соленоидом (KSTAR) установили рекорд, повысив температуру до 100 миллионов градусов по Цельсию за 48 секунд и удерживая плазму сверхвысокой температуры на протяжении более 100 секунд. Им же принадлежит рекорд 2021 года, когда продолжительность периода удержания высокотемпературной плазмы составила 30 секунд, что стало крупным достижением в области исследования термоядерной энергии. К 2026 году на KSTAR планируется добиться удержания плазмы температурой 100 миллионов градусов по Цельсию на протяжении 300 секунд. Согласно решению ИТЭР о замене бериллиевых диверторов на вольфрамовые, в настоящее время на KSTAR применяется вольфрамовый дивертор.■



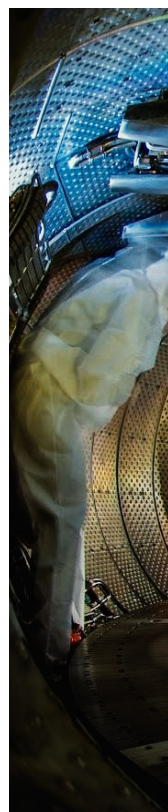
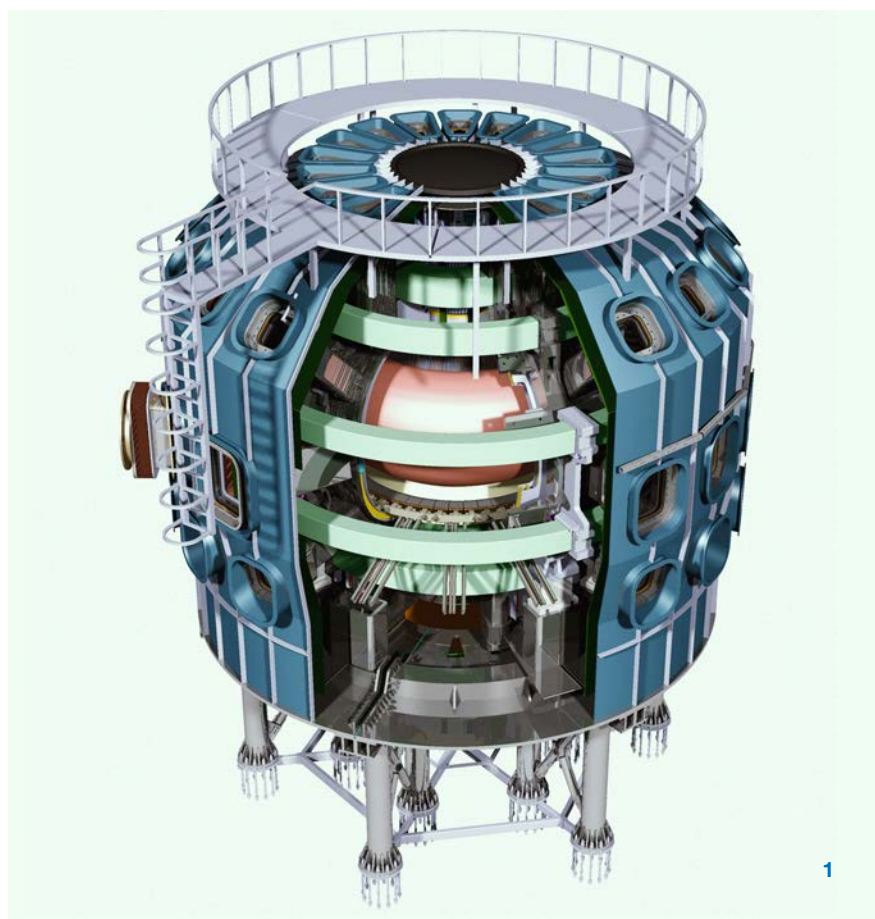


1 JT-60SA — крупнейший действующий токамак, спроектированный и построенный совместными усилиями Японии и Европейского союза (ЕС) (публикуется с разрешения Национальных институтов квантовых наук и технологий, Япония).

2 Токамак KSTAR в Корейском институте термоядерной энергии (публикуется с разрешения Корейского института термоядерной энергии, Республика Корея).

3 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси осматривает прототип линейного ускорителя ИФМИФ в Институте термоядерного синтеза в Роккасё в ходе своего визита в Японию (публикуется с разрешения Национальных институтов квантовых наук и технологий, Япония).

4 Токамак EAST, вид изнутри (публикуется с разрешения Института физики плазмы Китайской академии наук, Китай).

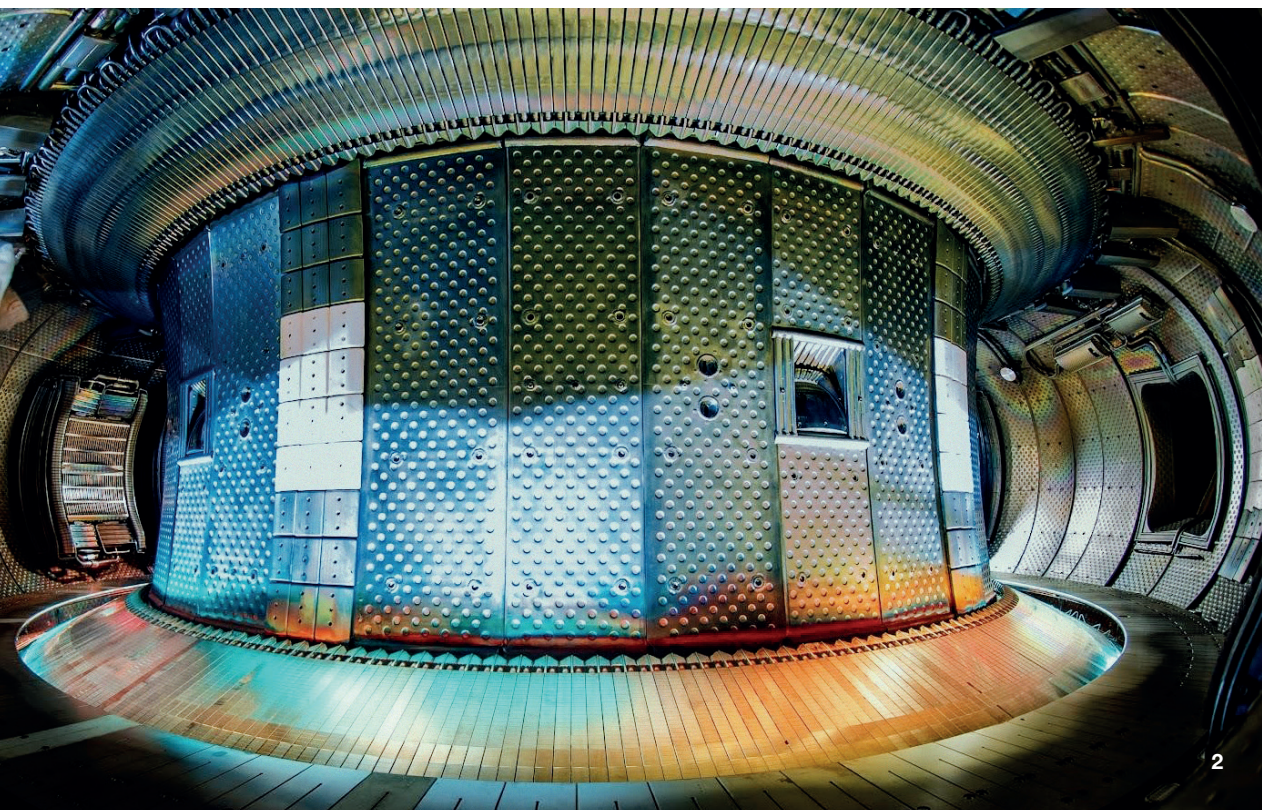


В Италии продолжалось строительство опытного реактора-токамака с дивертором (DTT) — нового сверхпроводящего токамака, предназначенного для изучения усовершенствованных конструкций дивертора для установок термоядерного синтеза. Реализующий этот проект консорциум DTT, который объединяет целый ряд итальянских научно-исследовательских институтов и международных партнеров, включая одну из крупнейших энергетических компаний мира, собрал на нужды строительства этой установки почти 500 млн евро. Основная задача DTT состоит в исследовании и испытании физических и технологических аспектов концепций вывода энергии из плазмы, которые могут

быть использованы в европейской демонстрационной термоядерной энергетической установке (EU-DEMO). ■

Подобно токамаку KSTAR, его французский аналог WEST, находящийся на площадке Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции в Кадараше, также начал успешно эксплуатироваться с вольфрамовым дивертором. Для демонстрации прочности и эффективности этого нового компонента был проведен первый цикл экспериментов, в ходе которого при помощи последовательных плазменных разрядов продолжительностью около одной минуты каждый была достигнута высокая интегральная

плотность потока нейтронов. Кроме того, совместными усилиями исследователей из Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции и Принстонской лаборатории физики плазмы в США был достигнут важнейший результат: им удалось удерживать термоядерную плазму температурой около 50 миллионов градусов по Цельсию в течение рекордных 6 минут [5]. Это революционное достижение, предполагавшее увеличение на 15% подачи энергии и удвоение плотности плазмы в сравнении с более ранними экспериментами, свидетельствует о больших перспективах использования устройств термоядерного синтеза с вольфрамовой облицовкой в будущих термоядерных станциях. ■



1 Макет установки DTT (публикуется с разрешения Консорциума DTT, Италия).

2 Токамак WEST, оснащенный вольфрамовым дивертором с активным охлаждением (публикуется с разрешения французского Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии, Франция).



1 Стальная вакуумная камера токамака SPARC, доставленная на площадку в 2024 году (публикуется с разрешения «Коммонуэлт фьюжн системз», США).



2 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси осматривает зал токамака SPARC, подготовленный к сборке агрегата.

Национальная термоядерная установка DIII-D в США, находящаяся в эксплуатации у компании «Дженерал атомикс» при Министерстве энергетики США, прошла масштабную модернизацию, включая установку новых систем управления плазмой, передовых средств диагностики, усовершенствование систем нагрева и возбуждения тока и оптимизацию диверторной системы. В результате модернизации токамак DIII-D был оснащен новейшими средствами, необходимыми для его эксплуатации в соответствии с требованиями термоядерной установки. В ходе проведенных незадолго до модернизации экспериментов на DIII-D



была одновременно достигнута высокая плотность и высокая степень удержания топлива, чего ранее сделать не удавалось [6]. Такой режим эксплуатации отвечает основным требованиям многих проектов установок термоядерного синтеза в мире и дает возможность сделать процесс генерации термоядерной энергии экономически привлекательным. Кроме того, в ходе экспериментов на DIII-D исследователи из Принстонской лаборатории физики плазмы продемонстрировали способность своей модели искусственного интеллекта (ИИ), обученной только на основе ранее

полученных экспериментальных данных, прогнозировать появление плазменных неустойчивостей, также известных как разрывные неустойчивости, за 300 миллисекунд до их появления [7]. Датчику ИИ удавалось прогнозировать и предотвращать появление неустойчивостей прежде, чем они возникнут, что открывает перспективы для разработки датчика, способного в реальном времени поддерживать режим устойчивой заряженной плазмы в установках термоядерного синтеза. ■

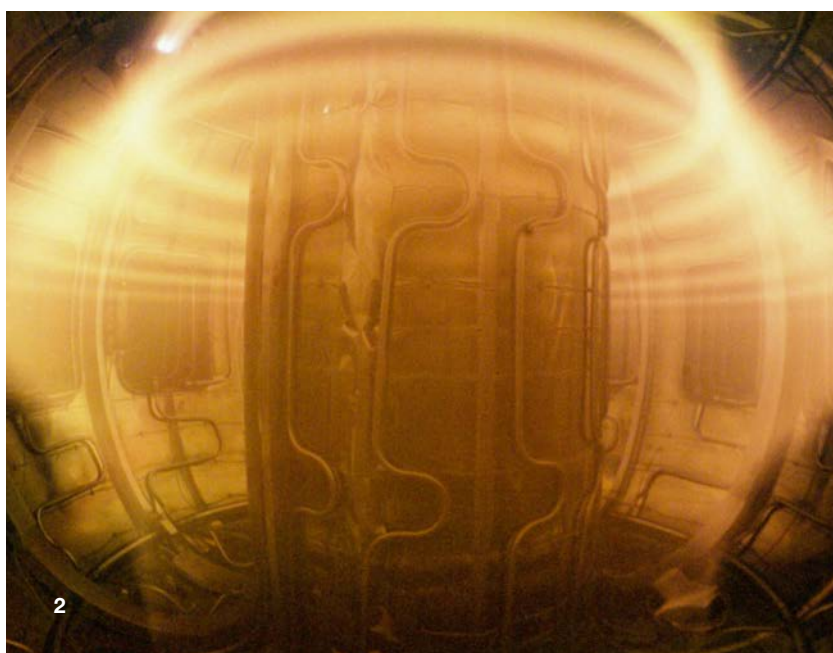
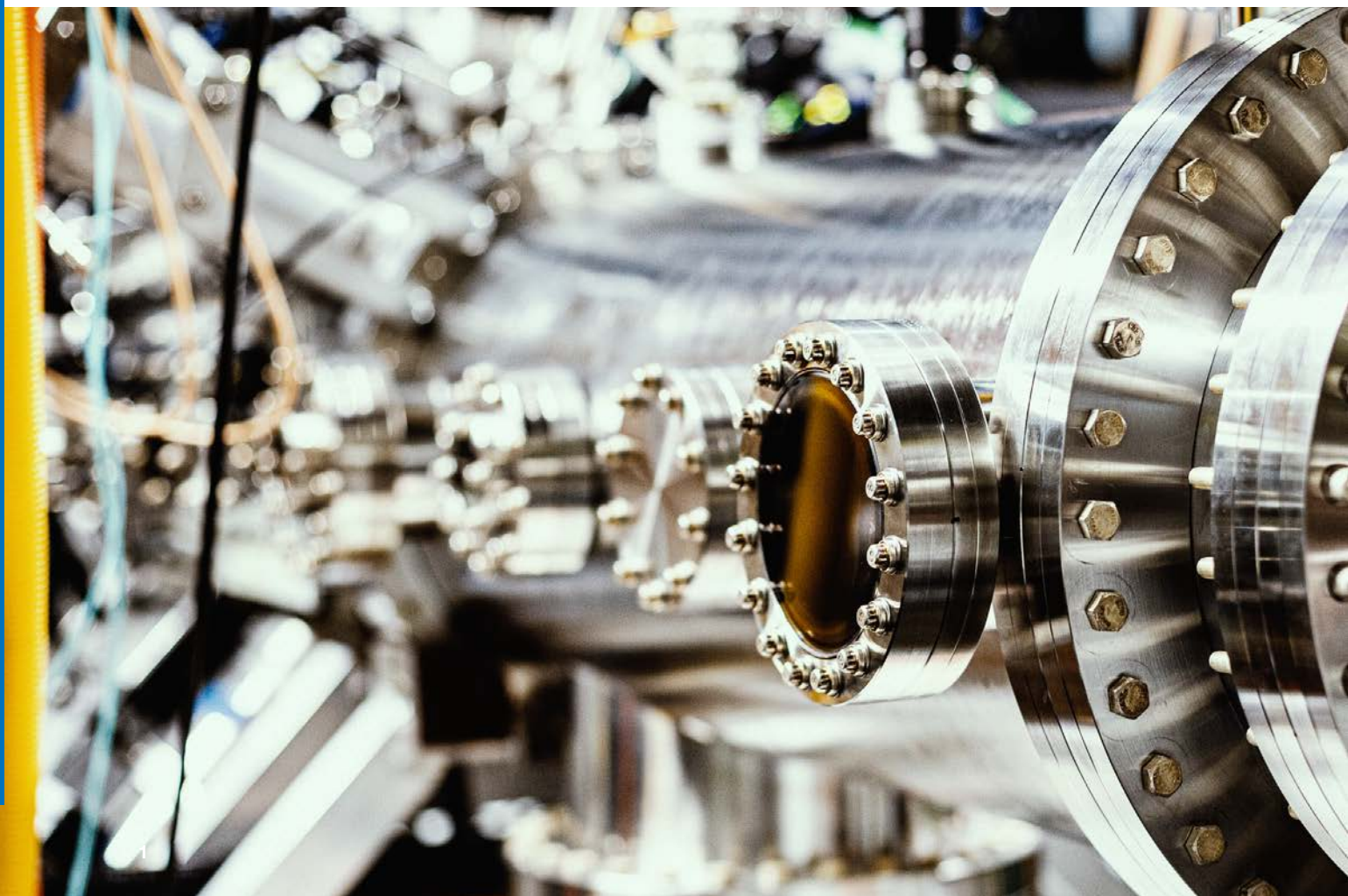
Планомерно продвигается вперед сооружение токамака

SPARC, разрабатываемого «Коммонуэлт фьюжн системз» (КФС). Планируется, что токамак продемонстрирует чистый прирост энергии, полученной с научной целью. Доставка на площадку вакуумного сосуда стала важнейшим рубежом в реализации проекта. Ожидается, что SPARC будет введен в эксплуатацию в 2025 году и продемонстрирует чистый прирост энергии, полученной с научной целью. Вслед за SPARC к середине 2030-х годов планируется завершить работу над аналогичным проектом реактора ARC, целью которого является демонстрация производства электроэнергии. ■

3 Инженер устанавливает новую диагностическую аппаратуру внутри установки DIII-D (публикуется с разрешения «Дженерал атомикс», США).

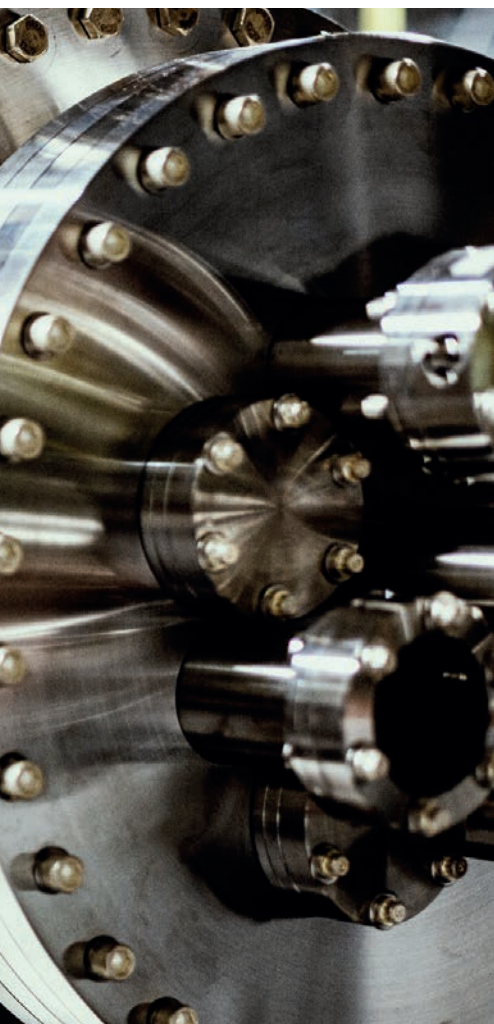


«ИИ для управления плазмой в термоядерной энергетике», видеоролик инициативы «ИИ во благо»



▲
1 Экспериментальная Z-машина компании «Зеп энерджи», известная как FuZE (публикуется с разрешения «Зеп энерджи», США).

◀
2 Внутренний вид токамака HН70, пущенного в строй в июне 2024 года (публикуется с разрешения «Энерджи сингьюлэрити», Китай).



На своей экспериментальной Z-машине, известной как FuZE, компания «Зэп энержи» сумела достичь температур электронов плазмы с энергиями 1–3 кэВ [8], превысивших 10 миллионов градусов по Цельсию. Производительность этой установки вышла на уровень, сопоставимый с показателями ведущих мировых экспериментальных термоядерных установок. Одновременно ведется разработка термоядерной установки по той же технологии. ■

На инновационном высокотемпературном сверхпроводящем (ВТСП) токамаке HH70, разработанном компанией «Энержи сингьюлэрити», была получена первая плазма. Это устройство представляет собой систему из 26 ВТСП-магнитов с тороидальным магнитным полем с индукцией 0,6 Тл и основным радиусом 0,75 м. В перспективе «Энержи сингьюлэрити» планирует создание ВТСП-токамака нового поколения HH170 с магнитным полем высокой напряженности, на котором предполагается достичь коэффициента усиления в дейтерий-третиевой плазме более 10. ■

Термояде станции

рные

На данный момент на разных стадиях разработки находятся как минимум 20 концептуальных проектов термоядерных станций в таких странах, как Германия, Израиль, Канада, Китай, Российская Федерация, Соединенное Королевство, США, Швеция, Южная Корея и Япония. Расчетные сроки завершения указанных проектов варьируются от конца 2020-х до середины 2050-х годов.

Они разрабатываются правительствами отдельных стран, частными компаниями и некоторыми совместными государственно-частными предприятиями.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ПИЛОТНОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ СТАНЦИИ [9, 10]

Категория	Критерии
Показатели термоядерного синтеза и выхода электроэнергии	1. Чистая тепловая мощность, усредненная по времени синтеза, 100–500 МВт 2. Пиковая генерация электроэнергии ≥ 50 МВт (эл.) 3. $Q_p > 1$ 4. Работа в течение нескольких экологических циклов^a
Компоненты	5. Стратегия, стоимость и сроки демонтажа и замены вышедших из строя компонентов как один из элементов проекта
Топливо и зола	6. Концепция золоудаления может быть масштабирована для применения на первой в своем роде термоядерной электростанции 7. Компоненты, обращенные к плазме, которые способны выдерживать повреждения, вызванные гелиевой золой, в среде, характерной для первой в своем роде термоядерной электростанции 8. Коэффициент воспроизводства трития $> 0,9$ 9. Запас трития ≤ 1 кг 10. Инновации в области науки о граничной плазме, технологий загрузки топлива и переработки газа 11. Тритий, четко определенная подотчетность вместе с аналитическими методами, которые могут удовлетворять требованиям подотчетности
Надежность и доступность	12. Выполнение дистанционного обслуживания и замены 13. Модульные, сменные компоненты
Соображения охраны окружающей среды и безопасности	14. Уменьшение выбросов трития 15. Минимизация объемов и общей опасности отходов и, по возможности, предотвращение образования отходов выше класса С 16. Удаление активированных отходов
Экономические параметры	17. Полная стоимость строительства менее 5–6 млрд долл. США

^a Экологический цикл термоядерной станции включает в себя установку основных компонентов, эксплуатацию станции до тех пор, пока эти компоненты не выйдут из строя, а затем проведение технического обслуживания для продолжения эксплуатации. Хотя продолжительность этого цикла точно не определена и может быть разной в зависимости от конструкции, обычно он длится около года эксплуатации на полную мощность, прежде чем потребуются техническое обслуживание или ремонт первой в своем роде термоядерной электростанции.

Примечание. Критерии, выделенные серым цветом, относятся к термоядерным станциям на основе дейтерий-тритиевой плазмы.

Термоядерная установка компании «Дженерал фьюжн» («Дженерал фьюжн», Канада)

Целью «Дженерал фьюжн» является сооружение первой в мире термоядерной установки с намагниченной мишенью к началу или середине 2030-х годов. Механическое сжатие жидкометаллической оболочки в термоядерной установке системой поршней позволяет создать условия для протекания синтеза в виде коротких импульсов, а не непрерывной реакции. Эта уникальная конструкция, не требующая применения сверхпроводящих магнитов или системы лазеров, призвана решить проблемы деградации материалов, производства топлива, захвата энергии и высоких затрат, препятствующих коммерческому производству термоядерной энергии. Согласно нынешнему проекту, электростанция «Дженерал фьюжн» будет способна генерировать примерно 300 МВт (эл.) двумя совместно работающими агрегатами по 150 МВт каждый, обеспечивая безуглеродное производство электроэнергии по конкурентной цене.

+ 1

2025 г.

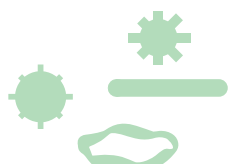
Электрические термоядерные системы



+ 9

2030 г.

Avalanche Energy, Blue Laser Fusion, Helion Energy, Kyoto Fusion, LPP Fusion, Magneto Inertial Fusion Technologies, nT-Tao, Openstar Technologies, Princeton Fusion Systems



+ 27

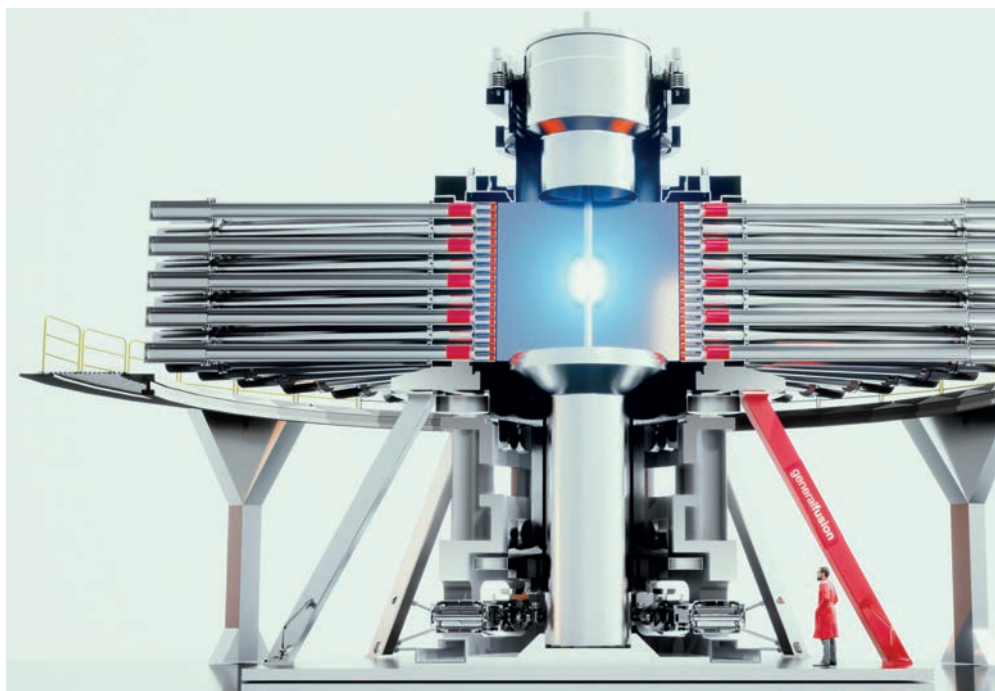
2035 г.

Accelaron Fusion, Commonwealth Fusion Systems, Deuterio, Ex-Fusion, First Light Fusion, Fuse, General Atomics, General Fusion, HB11 Energy, Helical Fusion, Longview Fusion Energy Systems, Marvel Fusion, Nearstar Fusion, NK Labs, Novatron Fusion Group, Openstar Technologies, Proxima Fusion, Realta Fusion, Renaissance Fusion, Stellarex, TAE Technologies, Terra Fusion Energy Corporation, Thea Energy, Tokamak Energy, Type One Energy Group, Xcimer Energy, Zap Energy

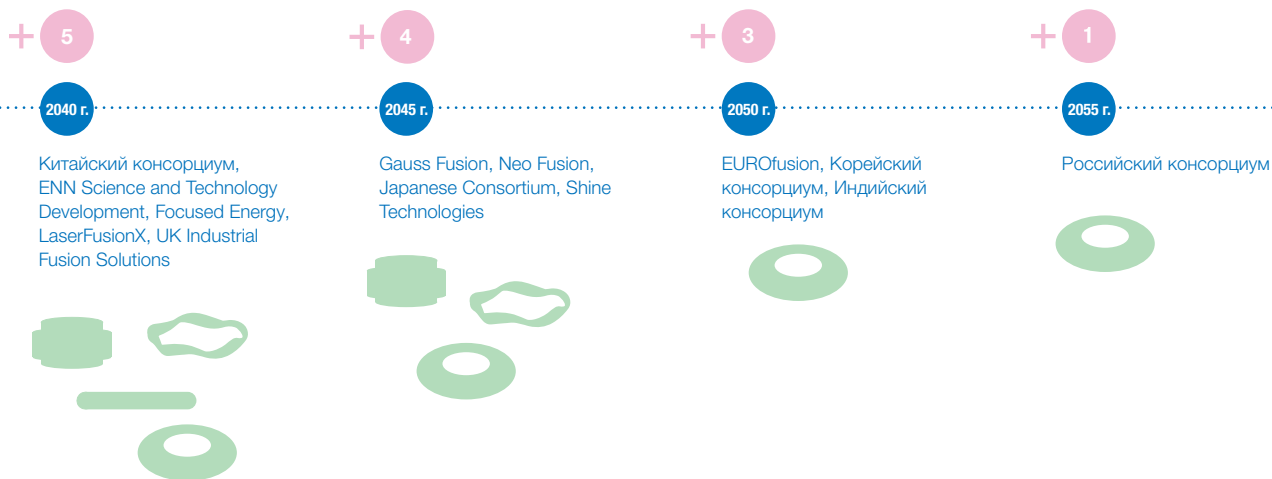


Результаты экспертной оценки в январе 2024 года подтвердили, что установка «Дженерал фьюжн» может обеспечить ровное, быстрое и симметричное сжатие полости из жидкого металла, необходимое для промышленной электростанции. В марте 2024 года компания также достигла беспрецедентных успехов в области моделирования жидкометаллической оболочки в промышленной установке, разработав собственное программное обеспечение для испытания различных конструкций и конфигураций электростанции.

«Дженерал фьюжн» работает над сооружением экспериментальной термоядерной установки под названием Lawson Machine 26 (известной как LM26), чтобы найти инновационные технические решения, способные ускорить процесс создания электростанции с минимальными рисками. Задача LM26 — создать условия для протекания реакции термоядерного синтеза при температуре более 100 миллионов градусов по Цельсию к 2025 году и добиться чистого прироста энергии с научной целью к 2026 году. Собранные данные о работе LM26 будут учтены в проекте промышленной термоядерной установки компании. ■



▲ Возможный концептуальный проект LM26 (публикуется с разрешения «Дженерал фьюжн», Канада).

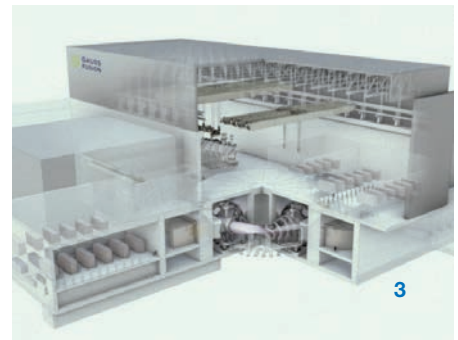




1



2



3

1 Возможная компоновка термоядерной установки EU-DEMO (публикуется с разрешения EUROfusion, Германия).

2 Китайский испытательный термоядерный реактор в представлении художника (публикуется с разрешения Университета науки и технологий Китая, Китай).

3 Компьютерное изображение Gauss GIGA (публикуется с разрешения «Гаусс фьюжн», Германия).



Китайский испытательный термоядерный реактор (Китайский консорциум, Китай)

Китайский испытательный термоядерный реактор (CFETR) — это концептуальный проект термоядерной установки, основанный на стандартной конструкции токамака, который в настоящее время разрабатывается национальным консорциумом Китая. Создание CFETR является новым шагом в реализации дорожной карты развития термоядерной энергетики Китая. Строительство планируется завершить к 2040 году. Ожидается, что проект CFETR станет связующим звеном между ИТЭР и термоядерной станцией, а также продемонстрирует чистый прирост электроэнергии и коэффициент нагрузки, равный 0,5. План НИОКР, связанных с CFETR, будет состоять из двух этапов. На первом этапе планируется сосредоточить усилия на достижении стационарного режима эксплуатации и демонстрации самовоспроизводства трития при мощности до 200 МВт. На этом этапе будут решаться научно-исследовательские проблемы, связанные с физикой горячей плазмы, чтобы убедиться в возможности достижения стационарного режима с высокими эксплуатационными параметрами. Второй этап будет посвящен апробации технологий, применимых к установкам с мощностью термоядерного синтеза более 1 ГВт. Основной целью второго этапа является создание базы данных RAMI¹ для проекта промышленной установки. Характеристики концептуального проекта CFETR, среди прочего, будут включать: основной радиус 7,2 м, малый радиус 2,2 м, вытянутость плазмы $k_{95}=2$, плазменный ток 14 МА, магнитное поле по оси 6,5 тесла, удельный коэффициент $\beta_N=2,3$ и расчетный коэффициент усиления с научной целью $Q_{sci}=20$. ■

EU-DEMO (Eurofusion, ЕС)

EU-DEMO — это концептуальный проект термоядерной установки на основе стандартной конструкции токамака, разрабатываемый консорциумом EUROfusion в Европе. Ожидается, что установка EU-DEMO придет на смену ИТЭР в европейской дорожной карте освоения производства электроэнергии с помощью термоядерного синтеза. На данный момент установка находится на этапе концептуального проектирования, а ее пуск в эксплуатацию ожидается к 2050 году. Целью EU-DEMO является демонстрация технологической и экономической возможности термоядерного синтеза путем генерации примерно 500 МВт (эл.) чистой электроэнергии с обеспечением самовоспроизводства трития. Рассматриваются несколько вариантов конструкции установки. От них будут зависеть некоторые технологические решения, включая, среди прочего, конфигурацию дивертора и конструкцию бланкета-размножителя. Предварительным концептуальным проектом EU-DEMO предусмотрены следующие параметры: основной радиус ~9 м и мощность термоядерной энергии ~2 ГВт. Основной задачей в настоящее время является максимальное уменьшение габаритов агрегата и минимизация технических рисков для скорейшего пуска установки в строй. ■

Gauss GIGA («Гаусс фьюжн», Германия)

Целью компании «Гаусс фьюжн» является проектирование и разработка к 2045 году установки Gauss GIGA — термоядерной станции гигаваттного класса на основе конструкции стелларатора. Проект будет осуществляться в рамках государственно-частного партнерства национальных и европейских учреждений. Текущий базовый проект имеет относительно высокое аспектное отношение и поперечное сечение, схожее с ИТЭР, что позволяет использовать магниты и вакуумные камеры, производство, транспортировка и монтаж которых могут выполняться силами существующей промышленной базы.

«Гаусс фьюжн» планирует ускорить реализацию проекта, отказавшись от создания промежуточных экспериментальных или демонстрационных устройств. Это будет достигнуто благодаря многоэтапному процессу ввода в эксплуатацию первой в своем роде термоядерной станции. Ввод в эксплуатацию планируется проводить в несколько этапов с возможностью сбора максимального объема данных и внесения функциональных дополнений и улучшений на каждом из них. В начале процесса планируется сконструировать первичный плазменный агрегат, затем продемонстрировать систему дистанционного технического обслуживания, затем перейти к установке, синтезирующей тритий, и, наконец, запустить непрерывный топливный цикл и начать генерацию электроэнергии.

Как ожидается, такой поэтапный подход позволит разделить графики разработки технологий и отладки параметров, систем диагностики и управления. Он также упростит сбор данных о наиболее важных материалах. ■

Термоядерная установка Proxima («Проксима фьюжн», Германия)

«Проксима фьюжн» занимается разработкой квазиизодинамических стеллараторов с полями высокой напряженности на базе технологии ВТСП-магнитов. Концептуальные решения для проекта термоядерной станции компания заимствовала у инновационного немецкого стелларатора Wendelstein 7-X (W7-X), в котором впервые были применены принципы квазиизодинамической оптимизации и конструкция дивертора в виде магнитных островов. В основе проекта установки «Проксима фьюжн» лежит ВТСП-технология, которая позволяет достичь амплитуд магнитного поля, недоступных для обычных (низкотемпературных) сверхпроводящих магнитов, благодаря комплексному компьютерному моделированию, дающему возможность преодолеть прежние технические ограничения в отношении несущих конструкций. Принцип действия квазиизодинамических стеллараторных конструкций «Проксима фьюжн» основан на применении высокочастотного электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы и свинцово-литиевых водоохлаждаемых бланкетов-размножителей. ■

Установка Тао (nT-Taο, Израиль)

Израильский стартап nT-Taο занимается разработкой проекта термоядерной установки размером примерно с грузовой

¹ RAMI — аббревиатура, в переводе обозначающая «надежность», «готовность», «технологичность» и «контролируемость». Она описывает процесс, главной целью которого является контроль эксплуатационной надежности всех систем термоядерной установки и поддержание показателей работы этих систем в режиме эксплуатации при максимально возможной готовности.

контейнер. Такая система сможет подавать 10–20 МВт электроэнергии в существующую сеть либо служить в качестве удаленного, автономного и масштабируемого источника энергоснабжения. К концу нынешнего десятилетия nT-TaO планирует выйти на полупромышленную стадию разработки проекта. Компания применяет собственную методику импульсного нагрева плазмы и топологию магнитной камеры на основе динамически устойчивого тора. Поставлена задача уменьшить габариты агрегата, что позволит ускорить этапы его последующей доработки, снизить затраты и упростить конструкцию. ■

Электростанция «Хеликал фьюжн» («Хеликал фьюжн», Япония)

Компания «Хеликал фьюжн» ставит своей целью разработку термоядерной установки для работы в стационарном режиме к 2034 году и планирует вывести ее на рынок в 2040-х годах. Установка основана на гелиотронной конфигурации с двумя спиральными катушками и предусматривает использование технологий ВТСП-проводников и жидкометаллического blankets. Гибкий ВТСП-проводник с высокой плотностью тока позволяет создавать компактные спиральные катушки. Жидкометаллический blanket защищает все стенки, обращенные к плазме, и обеспечивает высокоэффективную генерацию электроэнергии. Кроме того, гелиотронная конструкция дает возможность более простого технического обслуживания конструктивных элементов по сравнению с другими стеллараторами, что делает ее особенно пригодной для промышленного внедрения. Эти инновации открывают возможности для создания компактной термоядерной электростанции с электрической мощностью 50–100 МВт (эл.). ■

JA-DEMO (Японский консорциум, Япония)

JA-DEMO — это концептуальный проект термоядерной установки, разрабатываемый в Японии на основе стандартной конструкции токамака. Целями разработки JA-DEMO являются обеспечение устойчивой и бесперебойной выработки электроэнергии мощностью более нескольких сотен мегаватт, самовоспроизводства трития и доступности установки, что откроет путь к промышленному производству термоядерной энергии. К основным принципам JA-DEMO относится демонстрация технической осуществимости проекта на основе конструктивных решений, используемых для компонентов ИТЭР, и обеспечение гибкости режимов эксплуатации — от импульсного (в течение примерно 2 часов) до стационарного. Строительство JA-DEMO ожидается завершить к 2045 году, а вскоре после этого планируется демонстрация генерации электроэнергии в импульсном режиме. Второй этап предполагает выход на стационарный режим эксплуатации к 2055 году. Проектные характеристики JA-DEMO, среди прочего, будут включать: мощность 1,5 ГВт, основной радиус 8,5 м, малый радиус 2,42 м, вытянутость плазмы $k_{95}=1,65$, плазменный ток 12,3 МА, магнитное поле по оси 5,94 Тл, удельный коэффициент $\beta_N=3,4$, мощность возбуждения тока 83,7 МВт и расчетный коэффициент усиления с научной целью $Q_{sci}=17,5$. ■

K-DEMO (Корейский консорциум, Южная Корея)

K-DEMO — это концептуальный проект термоядерной установки, разрабатываемый в Республике Корея на основе

стандартной конструкции токамака. Концептуальный проект K-DEMO имеет следующие параметры: основной радиус 6,8 м, малый радиус 2,1 м, тороидальное поле около 7 Тл (при использовании низкотемпературных сверхпроводников) и плазменный ток более 12 МА. Инженерное проектирование K-DEMO планируется завершить к 2035 году. В последнее время основное внимание уделяется области проектных параметров, которая исследуется при помощи суперкомпьютера для изучения мировых показателей. Кроме основной концепции, также ведется работа над усовершенствованным проектом установки с меньшими габаритами и применением высокотемпературных сверхпроводящих магнитов. ■

ДЕМО-РФ (Российский консорциум, Российская Федерация)

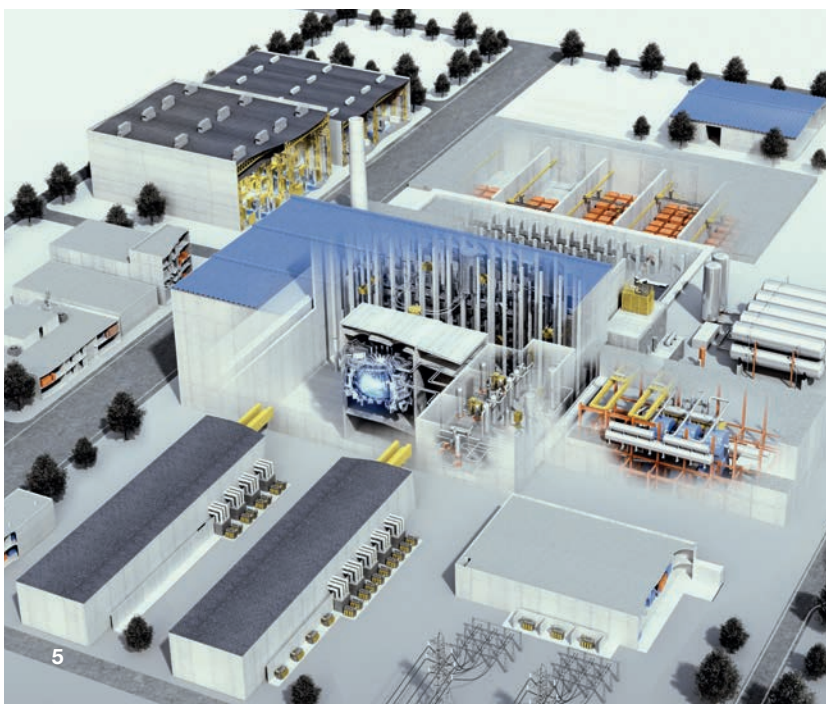
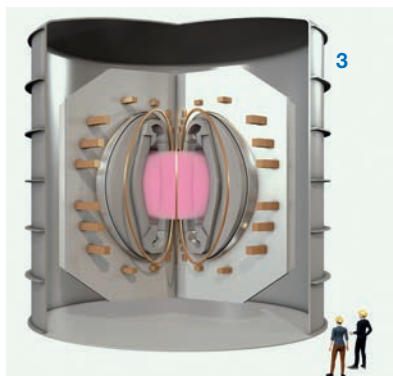
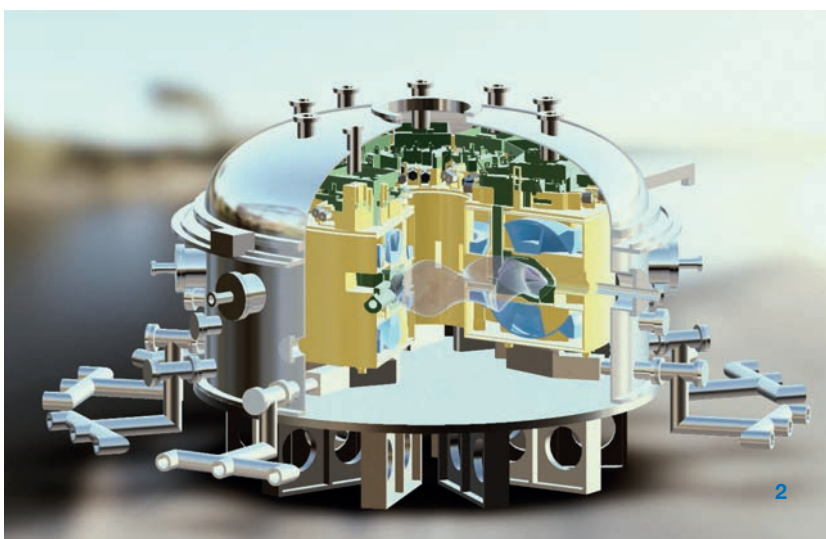
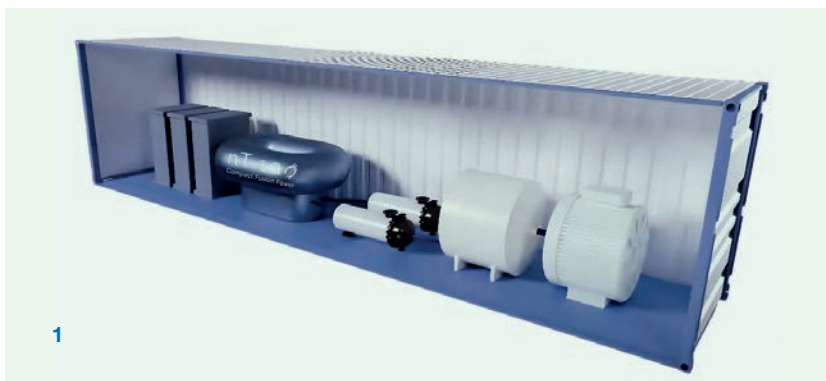
ДЕМО-РФ — это концептуальный проект термоядерной установки, разрабатываемый в Российской Федерации силами национального консорциума на основе стандартной конструкции токамака. Сооружение ДЕМО-РФ предполагается завершить к 2055 году и продемонстрировать после этого чистый прирост электроэнергии. Характеристики ДЕМО-РФ находятся в процессе разработки. В настоящий момент концептуальным проектом установки предусмотрено ее использование либо исключительно в качестве термоядерной электростанции, либо в виде гибридного реактора синтеза-деления с применением ВТСП-магнитов, суммарным магнитным полем свыше 8 Тл и током плазмы около 5 МА. Для первой стенки и дивертора предполагается использовать обращенные к плазме компоненты из жидкого металла. Российская Федерация также планирует разработать гибридный реактор синтеза-деления, известный как ДЕМО с термоядерным источником нейтронов. Задача такого реактора состоит не только в получении энергии в результате термоядерного синтеза, но и в использовании образующихся в ходе термоядерной реакции нейтронов для преобразования неделящегося урана в делящийся или трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов. ДЕМО с термоядерным источником нейтронов, сооружение которого планируется завершить к 2033 году, является базисом ускоренной стратегии Российской Федерации по освоению термоядерной энергии к 2050 году. ■

N4 («Новатрон фьюжн груп», Швеция)

«Новатрон фьюжн груп» занимается разработкой концептуального проекта термоядерной установки на основе стандартной конструкции пробкотрона. Дорожной картой компании предусмотрена разработка двух экспериментальных агрегатов (N1 и N2), полупромышленной демонстрационной установки (N3) и первой в своем роде термоядерной электростанции N4. В настоящее время компания успешно работает над подтверждением принципа действия N1, ставя своей целью к концу 2030-х годов достичь показателя мощности на N4 в 1,5 ГВт (эл.). Установка N4 спроектирована для эксплуатации в стационарном режиме с непрерывной подачей топлива и отводом отходящих газов, что обеспечивает прямое преобразование ионизированных частиц в электрическую энергию. Кроме того, N4 может быть оборудована ВТСП-магнитами для дополнительного повышения ее производительности и эффективности. ■

**Пилотная термоядерная станция
«Токамак энерджи» («Токамак
энерджи», Соединенное
Королевство)**

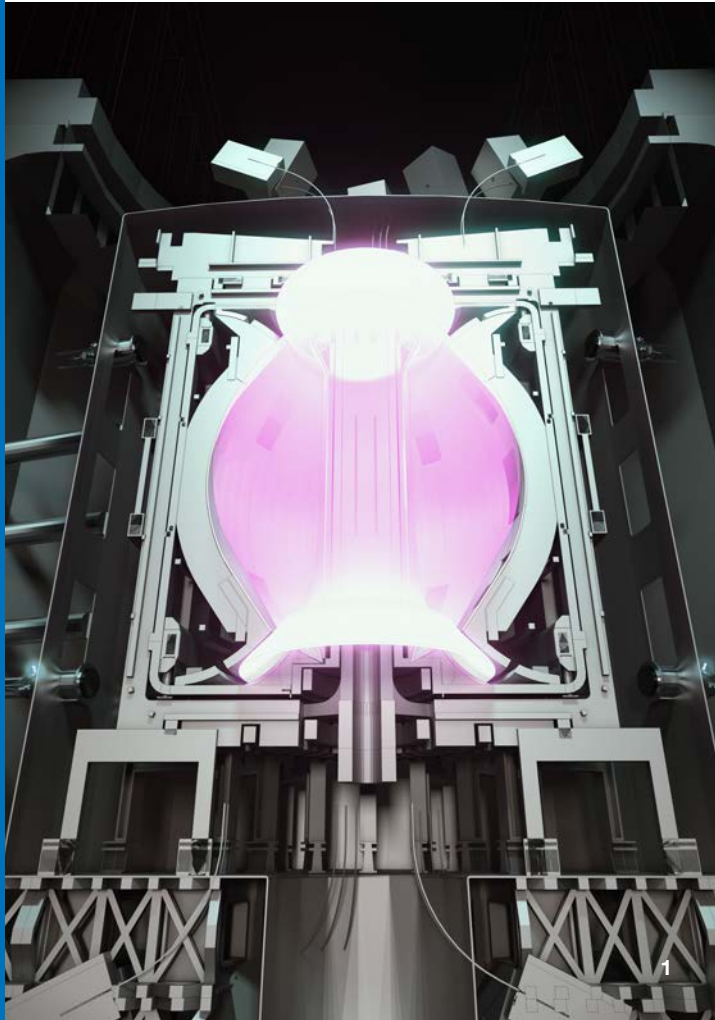
На своей пилотной термоядерной станции компания «Токамак энерджи» планирует интегрировать, испытать и продемонстрировать работу всех систем, необходимых для будущих промышленных термоядерных электростанций. Она задумана как токамак с низким аспектным отношением, оснащенный ВТСП-магнитами тороидального поля (из редкоземельного оксида бария-меди), с целью продемонстрировать устойчивую пульсацию горячей плазмы с чистым приростом энергии. Над проектированием и разработкой установки совместно работает международная группа экспертов из США и Соединенного Королевства в рамках Поэтапной программы развития термоядерной энергетики Министерства энергетики США. ■



3 Возможный концептуальный проект пилотной термоядерной станции «Токамак энерджи» (публикуется с разрешения «Токамак энерджи», Соединенное Королевство).

4 Концептуальный проект термоядерной установки N4 компании «Новатрон» (публикуется с разрешения «Новатрон», Швеция).

5 Концептуальный проект JA-DEMO (публикуется с разрешения Национальных институтов квантовых наук и технологий, Япония).



STEP («Юкей индастриал фьюжн солишнз», Соединенное Королевство)

Прототип термоядерной установки STEP призван продемонстрировать чистый прирост энергии, самообеспеченность топливом и открыть путь к созданию промышленных термоядерных электростанций, первый пуск которых ожидается в 2040 году [11]. Эксперты STEP внедрили методику цифрового вариативного проектирования, которая многократно проходила оценку на уровень зрелости и несколько независимых проверок техническими консультантами. В данном концептуальном проекте достигнуто разумное соотношение между эксплуатационными показателями, затратами, габаритами и рисками. Начало разработки рабочей документации по проекту запланировано на 2025 год. Собственное дочернее предприятие УАЭСК, «Юкей индастриал фьюжн солишнз», будет отвечать за реализацию проекта STEP и возглавит государственно-частное объединение по проектированию и строительству установки на севере Англии, в Уэст-Бертоне, на площадке бывшей угольной электростанции. Помимо сооружения установки, задачей проекта STEP является также создание ведущей мировой цепи поставок в сфере термоядерного синтеза для перевода производства термоядерной энергии на промышленные рельсы. Планируется создание новой инфраструктуры

1 Создатели STEP планируют первый пуск установки в эксплуатацию в 2040 году (публикуется с разрешения УАЭСК, Соединенное Королевство).

2 На GA FPP будут использоваться усовершенствованные датчики, алгоритмы управления и высокопроизводительные компьютеры (публикуется с разрешения «Дженерал атомикс», США).



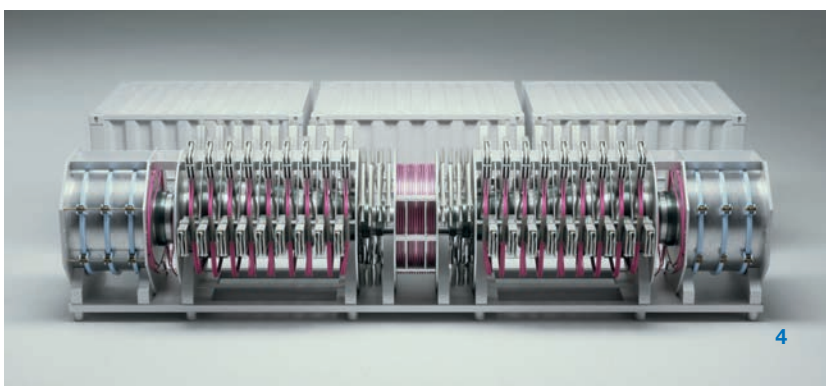
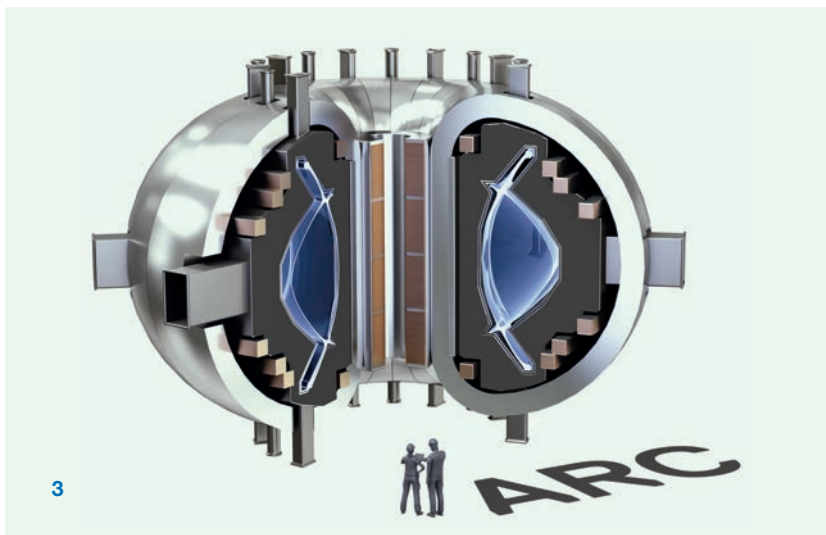
поставщиков, включающей субподрядчиков по комплексному оснащению термоядерных установок и производителей систем, которые в будущем смогут выполнять проектирование и пуск в эксплуатацию термоядерных электростанций по всему миру. ■

ARC («Коммонуэлт фьюжн системз», США)

ARC — это концептуальный проект термоядерной установки, разрабатываемый компанией КФС на основе стандартной конструкции токамака. Целью проекта является подтверждение рентабельности термоядерного синтеза при применении технологии ВТСП-магнитов. Установка ARC будет представлять собой малогабаритный стандартный токамак, оснащенный ВТСП-магнитами, с мощностью ~400 МВт (эл.), основным радиусом ~4 м, малым радиусом ~1,2 м и магнитным полем на оси ~11 Тл. В конструкцию ARC входят катушки ВТСП-магнитов тороидального поля, полоидального поля и центрального соленоида. Стыковое соединение некоторых катушек позволит осуществлять демонтаж для оперативной замены вакуумной камеры, тем самым решив проблему износа первой стенки и дав возможность менять конструкции вакуумной камеры и материалы дивертора в одном и том же токамаке.

При реализации проекта ARC будут применены данные и опыт, полученные на проекте токамака SPARC, который в настоящий

3 На ARC будет применена технология ВТСП-магнитов (публикуется с разрешения КФС, США).



момент находится на стадии реализации (строительство было начато в феврале 2023 года). Завершение строительства SPARC ожидается в 2025 году, а пуск в эксплуатацию — в 2026 году с демонстрацией чистого прироста энергии с научной целью. Строительство зала токамака SPARC практически завершено, компоненты агрегата доставлены на площадку и в текущем году начат монтаж. «Коммонуэлт фьюжн системз» обнародовала информацию о полученном финансировании в размере около 2,1 млрд долл. США, и в настоящее время ее постоянный штат насчитывает более 800 сотрудников, участвующих в строительстве SPARC, производстве ВТСП-магнитов на собственном предприятии компании и проведении НИОКР по линии проекта ARC. ■

GA FPP («Дженерал атомикс», США)

GA FPP — это концептуальный проект термоядерной станции, разрабатываемый компанией «Дженерал атомикс», на основе конструкции компактного усовершенствованного токамака для работы в стационарном режиме. В основу проектного решения будет положено использование усовершенствованных датчиков, алгоритмов управления и высокопроизводительных компьютеров для управления плазмой, работой blankets-размножителей из карбида кремния для воспроизводства трития и нагревом с помощью микроволнового излучения для запуска термоядерных реакций в плазме. ■

4 Polaris готовится стать первой установкой, производящей электроэнергию на основе термоядерного синтеза (публикуется с разрешения «Хелион», США).

Polaris («Хелион энерджи», США)

На счету «Хелион энерджи» — строительство шести прототипов термоядерных установок, а в настоящее время компания занимается сооружением седьмой установки под названием Polaris. Ее строительство является огромным скачком вперед в области промышленной термоядерной энергетики: Polaris готовится стать первой установкой, на которой будет производиться электроэнергия путем термоядерного синтеза. Установка Polaris, сооружение которой ведется на территории размером с половину футбольного поля, может считаться полупромышленной термоядерной установкой «Хелион энерджи», которая закладывает основу для первой промышленной термоядерной установки. Эта установка общей длиной 19 метров будет рассчитана на использование дейтерий-дейтериевого, дейтерий-гелиевого (гелий-3) и дейтерий-тритиевого топлива.

Она будет работать с частотой 0,1 Гц и более и емкостью конденсаторной батареи свыше 50 МДж. Максимальное значение индукции магнитного поля превышает 15 Тл, что эквивалентно давлению примерно 1000 атмосфер. Polaris планируется оборудовать 3800 системами диагностики и фильтрации газов для мониторинга эксплуатационных параметров и фильтрации конечных продуктов. ■



1



2

Установка Longview («Лонгвью фьюжн энерджи системз», США)

Компания «Лонгвью фьюжн энерджи системз» занимается разработкой термоядерной установки на основе технологии лазерного синтеза с инерционным удержанием плазмы, проектирование которой будет выполняться совместно с «Флуор корпорейшн». Эта установка послужит прототипом промышленных установок, которые будут сооружаться в США и во всем мире. ■

SX0 («Стелларекс», США)

Созданная в 2022 году компания «Стелларекс» занимается разработкой первой термоядерной установки на основе конструкции стелларатора. Совместно с «Онтарио пауэр дженерейшн», партнерами из отрасли и научно-исследовательскими институтами «Стелларекс» планирует создание в провинции Онтарио, Канада, Центра передовых стеллараторных технологий в сфере термоядерной энергетики. Целью компании является сооружение термоядерной установки SX0 на базе стелларатора, получение чистого прироста энергии в 2030 году, а затем завершение строительства термоядерной электростанции «Стелларекс» SX1 мощностью 600 МВт (тепл.) и 250 МВт (эл). ■

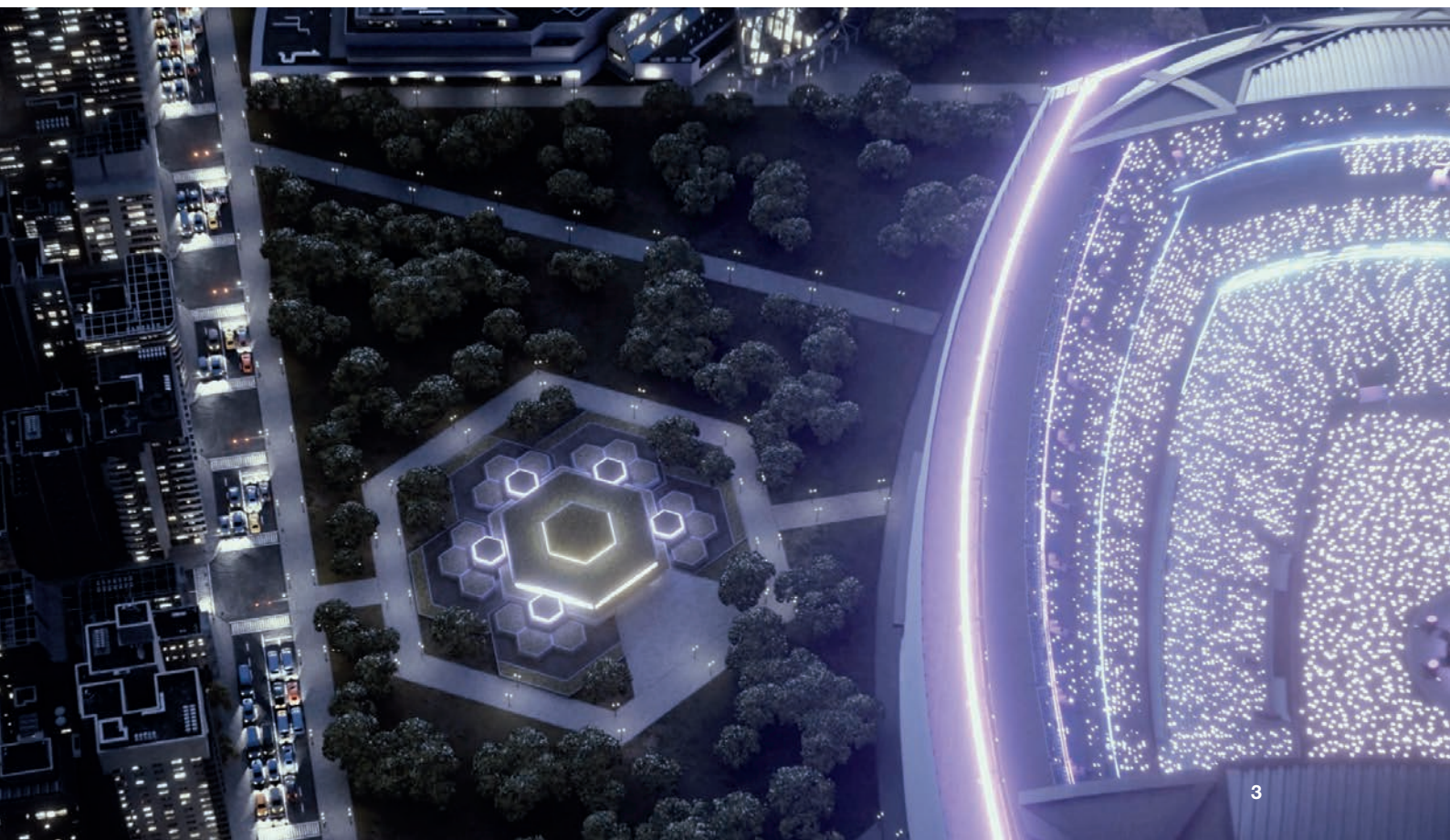
Da Vinci («ТАЕ технолоджиз», США)

С момента своего основания компания «ТАЕ технолоджиз» занимается освоением технологии бор-водородного термоядерного синтеза. Эта технология безопасна, обеспечена сырьем на более чем 100 000 лет вперед и доступна по всему миру, но для получения термоядерной плазмы, необходимой для выработки энергии, она потребует поддержания более высоких температур. Для достижения таких параметров TAE разработала собственную платформу под названием «Усовершенствованная конфигурация с обращенным полем под воздействием пучка». Таким образом компания объединяет фундаментальные основы физики плазмы и физики ускорителей для нагрева и стабилизации плазмы. Кроме того, благодаря компактной линейной конфигурации удастся сконструировать меньший по габаритам и, следовательно, более масштабируемый и экономичный агрегат. Ожидается, что Da Vinci — разрабатываемая «ТАЕ технолоджиз» установка седьмого поколения — станет первым в мире прототипом установки бор-водородного термоядерного синтеза, которая будет подавать чистую электроэнергию в сеть в начале 2030-х годов. ■

1 Устройство седьмого поколения производства «ТАЕ технолоджиз», Da Vinci, должно стать первым в мире прототипом установки бор-водородного термоядерного синтеза (публикуется с разрешения «ТАЕ технолоджиз», США).

2 Установка Longview будет работать на основе технологии лазерного синтеза с инерционным удержанием плазмы (публикуется с разрешения «Лонгвью фьюжн энерджи системз», США).

3 Z-машина со стабилизацией плазменного шнура сдвиговым потоком частиц на установке «Зэп» (публикуется с разрешения «Зэп энерджи», США).



3

Установка Zap (компания «Зэп энерджи», США)

Компания «Зэп энерджи» занимается разработкой термоядерной установки, в которой плазменный шнур стабилизирован сдвиговым потоком частиц (эффект «Z-пинч»). Такая технология способна удерживать и сжимать плазму в отсутствие сверхпроводящих магнитных катушек или мощных лазеров, что позволяет быстрее поставить производство энергии на промышленные рельсы. В работающей термоядерной установке возникновение эффекта «Z-пинч» всякий раз начинается с мощного электрического импульса, подаваемого конденсаторной батареей. В результате этого импульса облако газообразного дейтерия впрыскивается в плоское кольцо горячей плазмы. Кольцо стремительно продвигается вниз по внутреннему катоду, или отрицательно заряженному электроду, агрегата. Пройдя через носовой конус катода, кольцообразная плазма преобразуется в плотный, сдвинутый относительно оси Z шнур, в потоке которого разные слои двигаются с разной скоростью. Стенки из жидкого металла, способные выдержать воздействие экстремальных условий, захватывают энергию из термоядерной плазмы. Свинцово-литиевая смесь в стенках образует тритий, который в качестве топлива будет подаваться обратно в установку. Благодаря такой компактной конструкции габариты одной термоядерной установки могут составлять всего 3 м в ширину и вырабатывать примерно 50 МВт (эл.), что достаточно для

электроснабжения небольшого города, причем вероятно, что электростанции «Зэп энерджи» будут устраиваться в виде нескольких модулей. ■

Роль термоядерной энергии в углеродно нейтральной системе электроснабжения

В мире, достигшем углеродной нейтральности, термоядерная энергетика имеет потенциальную общественную ценность в триллионы долларов США. Масштабы и сроки внедрения, а также эксплуатация термоядерных электростанций будут в значительной степени зависеть от:

- стоимости термоядерной энергии (основные факторы, определяющие стоимость термоядерных электростанций, включают стоимость оборудования, требования нормативного регулирования, а также затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание);
- стоимости и доступности альтернативных низкоуглеродных технологий в каждом регионе;
- ограничений на выбросы диоксида углерода;
- роста экономики и спроса на электроэнергию;
- структуры рынка.

Для того чтобы термоядерный синтез мог встать на промышленные рельсы, необходима разработка материалов и создание производственной базы для изготовления узкоспециализированных компонентов, что не относится к сырьевым материалам [12]. ■



Роль термоядерной энергии в углеродно нейтральной системе

Контекст и сценарии

МИ

Обзор усилий
государственного
и частного секторов
в рамках программ
освоения термоядерной
энергии

Быстрый рост инвестиций в компании термоядерной отрасли

Эти усилия идут в одном русле с решением общемировой задачи перехода к использованию устойчивых источников энергии и освоения термоядерного синтеза как безопасного, экологически чистого и неисчерпаемого источника энергии по всему миру.



Ключевые элементы термоядерного синтеза МАГАТЭ

Такой стремительный рост требует международного взаимодействия для интенсификации научно-технического прогресса, создания цепей поставок и нормативной базы регулирования.

Правительства стран всего мира признают потенциал термоядерной энергетики и для ускорения прогресса вкладывают значительные средства в сферу НИОКР. Ведется разработка внутригосударственных стратегий, что сопровождается выделением значительных объемов финансирования на поддержку инициатив как государственного, так и частного сектора, разработку нормативной базы регулирования и более активное задействование логистических цепей. Отмечается также более широкое сотрудничество между государствами, что выражается в заключении соглашений об обмене опытом, совместном использовании ресурсов и объектов инфраструктуры для скорейшего промышленного освоения термоядерной энергии. Научные достижения совместно с поддержкой на государственном уровне позволяют создать надежную экосистему, которая призвана сделать термоядерную энергию реальностью в ближайшем будущем.

Наблюдается растущий интерес к термоядерной отрасли со стороны большого числа участников рынка. В отрасли был заключен ряд соглашений между разработчиками установок термоядерного синтеза и различными конечными пользователями, которые заинтересованы в получении доступа к экологически чистому и надежному источнику энергии в будущем. Среди конечных пользователей можно отметить как компании высокотехнологичного сектора, в том числе «Амазон», «Гугл» и «Майкрософт», потребность которых в энергопотреблении резко возрастает в связи с широким внедрением систем ИИ, так и производителей органического топлива, энергопредприятия, поставщиков материалов и оборудования, производителей электромобилей и даже стартапы, разрабатывающие технологию прямого захвата воздуха для извлечения CO_2 из атмосферы для достижения углеродной нейтральности. ■

Согласование усилий государственного и частного секторов в рамках программы промышленно ориентированного развития термоядерной энергетики

Перевод производства термоядерной энергии на промышленные рельсы может в будущем помочь в решении проблем изменения климата, экономической и энергетической безопасности. Поскольку в результате

реакций термоядерного синтеза в атмосферу не выбрасывается диоксид углерода и другие парниковые газы, этот потенциальный источник экологически чистой энергии крайне привлекателен для участников рынка и отраслевых инвесторов, в том числе в рамках партнерств между государственным и частным секторами (ПГЧС) [13].

Совершенные за последние годы научные открытия и прогресс в области физики и технологий термоядерного синтеза подогревают интерес частного сектора к дальнейшему освоению термоядерной энергетики, о чем можно судить по растущему объему государственных и частных инвестиций в термоядерные проекты, а также инвестиций в акционерный капитал [14, 15]. Ряд компаний планируют поставить свои установки на промышленные рельсы в ближайшие несколько лет или десятилетий.

В связи с высокой наукоемкостью и стоимостью процесса создания рентабельных термоядерных установок ПГЧС все чаще становятся важнейшим механизмом развития термоядерной энергетики. Государственные ресурсы требуют привлечения частных инвесторов, которые могут предоставить дополнительный капитал и специалистов из данной отрасли. Большой объем частных инвестиций в технологии термоядерного синтеза в мире, который сегодня превышает 7,3 млрд долл. США [15], указывает на заинтересованность инвесторов в разработке рентабельных термоядерных установок в ближайшие годы. Частные проекты нуждаются в государственной поддержке, чтобы внушить уверенность инвесторам и воспользоваться опытом и знаниями, накопленными в государственном секторе за многие годы научных исследований и разработок. При этом объем ресурсов все же ограничен и их грамотное распределение принципиально важно. ПГЧС способны упростить эту задачу, распределяя как риски, так и выгоду между государственным и частным секторами. Государственное финансирование и поддержка могут обеспечить необходимую стабильность и доверие со стороны частных инвесторов, что, в свою очередь, позволит компаниям, работающим в области термоядерных технологий, реализовывать амбициозные проекты, диверсифицируя любые финансовые риски [16]. ■

Сотрудничество государственных организаций и частного бизнеса обеспечивает более диверсифицированный подход к НИОКР, дает толчок инновациям и прогрессу за счет возможности работать одновременно и в более сжатые сроки [17]. Обычно ПГЧС предполагают разделение обязательств по проекту между частным сектором и государством, при этом государство зачастую гарантирует приток денежных средств, а частный сектор управляет

**ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕМАХ ФИНАНСИРОВАНИЯ,
ОПУБЛИКОВАННЫЕ В 2023/2024 ГОДАХ**

Государство-член	Объем финансирования (млрд долл. США)	Срок
Германия	~1,4	в течение 5 лет
Корея, Республика	~0,9	в течение 10 лет
Соединенное Королевство	~0,8	в течение 5 лет
США	~1,5 ^a	в год

^a Это включает в себя 690 миллионов долларов США, выделенных по линии Национального управления ядерной безопасности Министерства энергетики США на поддержку исследований в области инерционного термоядерного синтеза в интересах Национального управления ядерной безопасности, а не для развития термоядерной энергетики в целом.

проектированием, что означает распределение рисков.

При грамотном управлении ПГЧС могут быть мощным инструментом для решения долгосрочных задач финансовой и политической стабильности [18]. Энергетический сектор уже сумел успешно воспользоваться преимуществами ПГЧС, которые также могли бы помочь справиться с негативными последствиями изменения климата [19, 20]. Более того, основы для формирования ПГЧС уже существуют, поскольку такая форма партнерства широко применяется в других отраслях на протяжении многих лет [21].

Универсального способа конструирования термоядерных установок не существует. Поэтому неудивительно, что ПГЧС адаптивны по своей сути: при реализации какой-либо инициативы и государство, и инвесторы способны учесть специфику страны, региона, а в некоторых случаях и конкретного проекта. ■

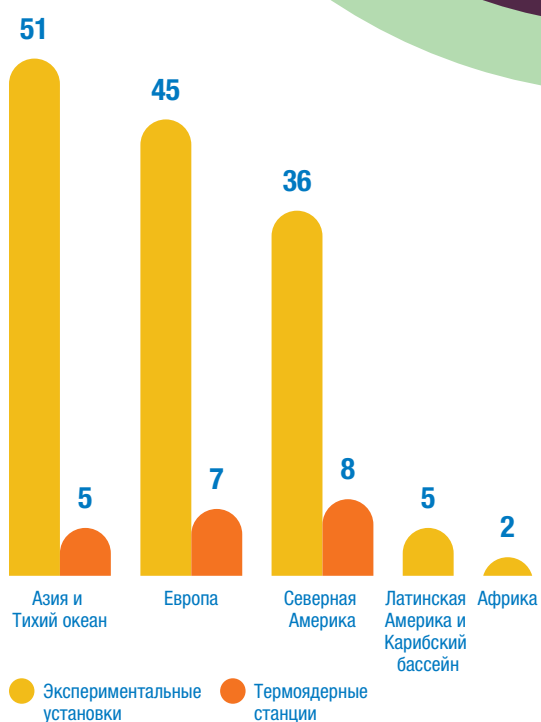
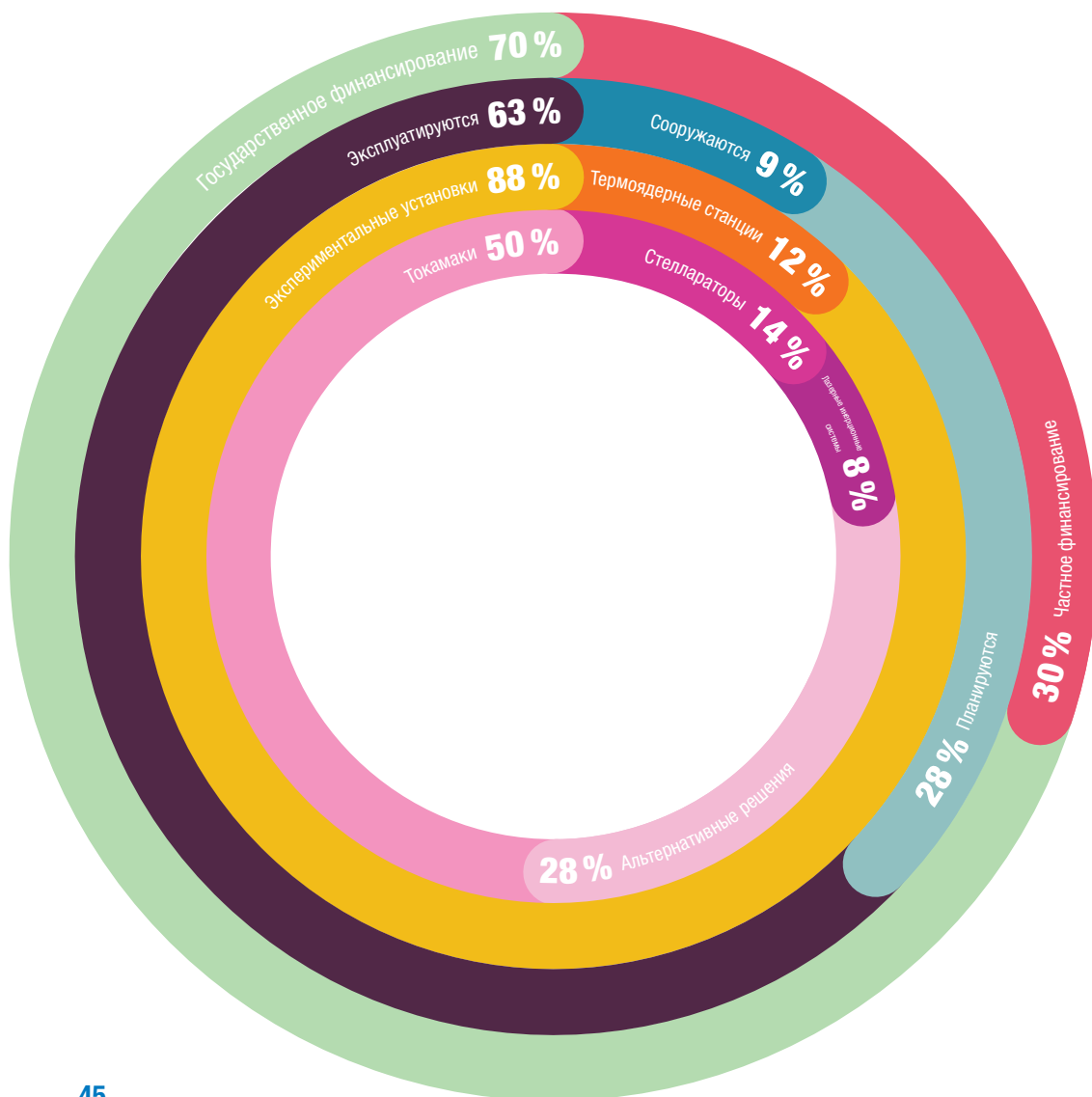
Основные программы, реализующие модели промышленно ориентированного развития термоядерной энергетики

Некоторые из перечисленных ниже крупнейших игроков мирового рынка термоядерных технологий реализуют собственные модели для того, чтобы задействовать промышленность и стимулировать развитие термоядерной энергетики.

- **Термоядерный консорциум, Китай.** Объединяет государственные предприятия центрального подчинения и научно-исследовательские институты, включая некоторые крупнейшие энергетические и сталелитейные предприятия страны.
- **Инициатива по финансированию, Германия.** Объединяет усилия компаний, университетов и научно-исследовательских институтов, имеющие целью сооружение в Германии термоядерной электростанции к 2040 году.
- **Консорциум DTT, Италия.** Включает в себя многие научно-исследовательские институты Италии, государственные структуры, региональных партнеров и участников со всего мира.
- **Программа прорывных исследований и разработок, Япония.** Привлекает к участию частные предприятия, университеты и организации с целью проработки различных решений в области термоядерной энергии.
- **Новая инициатива Республики Корея.** Имеет целью освоение термоядерных технологий на базе

ПГЧС и создание промышленной экосистемы термоядерной энергетики с лидирующей ролью частного сектора.

- **Программа «Будущее термоядерного синтеза», Соединенное Королевство.** Призвана стимулировать инновационное развитие и рост промышленного потенциала в целом за счет международного сотрудничества и проектирования будущих термоядерных электростанций, выделяя дополнительные финансовые средства на развитие инфраструктуры частных компаний по термоядерному синтезу.
- **Поэтапная программа развития термоядерной энергетики и основы государственно-частного консорциума, США.** Оказывает финансовую поддержку компаниям на основании достигнутых ими результатов и подтверждения выхода на заданные рубежи промышленного освоения. Министерство энергетики США также приступило к сбору информации о создании предполагаемого государственно-частного консорциума в области термоядерной энергетики. ■



Термоядерные устройства в мире, состояние их эксплуатации и финансирования в 2024 году [22].

Количество действующих, строящихся или планируемых термоядерных устройств в региональном разрезе.



Информационная система по термоядерным устройствам

Основные слагаемые успеха на пути к созданию промышленно ориентированной экосистемы термоядерной энергетики

С точки зрения политэкономии энергетического рынка компаниям, работающим в сфере термоядерных технологий, необходимо в равной степени оказывать поддержку в выводе своих установок на рынок и в эффективном наращивании масштабов производства. Другие существующие на рынке источники энергии пользуются преимуществами государственного партнерства, стабильного регулирования и стратегической политики налогового стимулирования, нацеленной на благо общества [23]. Оказание аналогичной поддержки развитию термоядерных технологий могло бы заложить комплексную основу для промышленного освоения термоядерной энергетики. Благодаря мерам государственной поддержки правительства могут ускорить вывод на рынок экологически чистого, неисчерпаемого, эффективного и безопасного источника термоядерной энергии.

Например, налоговая политика США стимулирует развитие различных технологий получения экологически чистой энергии. В соответствии с законом 2022 года «О снижении инфляции» многие из этих льгот распространились на сектор термоядерной энергетики [24], а с 2025 года налоговые льготы по принципу технологической нейтральности [25] будут применимы в отношении промышленного производства термоядерной энергии. Правительство Соединенного Королевства приступило к внесению изменений в нормативные документы с целью отнести термоядерные электростанции к категории национально значимых инфраструктурных проектов Англии и Уэльса. Эти изменения ускорят процесс подачи заявок на проведение проектных работ, поскольку позволят сделать акцент не на вопросе о необходимости данной технологии, а на решении конкретных проблем на местах [26]. Принятый в ЕС закон «Об углеродной нейтральности в промышленности» также определяет термоядерную энергетику как стратегически значимую технологию [27].

Помимо мер налогового стимулирования, правительства создали программы, содействующие развитию технологий выработки экологически чистой энергии; речь идет, к примеру, о нормировании используемых возобновляемых источников энергии и мандатах на технологию улавливания углерода. Имея ряд преимуществ, в том числе связанных с уровнем выбросов, термоядерная энергия при внедрении в промышленном масштабе может быть включена в список экологически чистых источников энергии или источников с нулевым уровнем выбросов. Для успешного перевода термоядерного синтеза на промышленные рельсы необходимы устойчивые цепи поставок, эффективная нормативная база регулирования и стабильные долгосрочные

капиталовложения. Для того чтобы термоядерная отрасль прочно встала на ноги, требуется совместная работа правительств, научно-исследовательских организаций и частного бизнеса. ■

Всемирная группа по термоядерной энергии

Для углубления сотрудничества в термоядерной отрасли МАГАТЭ объявило о создании Всемирной группы по термоядерной энергии (ВГТЭ) [28]. Задачей ВГТЭ является объединение усилий ученых, инженеров, представителей руководящих, финансовых и регулирующих органов, а также частных компаний с целью скорейшего перевода производства термоядерной энергии на промышленные рельсы [13]. Международное сотрудничество и координация призваны сыграть важнейшую роль в становлении промышленной термоядерной энергетики. Целью ВГТЭ является объединение государственного и частного секторов, представителей промышленности, научных кругов и гражданского общества в сплоченное глобальное термоядерное сообщество. Поддерживая единую стратегию сотрудничества, ВГТЭ стремится ускорить переход от разработки технологий термоядерного синтеза к их промышленному освоению, чтобы термоядерный синтез стал краеугольным камнем экологически чистой энергетики будущего.

В этот переломный момент, когда для ускорения темпов освоения термоядерной энергетики столь важны совместные усилия, ВГТЭ даст толчок этому процессу, сосредоточив внимание на:

- расширении глобального сотрудничества, в особенности за счет координации действий, предоставления площадок и регулярных возможностей для интерактивного диалога, обмена информацией, планирования и налаживания партнерских связей между заинтересованными представителями промышленности, государственных и регулирующих органов, научных кругов и общественности;
- содействии обеспечению эффективности программ НИОКР по термоядерной энергетике, например с точки зрения использования существующих установок и планирования сооружения новых;
- совместном выявлении существующих технологических и проектных недостатков и выработке международных стратегий по их устранению;
- поощрении дискуссий по вопросам налаживания эффективного правового регулирования термоядерной энергетики;
- более активном вовлечении общественности, приобщении к участию молодежи и достижении гендерного равенства в сфере термоядерной энергетики;
- содействии выводу термоядерных технологий на энергетический рынок;
- содействии интеграции термоядерных технологий в существующие энергосистемы, включая вспомогательную инфраструктуру. ■



МАГАТЭ будет активно способствовать выполнению обязательств, принятых в рамках ВГТЭ. Совместно с государствами-членами и другими партнерами **МАГАТЭ** будет периодически проводить совещания группы для анализа достигнутых результатов, привлечения высокопоставленных политических деятелей и поощрения дальнейших совместных действий в области термоядерной энергии. Таким образом **МАГАТЭ** намерено способствовать непрерывному поступательному движению и сотрудничеству в реализации глобальных задач освоения термоядерной энергетики.



▲
Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси и премьер-министр Италии Джорджа Мелони будут сопредседательствовать на первом совещании ВГТЭ на уровне министров (публикуется с разрешения правительства Италии).



◀ **Первое совещании ВГТЭ на уровне министров**

Перспективы освоения термоядерной энергии

Обзор национальных стратегий, международных соглашений, частных инвестиций и инвестиций в акционерный капитал, а также процессов регулирования, которые в своей совокупности ускоряют переход термоядерной энергетики на промышленные рельсы.

Национальные стратегии и международные соглашения

В ходе 29-й Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза Соединенное Королевство обнародовало свою стратегию развития термоядерной энергетики [29], представив новую программу «Будущее термоядерного синтеза». Эта инициатива предполагает, что в течение пяти лет в комплекс программ НИОКР будет дополнительно инвестировано 650 млн фунтов стерлингов (793 млн долл. США). Эти инвестиции будут использованы для создания 2200 учебных мест, строительства новой установки для испытаний топливного цикла и финансирования развития инфраструктуры частных компаний по термоядерному синтезу, в частности на базе кампуса Кулхэм УАЭСК. Это объявление было сделано вслед за решением Соединенного Королевства выйти из Программы исследований и подготовки кадров Евратома.

Ближе к концу 2024 года правительство Соединенного Королевства объявило о проведении отраслевого конкурса [30], чтобы подобрать партнеров для выполнения работ по проектированию и строительству в Соединенном Королевстве прототипа термоядерной электростанции STEP. Для создания прототипа STEP по итогам этого конкурса планируется учредить



государственно-частное партнерство под управлением дочерней компании УАЭСК «Юкей индастриал фьюжн солишнз». Предполагается, что этот объект, сооружаемый на севере Англии, продемонстрирует чистый прирост энергии в результате термоядерного синтеза к 2040-м годам, а контракты с партнерами по проектированию и строительству будут заключены к концу 2025 года или началу 2026 года.

Правительство Соединенного Королевства объявило также о намерении оптимизировать процесс планирования будущих термоядерных установок. Министерство энергетической безопасности и углеродной нейтральности Соединенного Королевства приступило к внесению изменений в нормативные документы с целью отнести термоядерные электростанции к категории национально значимых инфраструктурных проектов Англии и Уэльса. Эти изменения ускорят процесс подачи заявок на проведение проектных работ, поскольку позволят сделать акцент не на вопросе о необходимости данной технологии, а на решении конкретных проблем на местах. Будут проведены консультации [26] для обмена мнениями о национальном программном заявлении, прежде чем оно будет представлено на утверждение парламента.

Кроме того, Министерство энергетической безопасности и углеродной нейтральности Соединенного Королевства и



«Навстречу термоядерной энергетике», Соединенное Королевство, 2023 год



«Стратегия в области термоядерной энергетики — 2024», США



Министерство энергетики США дали старт новому стратегическому партнерству [31], которое ставит целью ускорить демонстрацию и вывод на рынок термоядерных энергетических установок с акцентом на реализации национальных стратегий освоения энергии термоядерного синтеза в обеих странах. Впоследствии в ходе 28-й сессии Конференции Организации Объединенных Наций по изменению климата (КС-28) Белый дом обнародовал стратегию «Международные партнерства в новую эпоху освоения термоядерной энергетики» [32], в которой взят курс на расширение деятельности по демонстрации и выводу на рынок термоядерных энергетических установок, что дополнительно подтверждается созданием еще одного партнерства, между США и Японией, о котором было объявлено в апреле 2024 года [33]. ■

Министерство энергетики США представило свою «Стратегию в области термоядерной энергетики — 2024» [34], цели которой заключаются в следующем: i) восполнить научно-технические пробелы на пути к созданию коммерчески значимой пилотной термоядерной установки; ii) подготовить почву для промышленного освоения термоядерной энергетики на устойчивой и справедливой основе; iii) наладить и эффективно использовать внешние партнерские связи. В русле этой стратегии Министерство энергетики США объявило также о возможности для финансирования совместных проектов по линии программы «Инновационный исследовательский механизм содействия развитию термоядерной энергетики» на общую сумму 180 млн долл. США и опубликовало обновленную концепцию программы научных исследований в области термоядерной энергии под названием «Наведение мостов», которая имеет целью активное устранение научно-технических пробелов на пути к созданию коммерчески значимой пилотной термоядерной установки, одновременно содействуя фундаментальным научным исследованиям в области термоядерной энергии и перспективных технологий.

1 Церемония открытия 29-й Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза, Лондон. Слева направо: Э. Боуи, парламентский заместитель министра Соединенного Королевства по ядерной энергии и сетям; Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси; Я. Чепмен, генеральный директор УАЭС.

2 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси на конференции КС-28 в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты, декабрь 2023 года.



Дискуссия МАГАТЭ на тему термоядерной энергетики на КС-28

В 2024 году правительство США значительно увеличило финансирование исследований в области энергии термоядерного синтеза, выделив 790 млн долл. США на деятельность Бюро по научным исследованиям в области термоядерной энергии Министерства энергетики США. Кроме того, из бюджета Национального управления ядерной безопасности было выделено 690 млн долл. США на изыскания в области термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы. Их дополняет программа «Ускоренные научно-технические исследования в области инерционного термоядерного синтеза» с бюджетом 42 млн долл. США, которая направлена на развитие фундаментальной науки и технологий в области энергии инерционного термоядерного синтеза. Общая сумма в размере 1,58 млрд долл. США [35] представляет собой рекордное капиталовложение правительства США в проекты в области термоядерной энергетики и технологий инерциального удержания плазмы. Кроме того, в соответствии с законом 2022 года «О снижении инфляции» правительство предложило расширить налоговые льготы для поддержки более широкого спектра технологий экологически чистой энергетики, включая термоядерную энергетику [36].

На фоне динамично развивающейся ситуации с освоением энергии термоядерного синтеза все более четкие очертания приобретает ПГЧС. Министерство энергетики США объявило о заключении соглашений, на основании которых восьми компаниям будет выделено 46 млн долл. США на финансирование в течение первых 18 месяцев деятельности по разработке проектов и проведению НИОКР, связанных с термоядерными электростанциями, в рамках Поэтапной программы развития термоядерной энергетики. Эти компании были выбраны из числа многих претендентов, представивших предложения с изложением своих планов по выводу на рынок промышленных термоядерных установок. Выплаты поступят только после достижения и подтверждения Министерством энергетики США выхода на заданные рубежи промышленного внедрения. Строя планы на будущее, Министерство энергетики США приступило также к сбору информации о создании предполагаемого государственно-частного консорциума в области термоядерной энергетики [37]. Этот консорциум призван дополнить федеральное финансирование путем объединения взносов штатных и местных органов власти, частных инвестиций и средств из благотворительных источников. ■

По аналогичному пути движется и Япония. В 2023 году страна приняла первую национальную стратегию по освоению энергии термоядерного синтеза [38], в которой делается акцент на создании отечественной термоядерной отрасли с более широким привлечением частного сектора к НИОКР. Эта стратегия предусматривает учреждение Совета Японии по термоядерной энергии для развития смежных отраслей, а также разработки руководящих принципов нормативного регулирования вопросов использования технологий термоядерного синтеза. Кроме того,

была создана специальная рабочая группа по нормативному регулированию термоядерных установок. В 2024 году правительство Японии дало старт новой программе исследований и разработок в области термоядерного синтеза в рамках своей Программы прорывных исследований и разработок [39], что в очередной раз подтверждает его твердый настрой на освоение технологий термоядерного синтеза. Правительство планирует также поставить во главу угла преподавание предметов по тематике термоядерной энергии в образовательных учреждениях, чтобы обеспечить основательную подготовку следующего поколения ученых и инженеров к работе в этой области. Эти усилия дополняет стратегическое партнерство с США, направленное на ускорение развития термоядерной энергетики. ■

Китай быстрыми темпами расширяет свою программу в области термоядерной энергетики, ежегодно наращивая объемы инвестиций [40]. Такой курс подкрепляется созданием под руководством Национальной ядерной корпорации Китая специализированного консорциума по развитию термоядерной энергетики. Он займется изучением высокотемпературных сверхпроводников, проблем хранения больших объемов энергии и наработки трития. В консорциум входят 25 государственных предприятий центрального подчинения и научно-исследовательских институтов, включая некоторые из крупнейших энергетических и сталелитейных компаний страны. Правительство объявило о создании новой национальной компании, которая возьмет на себя руководство развитием отрасли [41]. ■

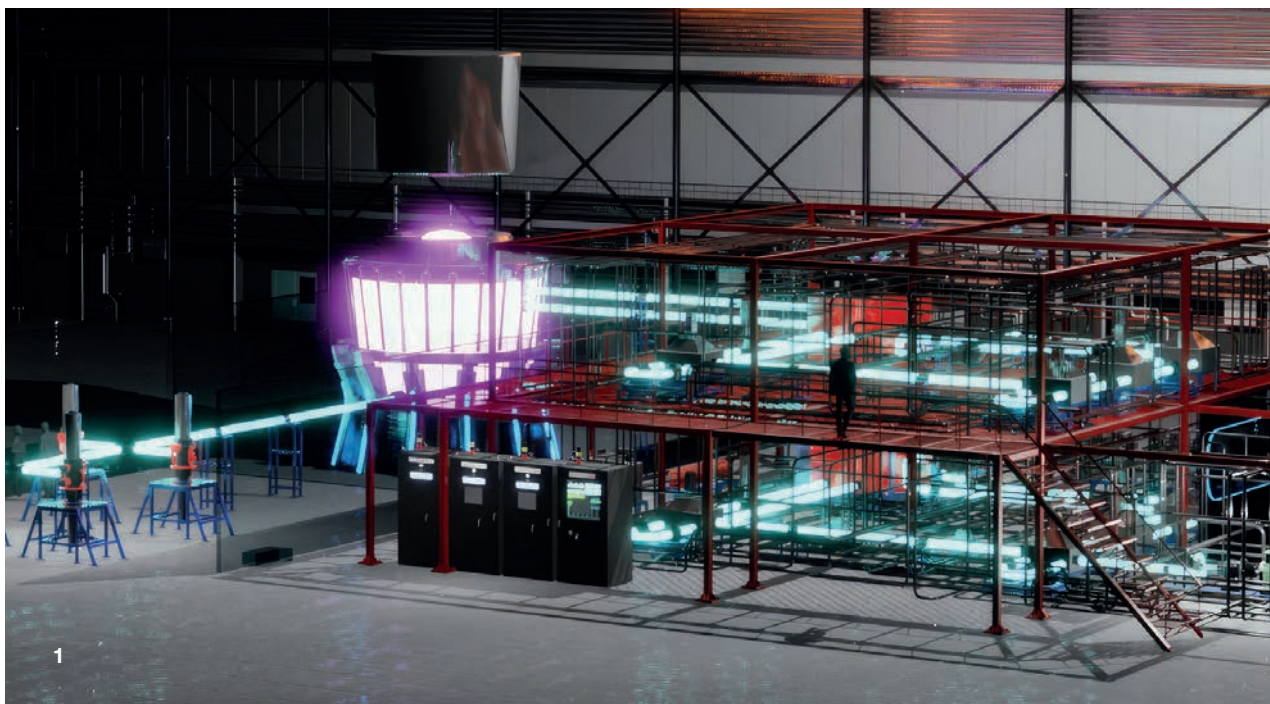
В июле 2024 года правительство Республики Корея объявило о значительных инвестициях в размере 1,2 трлн вон (около 900 млн долл. США) в развитие термоядерной энергетики. Реализация этой инициативы, направленной на развитие технологий термоядерных установок на базе ПГЧС, должна начаться в 2026 году и продолжаться в течение десяти лет. Планом предусмотрено строительство пилотной станции с электрической мощностью 100 МВт в 2030-х годах и начало ее эксплуатации в 2040-х годах. Главная цель заключается в создании промышленной экосистемы термоядерной энергетики с лидирующей ролью частного сектора [42]. ■

Предпринимая шаги для выстраивания всеобъемлющей стратегии ЕС по термоядерной энергетике, Европейская комиссия организовала конференцию «Предварительный план ЕС по освоению энергии термоядерного синтеза» [43]. В ходе этого мероприятия были обозначены несколько первоочередных задач ЕС: необходимость расширения взаимодействия, увеличение объемов финансирования, уточнение регулирующих требований и подготовка квалифицированных кадров.

Федеральное министерство образования и научных исследований Германии — одной из наиболее активных в этой области стран ЕС — объявило, что к 2028 году выделит более 1 млрд евро на



Совещание МАГАТЭ
«Физика плазмы и технологические
аспекты дейтерий-тритиевого
топливного цикла в термоядерной
энергетике»



1 UNITY-1, испытательная и пользовательская установка с нерадиологическим blanketом и тепловым циклом, Киотский исследовательский центр компании «Киото фьюжиниринг», Япония. Первые пуски установки уже проведены, а к полномасштабным циклам испытаний планируется приступить в 2026 году (публикуется с разрешения «Киото фьюжиниринг», Япония).

2 Заместитель министра энергетики США Д.М. Тёрк и министр образования, спорта, науки и технологий Японии М. Морияма объявляют о начале стратегического партнерства в области развития термоядерной энергетики (публикуется с разрешения Министерства энергетики США).



исследования в области термоядерного синтеза в дополнение к 370 млн евро (396 млн долл. США), которые были выделены научно-исследовательским институтам.

Это государственное финансирование дополнительно подкрепляется новой программой финансирования проектов «Термоядерный синтез — 2024» [44]. Эта программа направлена на совершенствование технологий, компонентов и материалов, которые необходимы для термоядерных электростанций, причем разработки будут вестись как в области синтеза с магнитным удержанием плазмы, так и в области лазерного синтеза. Первая фаза программы «Термоядерный синтез — 2024», которая должна завершиться к началу 2030-х годов, имеет целью развитие технологий, а вторая будет посвящена интеграции этих технологий в рабочий проект электростанции. В программе делается упор на совместные прикладные исследования на основе ПГЧС, призванные ускорить перевод термоядерных установок на промышленные рельсы.

В Италии Министерством охраны окружающей среды была создана Национальная платформа устойчивой ядерной энергетики [45], основная задача которой — разработать

руководящие принципы и дорожную карту для отслеживания и координации деятельности в области развития новых ядерных технологий в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Это предполагает изучение потенциала энергии термоядерного синтеза с целью содействовать достижению цели полной декарбонизации к 2050 году. В работе платформы примет участие широкий круг заинтересованных сторон, включая государственные учреждения, частные предприятия, торговые ассоциации, университеты, научно-исследовательские институты и гражданское общество.

Термоядерной энергетике было уделено особое внимание в период председательства Италии в Группе семи, которая призвала к международному взаимодействию с целью ускорить разработку и вывод на рынок термоядерных технологий. Эти усилия свидетельствуют о необходимости разработки продуманных правил безопасности, создания международных цепей поставок и развития кадрового потенциала. Группа семи взяла курс на расширение взаимодействия, стимулирование инвестиций и создание рабочих групп для обмена передовой практикой, в которых будет приветствоваться участие МАГАТЭ и его государств-членов [46]. ■

▲
Саммит Группы семи 2024 года
(публикуется с разрешения
Европейского союза).



▲ **Ассоциация компаний
термоядерной отрасли:
коммерциализация
термоядерной энергетики**

В 2024 году Канада и Соединенное Королевство заключили соглашение [47] о более тесном сотрудничестве в развитии термоядерной энергетики по таким направлениям, как научные исследования, гармонизация режимов регулирования и повышение профессионального уровня рабочей силы. Обе страны будут сотрудничать в деле содействия внедрению термоядерных технологий во всем мире. Хотя Канада не принимала официальную национальную программу в области термоядерной энергетики, в 2024 году Ядерные лаборатории Канады (ЯЛК) опубликовали доклад «Термоядерная энергетика для Канады» [48], который служит предварительной стратегией и дорожной картой в этой области. В докладе содержится призыв к оперативному созданию канадским правительством экосистемы термоядерной энергетики за счет выработки ясной политики и предоставления соответствующих мандатов. Канада должна занять лидирующие позиции в области термоядерных технологий и услуг на международном уровне, при этом ставится цель демонстрации и внедрения термоядерных технологий в 2030–2040-х годах и перевода канадских термоядерных установок на промышленные рельсы к 2050 году. ■

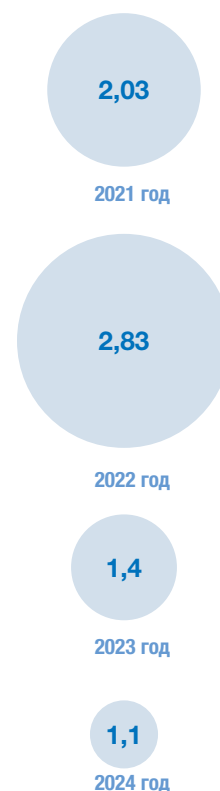
В соответствии с этой концепцией ЯЛК подписали соглашение о сотрудничестве с УАЭСК в разработке технологий переработки трития [49]. Кроме того, ЯЛК заключили соглашения и начали реализацию проектов с компаниями «Стелларекс» [50] и «Дженерал фьюжн» [51], включая создание совместно с «Киото фьюжиниринг» компании «Фьюжн фьюэл сайклс» [52] для строительства и эксплуатации испытательной и пользовательской установки тритиевого топливного цикла UNITY-2. Установка UNITY-2, которая, согласно плану, будет пущена в строй к концу 2025 года и заработает на полную мощность к середине 2026 года, призвана внести вклад в комплексное освоение дейтерий-третиевого топливного цикла — от выгрузки топлива до очистки и поставок, демонстрируя эффективную технологию переработки трития в соответствующих условиях и объемах. ■

Рост частных инвестиций и инвестиций в акционерный капитал

Объем инвестиций в отрасль термоядерной энергетики стабильно растет год от года. Хотя основная часть инвестиций (~70%) традиционно приходится на долю термоядерных компаний США, в 2023 году отмечено заметное увеличение инвестиций в акционерный капитал термоядерных компаний ряда других стран [53]. К таким странам относятся Германия, Израиль, Канада, Китай, Франция, Швеция и Япония, что свидетельствует о глобальном росте интереса к развитию термоядерной энергетики и ее финансированию.

Ежегодный доклад о состоянии термоядерной отрасли «Мировая термоядерная энергетика в 2024 году» [15], который является уже четвертым таким докладом, выпущенным Ассоциацией компаний термоядерной отрасли, показал, что текущие инвестиции в

Объемы финансирования, объявленные Ассоциацией компаний термоядерной отрасли (в млрд долл. США)



термоядерную энергетику составляют в общей сложности 7,3 млрд долл. США (по сравнению с 6,2 млрд долл. США в 2023 году). В доклад были включены результаты опроса 45 частных компаний, занимающихся освоением термоядерной энергии, — от давно существующих на рынке компаний до новичков. Хотя пальму первенства в этой области по-прежнему держат США, где работают 25 компаний по термоядерному синтезу (в том числе многие из крупнейших в мире), отрасль становится все более пестрой в географическом отношении: в 13 странах имеется как минимум по одной компании, занимающейся вопросами термоядерной энергии, причем в Германии, Китае, Соединенном Королевстве и Японии работают по три таких компании. ■

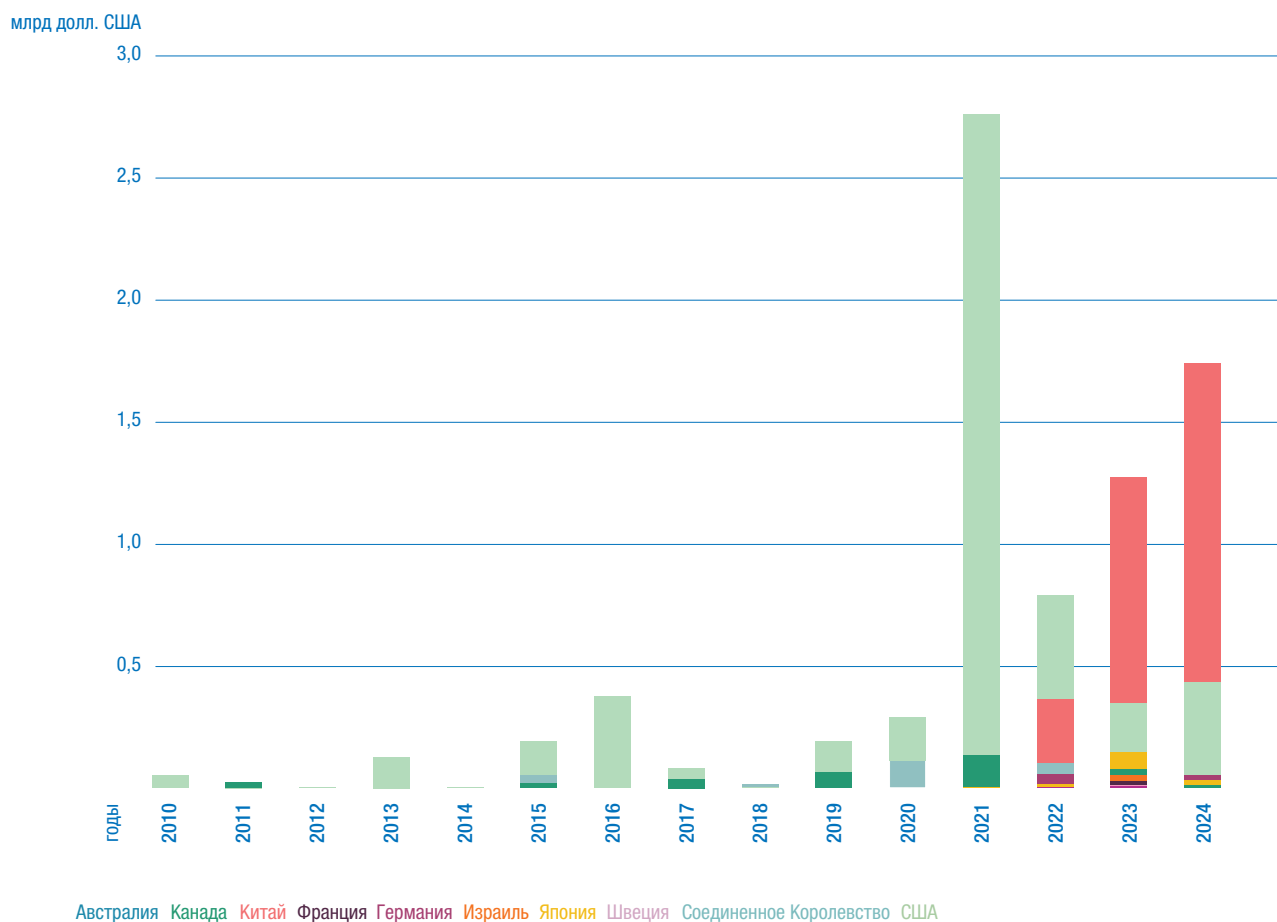


Ассоциация компаний термоядерной отрасли: мировая термоядерная энергетика в 2024 году



Апулийское коммюнике лидеров Группы семи

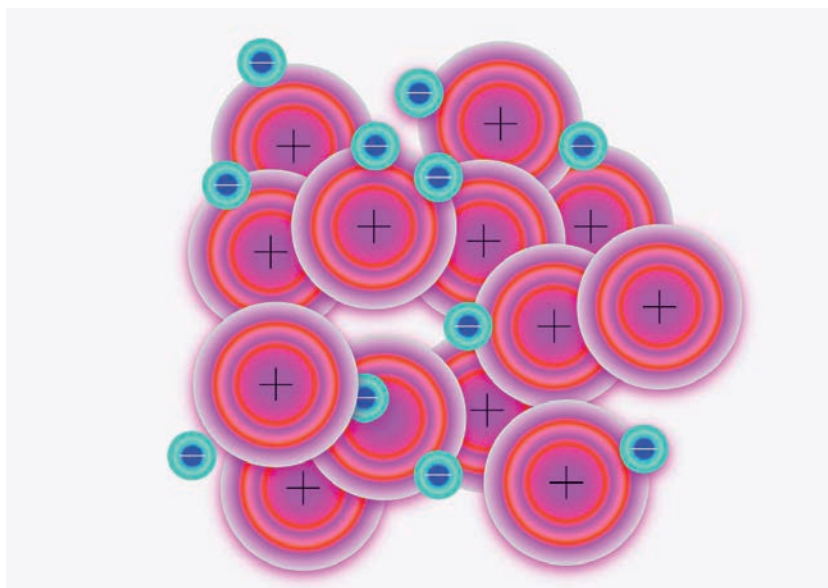
Инвестиции в акционерный капитал компаний по термоядерному синтезу в период с 2010 по 2024 год в разбивке по государствам-членам ^[54]



«Фьюжн
энерджи бейс»

Выработка подходов к нормативному регулированию

На проблемы и возможности использования энергии термоядерного синтеза все чаще обращают внимание регулирующие органы и законодатели. В июле 2024 года президент США Байден подписал закон 2023 года «Об ускорении внедрения универсальных передовых ядерных технологий для перехода к экологически чистой энергетике» (Закон ADVANCE 2023 года) [55], который включает в себя положения поддержанного обеими партиями законопроекта о термоядерной энергетике [56]. Этот закон призван способствовать развитию промышленной термоядерной энергетике путем предоставления четких полномочий регулирующим органам и стимулирования инвестиций. Эти положения подкрепляют ранее принятое решение Комиссии по ядерному регулированию о том, чтобы отделить регулирование термоядерной энергетике от регулирования энергетики, основанной на делении ядра, осуществляя регулирование термоядерных систем, которые появятся в ближайшем будущем, в рамках системы регулирования побочных материалов, то есть так, как в случае с ускорителями частиц. В 2023 году Калифорния стала первым штатом Соединенных Штатов, признавшим энергию термоядерного синтеза как отдельную технологию, отличную от энергии деления ядра. В настоящее время Комиссия по ядерному регулированию разрабатывает руководство по лицензированию термоядерных систем [57].



Правительство Соединенного Королевства подтвердило, что все запланированные прототипы термоядерных энергетических установок в Соединенном Королевстве будут по-прежнему регулироваться Управлением по охране окружающей среды и Исполнительным органом по вопросам здравоохранения и безопасности, в отличие от атомных электростанций, которые регулируются Управлением по ядерному регулированию.

Кроме того, рабочая группа по термоядерной энергии под названием «Динамичные страны», в которую входят Канада, Соединенное Королевство и Япония, а также Бахрейн и Сингапур на правах наблюдателей, подготовила совместные рекомендации [58], в которых признается потенциально важный вклад термоядерной энергии в решение глобальных проблем изменения климата и энергетической безопасности. В этом программном документе также описываются преимущества согласованного подхода к регулированию термоядерной

энергетики, взятого на вооружение рядом стран, и высказываются аргументы в пользу создания ясной нормативной базы регулирования, которая будет применяться к термоядерным энергетическим установкам независимо от технологии термоядерного синтеза и обеспечивать надлежащую защиту населения и окружающей среды, соразмерную опасностям термоядерной энергии, оставаясь при этом прозрачной и ориентированной на инновации.

Аналогичным путем идет и Германия. В ходе состоявшихся в 2024 году публичных слушаний в Комитете по образованию, научным исследованиям и оценке технологий была подчеркнута необходимость создания практической, благоприятствующей инновациям и независимой правовой базы термоядерной энергетике [59]. Такая база призвана привлечь частные инвестиции и содействовать развитию рынков термоядерных технологий. ■



Обзоры

Анализ тенденций
в отдельных отраслях
и распределение
объектов термоядерной
энергетики по разным
регионам мира

Обзоры по отраслям

Краткий обзор основных примеров взаимодействия разработчиков термоядерных технологий и конечных пользователей с целью ускорить промышленное освоение термоядерной энергии

Нефтяная и газовая промышленность

Значительные инвестиции в компании, занимающиеся термоядерной энергетикой, делаются нефтяными и газовыми компаниями, которые объясняют это необходимостью диверсифицировать свои портфели на фоне общемировой тенденции к постепенному отказу от неограниченного использования органического топлива с целью достичь углеродной нейтральности к 2050 году. Наряду с «Шеврон» и «Шелл», к числу крупнейших производителей органического топлива, инвестирующих в термоядерную энергетику, относятся также «Оксидентал», «Эни» и норвежская нефтеперерабатывающая компания «Эквинор» [60].

Калифорнийский стартап «ТАЕ технолоджиз» изучает возможности использования своей технологии термоядерного синтеза для питания установок прямого улавливания углерода из воздуха, разработку которых ведет дочернее предприятие нефтяной компании «Оксидентал» — «Окси лоу карбон венчурз». В июне 2024 года компании подписали меморандум о взаимопонимании для поиска возможностей коммерциализации термоядерной технологии «ТАЕ технолоджиз» с целью снабжения устройств прямого улавливания электроэнергией и теплом с нулевым уровнем выбросов. Основанная в 1998 году «ТАЕ технолоджиз» смогла привлечь 1,2 млрд долл. США инвестиций от таких компаний, как технологический гигант «Гугл», инвестиционный банк «Голдман Сакс» и нефтяные компании «Шелл» и «Шеврон» [61]. Компания намерена подключить термоядерную установку к электросети к началу 2030-х годов.

Хотя эффективность технологии прямого улавливания еще не доказана, некоторые эксперты полагают, что она, вероятно, будет иметь важнейшее значение для достижения углеродной нейтральности за счет удаления CO₂ из воздуха и ликвидации ущерба, который десятилетиями наносился атмосфере. Однако для того чтобы технология прямого улавливания была технически и экономически обоснованной, необходимо наличие постоянного и недорогого источника энергии с нулевым уровнем

выбросов, который может быть обеспечен как раз за счет термоядерного синтеза.

Помимо инвестиций в «ТАЕ технолоджиз», компании «Шелл», «Шеврон» и «Эквинор» вложили средства в «Зэп энэрджи». Компания «Зэп энэрджи» из Сигтла, США, намерена в десятилетний срок подключить к сети свою первую термоядерную электростанцию.

«Эни», «Эквинор» и «Шелл» внесли инвестиции в КФС. В 2023 году «Эни» и КФС подписали соглашение о сотрудничестве для содействия промышленному освоению технологии КФС. Предполагается, что термоядерная установка КФС будет введена в эксплуатацию в начале 2030-х годов [56]. На сегодняшний день КФС привлекла в виде инвестиций 2 млрд долл. США. «Эни» владеет также 25% акций строящейся недалеко от Рима итальянской установки ДТТ, которая предназначена для проведения научных исследований, в том числе технологий извлечения тепла, которое генерируется в процессе термоядерного синтеза [62]. ■

Высокотехнологичный сектор

Мировые высокотехнологичные компании прямо заявляют о намерении использовать энергию термоядерного синтеза для удовлетворения стремительно растущих энергетических потребностей своих центров обработки данных, которые обеспечивают работу быстро развивающихся систем ИИ. Как сообщается, в январе 2024 года генеральный директор OpenAI Сэм Альтман заявил, что для будущего развития ИИ потребуется не что иное как крупный «прорыв», который может быть обеспечен за счет энергии термоядерного синтеза [63].

По имеющимся данным, Альтман лично вложил до 375 млн долл. США в американскую компанию — разработчика термоядерных технологий «Хелион энэрджи», к числу инвесторов которой относятся также соучредитель LinkedIn Рид Хоффман, основатель eBay Питер Тиль и соучредитель «Фейсбук» Дастин Московиц. Один из инвесторов OpenAI компания «Майкрософт» рассматривает возможность использования термоядерного синтеза наряду с другими



экологически чистыми источниками энергии, поскольку стремится к 2030 году выйти на нулевой уровень выбросов CO₂.

В марте 2023 года «Майкрософт» подписала соглашение о покупке электроэнергии у первой термоядерной электростанции «Хелион энержи», которая, согласно плану, будет пущена в строй в 2028 году и будет вырабатывать 50 МВт (эл.). «Хелион энержи» смогла привлечь инвестиции в объеме 0,6 млрд долл. США и в настоящее время, как сообщается, работает над седьмым прототипом устройства, которое, по утверждению компании, продемонстрирует способность вырабатывать электричество [64].

Соучредитель «Майкрософт» Билл Гейтс и основатель интернет-магазина Amazon Джефф Безос являются крупнейшими инвесторами стартапов в области энергии термоядерного синтеза, в том числе через фонд Гейтса «Брейктру энержи венчурз», взносы в который делают также британский бизнесмен Ричард

Брэнсон, медиа-магнат Майкл Блумберг и соучредитель китайского интернет-магазина Alibaba Джек Ма. В 2019 году фонд вместе с другими инвесторами сделал первоначальную инвестицию в КФС на сумму 115 млн долл. США [65]. Коммерческий интерес у Безоса к термоядерному синтезу возник как минимум в 2011 году, когда он присоединился к группе инвесторов, вложивших около 20 млн долл. США в канадский термоядерный стартап «Дженерал фьюжн»; сегодня эта компания располагает инвестициями в объеме 0,3 млрд долл. США и занимается разработкой технологий термоядерного синтеза с намагниченной мишенью. ■

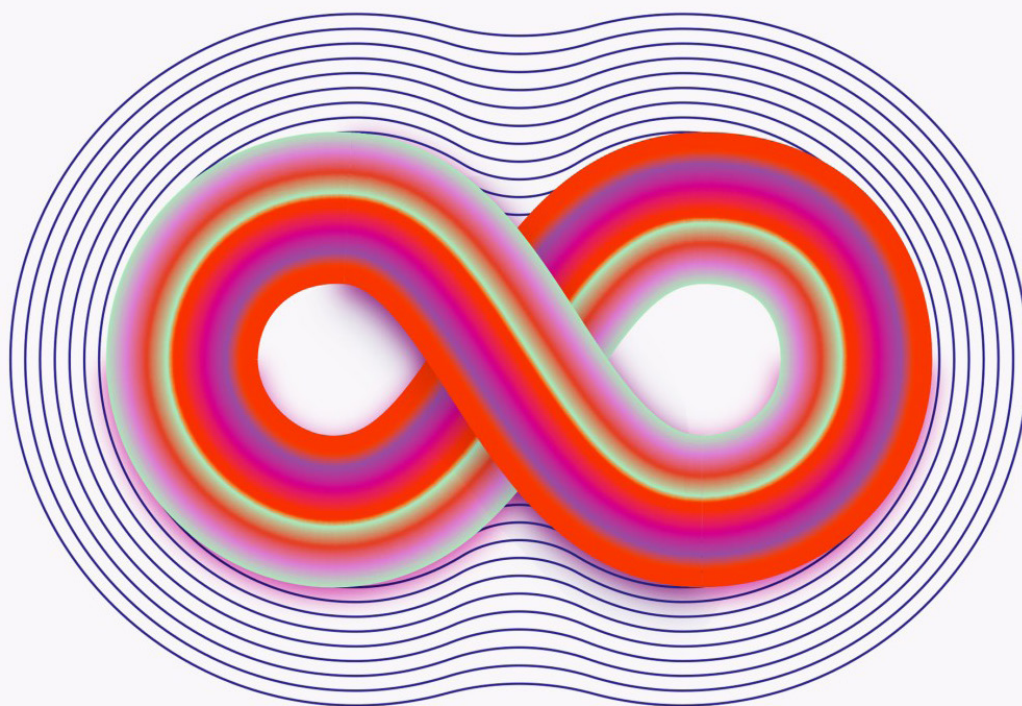
Электромобилестроение

В январе 2024 года израильский термоядерный стартап nT-Taо, пользующийся поддержкой японской компании «Хонда мотор», заявил, что планирует разрабатывать миниатюрные термоядерные установки для

использования в качестве зарядных станций электромобилей, рассчитывая вывести эту технологию на рынок в 2030-х годах.

По данным компании, мощность каждой такой зарядной станции составит от 10 000 до 20 000 кВт, а малый размер позволит разместить ее в грузовом контейнере; на данный момент nT-Taо привлекла 28 млн долл. США в виде инвестиций, в том числе от японской страховой компании «Мицуи сумитомо» и «Хонда мотор» [66]. По мнению «Хонда мотор», освоение энергии термоядерного синтеза может совершить переворот в электромобилестроении [67].

В Китае производитель электромобилей «Ню» приобрел 20% акций стартапа в области термоядерных технологий «Нео фьюжн», который, в свою очередь, на 50% контролируется государственными компаниями и инвестиционными органами провинции Аньхой. Этот стартап, уставной капитал которого эквивалентен более чем 700 млн долл. США, будет проводить



НИОКР с таким расчетом, чтобы в течение ближайших двух десятилетий вывести технологию термоядерного синтеза на мировой рынок [68]. ■

Цепи поставок

Проект ИТЭР заложил прочный фундамент для создания глобальной цепи поставок для нужд термоядерной энергетики. У соответствующих агентств каждого члена ИТЭР есть собственные контракты с компаниями и научно-исследовательскими организациями, которые вносят вклад в натуральной форме через самые различные механизмы закупок. Эти агентства поставляют все необходимое — от секторов вакуумного сосуда до гиротронов и высоковольтных источников питания, формируя цепь поставок, которая теперь доступна и для зарождающегося частного сектора термоядерной энергетики.

По данным Ассоциации компаний термоядерной отрасли [69], в 2023 году расходы на цепи поставок со стороны компаний, занимающихся термоядерной энергетикой, увеличились до более чем 612 млн долл. США, тогда как в 2022 году они составляли около 489 млн долл. США.

Эти оценки основаны на опросе компаний и, по всей вероятности, являются заниженными, поскольку не все компании представили ответы. Наибольшие расходы были связаны со специальными товарами, не относящимися напрямую к термоядерному синтезу, такими как вакуумные насосы, а также с сырьем, контрактами на инженерные работы и топливом. В 2024 году компании планируют израсходовать на цепь поставок на 24% больше, чем в 2023 году,

при этом 77% компаний вкладывают средства в расширение мощностей для обеспечения работы термоядерной отрасли.

О растущей активности в области цепи поставок свидетельствует, в частности, тот факт, что в июле 2023 года британская компания по термоядерному синтезу «Токамак энерджи» и японская корпорация «Сумитомо» заключили соглашение о сотрудничестве в интересах перевода термоядерной энергетики на промышленные рельсы в Японии и во всем мире. В рамках этого соглашения «Сумитомо» предоставит экспертные ресурсы и инвестиции для реализации совместных проектов с «Токамак энерджи», которые направлены на укрепление глобальной цепи поставок термоядерного оборудования. В то время как корпорация «Сумитомо» намерена стать мировым лидером в финансировании, сооружении и эксплуатации термоядерных

электростанций, «Токамак энерджи» стремится ускорить вывод на рынок и промышленное освоение своих сферических токамаков в конце 2030-х годов [70]. На сегодняшний день «Токамак энерджи» привлекла 0,3 млрд долл. США в виде инвестиций.

В январе 2023 года эта компания из Соединенного Королевства (разрабатывающая также технологию ВТСП-магнитов для нужд, не связанных с термоядерной энергетикой) сообщила, что заключила соглашение с японской компанией «Фурукава электрик» на поставку сотен километров ВТСП-ленты для прототипа своего термоядерного устройства. ВТСП-лента была разработана и поставлена компанией «Фурукава электрик», а в настоящее время ее производство освоено на предприятии в штате Нью-Йорк, США [71].

В 2023 году «Ньюкор корпорейшн», крупнейшая в Северной Америке компания по производству и переработке стали, подписала соглашение с компанией «Хелион энерджи» о строительстве термоядерной электростанции мощностью 500 МВт (эл.) на сталелитейном заводе «Ньюкор» в США. По данным компании, это первое соглашение в области термоядерной энергетики подобного масштаба, и предполагается, что оно подготовит почву для глобальной декарбонизации промышленного производства [72].

Компания «Лонгвью фьюжн энерджи системз» стремится масштабировать технологию лазерного термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы для использования в промышленной энергетике. В апреле 2024 года компания заключила контракт с «Флуор корпорейшн» на проектирование и сооружение модульной электростанции с использованием эффективных усовершенствованных лазеров и технологий ИИ-оптимизации. Согласно первоначальному проекту, мощность станции будет составлять 1–1,6 ГВт, при этом первую станцию мощностью 440 МВт (эл.) планируется спроектировать к 2027 году и ввести в строй к 2032 году. К числу ключевых проблем относится обращение с радиоактивным тритием и преобразование полученного в результате термоядерного синтеза пара для подачи в сеть. Компания «Лонгвью фьюжн энерджи системз» рассматривает различные варианты размещения установок, включая

перепрофилирование угольных заводов с целью сохранить рабочие места и инфраструктуру.

В то же время в мае 2024 года УАЭСК и чешская научно-исследовательская организация «Исследовательский центр Ржеж» подписали многолетнее соглашение на проведение испытаний ВТСП-лент для прототипа термоядерной установки STEP в Соединенном Королевстве. Они разработают единственный в своем роде испытательный стенд для изучения воздействия нейтронных спектров, актуальных для термоядерного синтеза, на ВТСП-ленты, которые будут удерживать плазму при температурах до 150 млн градусов по Цельсию. Испытания на этом стенде, который предполагается ввести в строй в 2026 году, дадут информацию о прочности ВТСП-ленты, что поможет при проектировании и продлении срока службы ВТСП-магнитов STEP. ■

Электроэнергетические компании

Американская электроэнергетическая компания «Констеллэйшн энерджи», которая уже эксплуатирует 21 ядерный реактор по всей стране и стремится достичь углеродной нейтральности к 2030 году, будет заниматься выводом на рынок и передачей электроэнергии, выработанной первой термоядерной электростанцией «Хелион энерджи» [73], которая, согласно плану, будет введена в строй в 2028 году и будет обеспечивать электроэнергией компанию «Майкрософт».

Одна из крупнейших электроэнергетических компаний Канады «Онтарио пауэр дженерэйшн» также намерена внести свой вклад в создание термоядерной установки. В июне 2024 года компания объявила о подписании меморандума о взаимопонимании с американской компанией по термоядерному синтезу «Стелларекс» [74] в целях изучения возможностей создания и внедрения объектов термоядерной энергетики в провинции Онтарио. «Онтарио пауэр дженерэйшн» и «Стелларекс» заявили, что они изучат возможности создания центра передового опыта в области

термоядерной энергии и определят потенциальную площадку в Онтарио, где в будущем может быть размещена стеллараторная термоядерная установка.

В 2022 году другая канадская электроэнергетическая компания, «Брюс пауэр», объявила о подписании соглашения с «Дженерал фьюжн» и Канадским институтом ядерных инноваций о сотрудничестве в деле создания объектов термоядерной энергетики в Онтарио. Поскольку почти две трети электроэнергии в провинции уже вырабатывается за счет ядерной энергии, три организации заявили о своем намерении использовать существующие в регионе технологии, навыки и экспертные знания в области экологически чистой энергетики. Делая акцент на взаимодействии с заинтересованными сторонами, они заявили о стремлении повышать информированность населения, компаний и предприятий о том, как термоядерный синтез может радикально изменить производство экологически чистой энергии в Онтарио [75].

Одна из крупнейших электроэнергетических компаний Китая «Аньхой провинс энерджи груп компани лимитед», по сообщениям, инвестировала средства в компанию по термоядерному синтезу «Нео фьюжн» [76]. ■



Ассоциация компаний
термоядерной отрасли:
«Цепи поставок в
термоядерной отрасли — 2024»

Обзоры по регионам

Африка

Алжир, Египет, Ливия, Марокко и Тунис

В Африке НИОКР, посвященные непосредственно термоядерной энергии, в настоящее время ведутся в ограниченном объеме. Вместе с тем в регионе имеются экспертные знания и квалифицированные специалисты в различных областях, связанных с термоядерным синтезом. Научными исследованиями плазмы, связанными с термоядерным синтезом, занимаются отдельные ученые и исследовательские группы в разных странах. Например, в Алжире, Египте, Ливии, Марокко и Тунисе принимаются меры по организации образовательной работы в области физики плазмы. Университеты этих стран активно ведут исследования, уделяя особое внимание, в частности, таким областям, как радиочастотная плазма и ее применение, материаловедение, плазмохимия, теория и моделирование плазмы. Кроме того, в Египте и Ливии имеются два токамака, что еще больше повышает роль этих стран в мировом научном сообществе. Эти инициативы свидетельствуют о том, что Африка все активнее занимается образованием и научными исследованиями в области физики плазмы и термоядерного синтеза. ■

Азия и Тихий океан

Австралия и Новая Зеландия

В Австралии исследования в области термоядерного синтеза координирует Австралийский форум ИТЭР — сеть ученых и инженеров, представляющих различные дисциплины. Исследования ведутся в первую очередь в области диагностики плазмы, теории и моделирования плазмы, а также изучения материалов для применений в термоядерном синтезе. В Австралии также работает HB11 Energy — частная компания, занимающаяся лазерным термоядерным синтезом.

В Новой Зеландии частная компания «Опенстар технолоджиз» привлекла 12 млн долл. США для разработки технологий термоядерного синтеза с применением левитирующего диполя. ■

Китай

В Китае находится более десяти термоядерных экспериментальных устройств, которые уже работают, сооружаются или проектируются. Эта деятельность ведется при поддержке государственных промышленных компаний, университетов и научно-исследовательских институтов. На

главных термоядерных установках, таких как EAST и HL-3, были получены превосходные экспериментальные результаты, и Китай развивает эти успехи, инвестируя в последующие проекты в области термоядерного синтеза, включая BEST и CFETR, что открывает путь к созданию термоядерных электростанций. Кроме того, страна придает большое значение подготовке специалистов в области термоядерного синтеза, рассчитывая подготовить 1000 новых физиков плазмы. Китай строит также исследовательский объект под названием «Центр комплексных исследований технологии термоядерного синтеза» (CRAFT), который станет площадкой для разработки и испытания компонентов термоядерных электростанций. Завершение работ намечено на 2025 год [77].

Несколько компаний вкладывают также значительные средства в исследования термоядерного синтеза в рамках целого ряда запланированных проектов [78]. В 2024 году правительство объявило о создании новой национальной компании [79] с масштабными планами строительства пилотной установки для технических исследований, которая в настоящее время находится на этапе концептуального проектирования. На ней планируется достичь уровня мощности термоядерной энергии в 300 МВт в стационарном режиме эксплуатации и 600 МВт в импульсном режиме, с возможностью корректировки на этапе проектирования. Строительство планируется начать к 2030 году, а все оборудование, как ожидается, будет поставлено к 2035 году. Для нужд этой деятельности ведется модернизация токамака HL-3, чтобы создать условия для проведения экспериментов с дейтерий-тритиевой плазмой. Модернизацию для работы с дейтерий-тритиевой плазмой планируется завершить к 2027 году, но начало соответствующих операций будет зависеть от сроков лицензирования устройства и его ввода в эксплуатацию. ■

Индия

Научные исследования, разработки, финансовое и иное участие Индии в работе по термоядерному синтезу и плазме связаны в основном с проектом ИТЭР. В стране эксплуатируются несколько экспериментальных исследовательских установок и разрабатывается дорожная карта по освоению энергии термоядерного синтеза на ближайшие 25 лет, включающая планы создания двух новых устройств в преддверии пуска в строй индийской установки DEMO в конце 2040-х годов. Первое устройство будет представлять собой термоядерный источник нейтронов на основе сферического токамака, второе — стандартный токамак, рассчитанный на работу в стационарном режиме, с габаритами примерно на одну треть меньше ИТЭР. ■

Исламская Республика Иран

В настоящее время в Исламской Республике Иран эксплуатируются три токамака: Alvand, Damavand и IR-T15, предназначенные для изучения плазмы в различных экспериментальных условиях. ■



Израиль

С 2019 года в Израиле работает частная компания nT-Taо, которая занимается термоядерным синтезом. Она сообщила о привлечении финансовых средств в объеме 32 млн долл. США и активно занимается разработкой стеллараторной технологии для производства энергии. ■

Япония

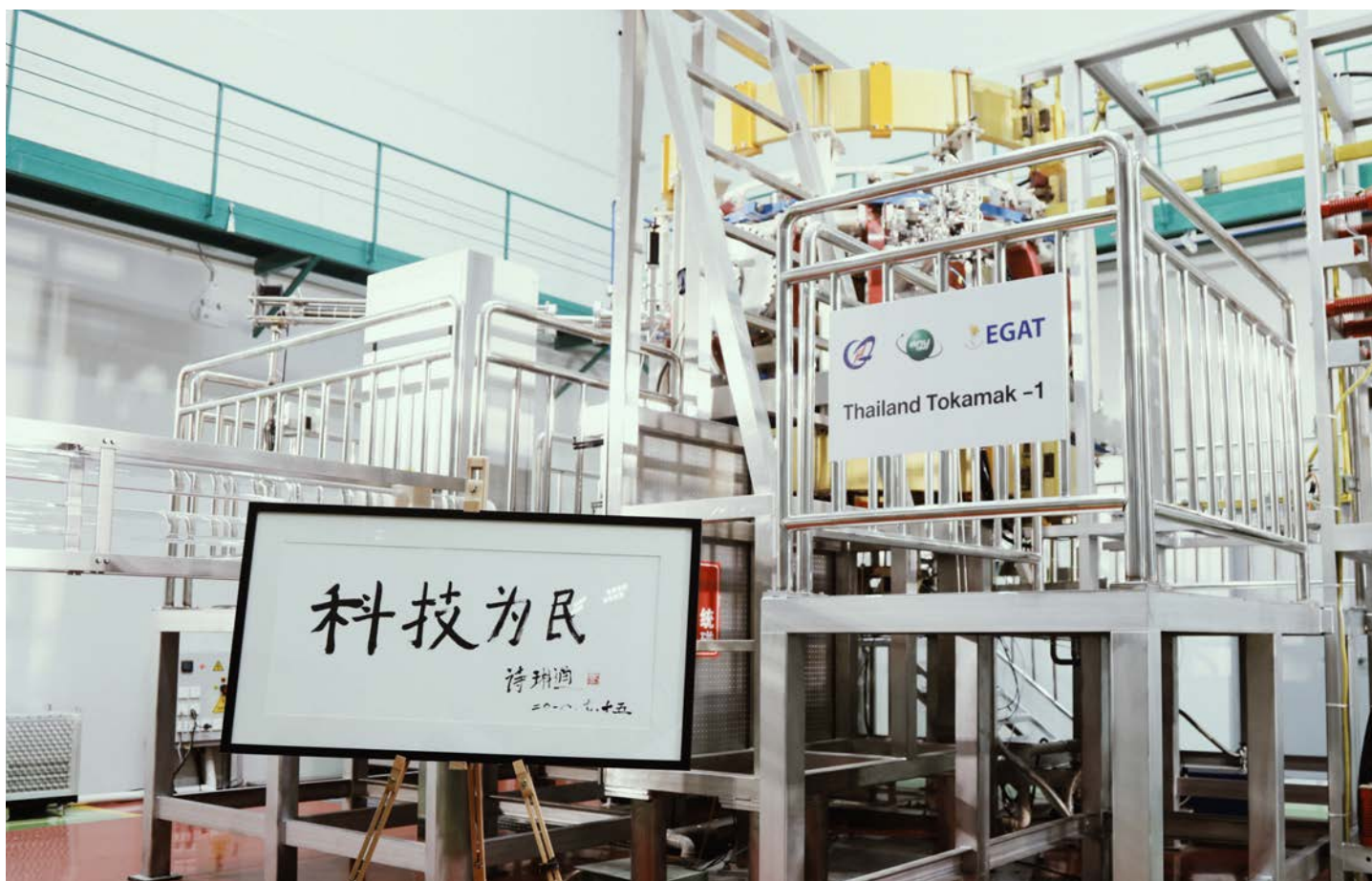
Япония, в которой эксплуатируется более 20 экспериментальных термоядерных устройств, находится на передовом рубеже исследований и разработок в области термоядерного синтеза. Японская стратегия в области термоядерного синтеза предусматривает поэтапный подход к практическому внедрению термоядерной энергии. Эти этапы включают концептуальное проектирование JA-DEMO и начальную разработку технологий в период до 2025 года, инженерное проектирование и полномасштабную разработку технологий в 2025–2035 годах и принятие решения о начале строительства JA-DEMO после 2035 года с учетом хода работ по линии проекта ИТЭР.

Кроме того, в рамках соглашения о «расширенном подходе» между Японией и ЕС ведется двустороннее сотрудничество по следующим направлениям: i) проектирование установок и НИОКР, ii) проект² по апробации технических решений и проектированию установок по облучению материалов для термоядерного синтеза, iii) эксплуатация установки JT-60SA, которая была пущена в строй в конце 2023 года. В университетах и специализированных институтах ведутся также различные фундаментальные исследования с использованием исследовательских устройств и высокоэнергетических лазерных установок. ■



Так может выглядеть с воздуха Центр комплексных исследований технологий термоядерного синтеза в Хэфэе, провинция Аньхой, Китай (публикуется с разрешения Хэфэйского института физических наук Китайской академии наук, Китай).

² Цель этого проекта, который называется также «Апробация технических решений и техническое проектирование для ИФМИФ (ИФМИФ/ЕВЕДА)», — подтвердить обоснованность концепции строящейся в Испании установки ИФМИФ — Источника нейтронов для исследований в рамках проекта DEMO (ИФМИФ-DONES). В рамках деятельности ИФМИФ/ЕВЕДА были построены три прототипа установки для проверки каждого из трех ключевых компонентов ИФМИФ-DONES. На испытательной установке в Карлсруэ, Германия, отрабатываются концепции испытательного модуля ИФМИФ-DONES с высокой плотностью нейтронного потока. На установке для работы с литиевыми мишенями в Оарай, Япония, отрабатываются концепции отражателя из жидкого лития для ИФМИФ-DONES. Наконец, на ускорителе в Роккасэ, Япония, отрабатываются концепции ускорителя частиц для создания пучка дейтронов на ИФМИФ-DONES.



Ливан

Фундаментальные исследования, ведущиеся в Ливане, посвящены развитию важнейших аспектов науки о термоядерном синтезе, включая турбулентность плазмы, удержание, разработку систем диагностики и концепций диверторов. ■

Пакистан

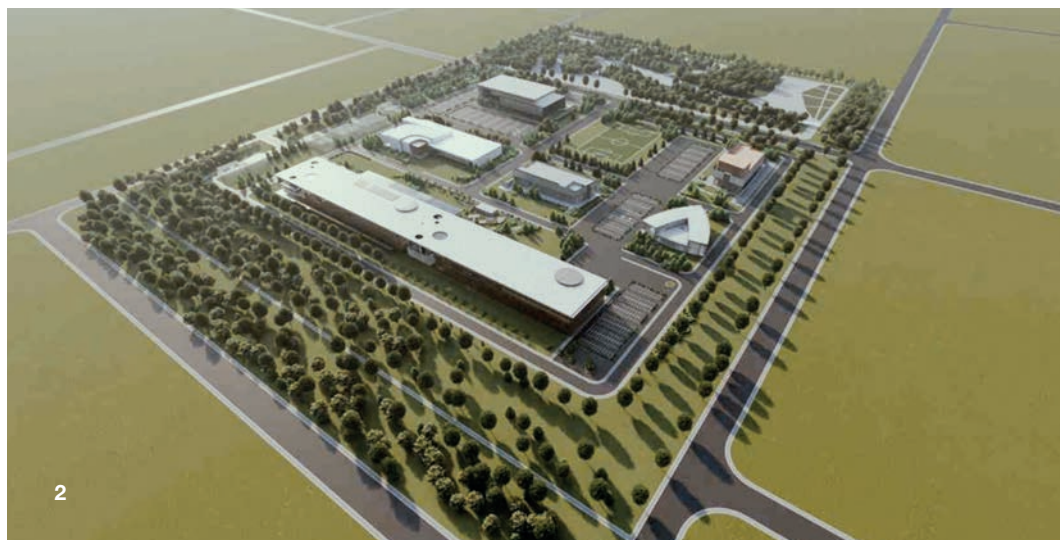
В настоящее время в Пакистане эксплуатируются два токамака (GLAST-III и MT-I), третий (MT-2) находится в стадии строительства, а четвертый (PST) — в стадии планирования [80]. Эти последовательные усилия направлены на расширение возможностей Пакистана для освоения термоядерной энергии. ■

Республика Корея

Республика Корея продвигается вперед в реализации дорожной карты в области термоядерного синтеза, рассчитывая построить демонстрационную термоядерную установку к 2050 году. Корейская дорожная карта для K-DEMO включает этап концептуального проектирования до 2030 года, а затем этап технического проектирования в 2031–2035 годах. Эти усилия подкрепляются проведением передовых НПОКР на токамаках KSTAR и VEST, закладывающих важнейшую научно-техническую базу, которая потребуется к 2035 году. Кроме того,

в Республике Корея рассматривается возможность сооружения нового объекта — так называемого корейского перспективного комплекса для испытаний термоядерной техники. Он спроектирован таким образом, чтобы удовлетворять требования, предъявляемые к оценке эффективности работы бланкет-размножителей термоядерных установок, в том числе в части непрерывной долгосрочной эксплуатации, высокой плотности потока термоядерных нейтронов и большого размера мишени для облучения зоны воспроизводства трития [81]. Этот комплекс будет включать:

- интегрированную установку для испытаний зоны воспроизводства с использованием системы на базе ускорителя дейтронов с энергией 40 МэВ и максимальным током 10 мА для генерации нейтронов в источнике, подобном термоядерному, что имеет решающее значение для испытания компонентов blankets;
- установку для испытаний системы blankets, предназначенную для демонстрации надежности и безопасности blankets и его вспомогательных систем;
- пилотную установку топливного цикла, предназначенную для проверки непрерывной работы топливного цикла с использованием H_2/D_2 в лабораторном масштабе 1:10. ■



Саудовская Аравия

Саудовская Аравия инвестирует средства в НИОКР в области передовых энергетических технологий, включая термоядерный синтез. В рамках этой стратегии технологический фонд ДЖИМКО инвестировал средства в компании «Дженерал фьюжн» и КФС. ■

Сингапур

По сообщениям, «Темасек холдингз лимитед», сингапурская инвестиционная компания, принадлежащая правительству Сингапура, внесла инвестиции в КФС [82]. ■

Таиланд

В 2023 году Таиланд в сотрудничестве с Китаем запустил свой первый токамак — ТТ-1 [83]. Поскольку ТТ-1 является первым токамаком в Юго-Восточной Азии, на его базе будут вестись дальнейшие исследования в области термоядерного синтеза в Таиланде и соседних странах. Он обещает стать ценным средством для изучения плазмы термоядерного синтеза и технических разработок [84]. ■

Несколько стран выступили с инициативой по созданию Арабского агентства по термоядерной энергии, которое будет служить центром для координации исследований в сфере термоядерного синтеза и соответствующего сотрудничества в регионе, мобилизации финансовых средств на будущие проекты в области термоядерной энергетики и активного вовлечения этих стран в общемировую деятельность в этой области.

1 ТТ-1, официально пущенный в строй в Таиланде (публикуется с разрешения Хэфэйского института физических наук Китайской академии наук, Китай).

2 Компьютерное изображение предполагаемого корейского перспективного комплекса для испытаний термоядерной техники (публикуется с разрешения Корейского института термоядерной энергии, Республика Корея).



Внутренний вид плазменной камеры W7-X
(публикуется с разрешения Института физики
плазмы им. Макса Планка, Германия).



Европа

EUROfusion, FuseNet, «Fusion for Energy» и ИФМИФ-DONES

EUROfusion — это европейский научно-исследовательский консорциум³, созданный для координации и финансирования НИОКР в области термоядерного синтеза по всей Европе. В основе дорожной карты EUROfusion лежит веховый подход, и в ней определены цели на кратко-, средне- и долгосрочную перспективу [85]. На начальном этапе главной задачей дорожной карты является содействие осуществлению проекта ИТЭР. Затем в центре внимания оказывается установка EU-DEMO, которая, как ожидается, начнет работать к 2050 году.

Краткосрочные цели связаны с исследованиями, разработкой и строительством ИТЭР и установок для испытания материалов, таких как ИФМИФ-DONES, а также продолжением концептуального проектирования EU-DEMO. В среднесрочной перспективе акцент будет смещен на использование ИТЭР и ИФМИФ-DONES в научно-технических целях и начало этапа технического проектирования EU-DEMO с привлечением промышленного сектора. В долгосрочной перспективе предполагается проектирование, строительство и эксплуатация EU-DEMO, а также активизация взаимодействия с промышленным сектором. ■

FuseNet — это европейская образовательная сеть в области термоядерного синтеза, играющая центральную роль в этой области благодаря программам развития образования и студенческих обменов. Как организации, аффилированной с EUROfusion, FuseNet поручено проводить и координировать образовательные мероприятия для реализации дорожной карты EUROfusion. В рамках FuseNet осуществляются инициативы по финансированию обучения в магистратуре, мероприятия по налаживанию деловых контактов для докторантов, разработка учебных материалов и организация мероприятий для студентов начальных уровней. Кроме того, FuseNet работает над укреплением связей с отраслью, обеспечивая, чтобы в образовательной работе учитывались потребности и инновации в секторе термоядерного синтеза. ■

«Fusion for Energy» — это организация Европейского союза, которая управляет деятельностью стран Европы по линии ИТЭР. Европа отвечает почти за половину этого проекта, а остальные шесть членов (Индия, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония) в равных долях вносят вклад в оставшуюся часть. «Fusion for Energy» сотрудничает с европейскими промышленными и исследовательскими организациями в разработке и производстве высокотехнологичных компонентов, которые Европа будет поставлять для проекта ИТЭР. ■

В последние годы несколько частных компаний Германии, Италии, Франции и Швеции, среди прочих, принимали активное участие в разработке технологий термоядерного синтеза. Чтобы обеспечить энергоснабжение Европы в долгосрочной перспективе, десять европейских компаний договорились в июне 2024 года о создании Европейской ассоциации термоядерного синтеза [86]. Этот единый орган объединит различных участников термоядерной отрасли и национальные правительства, ускорив темпы перевода термоядерной энергии на промышленные рельсы. ■

³ Странами — участниками EUROfusion являются Австрия, Бельгия, Болгария, Венгрия, Германия, Греция, Дания, Ирландия, Испания, Италия, Латвия, Литва, Мальта, Нидерланды, Норвегия, Польша, Португалия, Румыния, Словакия, Словения, Соединенное Королевство, Украина, Финляндия, Франция, Хорватия, Чешская Республика, Швейцария, Швеция и Эстония.



Германия

Германия является лидером на нескольких направлениях освоения термоядерной энергии, в том числе в изучении стеллараторных технологий, физики токамаков, технологий и материалов термоядерного синтеза, а также взаимодействий плазмы со стенкой. Расположенная в Германии установка W7-X является крупнейшим в мире стелларатором. Она оснащена модульными сверхпроводящими катушками, позволяющими работать с плазмой в стационарном режиме, исследуя режимы, подходящие для электростанций.

Правительство Германии ускоряет работу в целях промышленного внедрения термоядерного синтеза, осознавая рост числа частных компаний в стране и рассчитывая на их вклад и участие. Немецкие компании, работающие в сфере термоядерной энергии, образовали промышленную ассоциацию «Про-фьюжн» [87]. Она положит начало созданию экономической экосистемы термоядерного синтеза, а в долгосрочной перспективе будет задавать тон общественному мнению о термоядерной энергии. ■

Италия

В Италии программа в сфере термоядерного синтеза развивается бурными темпами. Новый итальянский проект в этой области предполагает строительство установки DTT с ожидаемым пуском в строй после 2025 года. В консорциум DTT входит множество итальянских научно-исследовательских институтов,

государственных и региональных партнеров, международных заинтересованных сторон и частных фирм, предоставивших на строительство этой установки почти 500 млн евро. Кроме того, в Италии действуют несколько экспериментальных установок для исследования термоядерного синтеза, и страна активно участвует в подготовке к эксплуатации ИТЭР и проектировании EU-DEMO. Итальянские предприятия получили более 1,8 млрд евро по контрактам на разработку технологий термоядерного синтеза. ■

Франция

Во Франции располагается ИТЭР и ряд других установок для исследования термоядерного синтеза, включая токамак WEST и различные лазерные установки. Кроме того, во Франции базируется стартап «Ренессанс фьюжн», разрабатывающий концептуальный проект стелларатора с ВТСП-магнитами и стенками из жидкого металла. В целях содействия НИОКР в этой области французское правительство изучает возможности стимулирования ПГЧС. ■

Казахстан

Исследовательская деятельность в области термоядерного синтеза в Казахстане ведется в рамках целого ряда инициатив, от небольших испытательных стендов для изучения низкотемпературной плазмы до полномасштабных термоядерных экспериментов, таких как токамак КТМ, а также применения ускорителей для исследований термоядерного синтеза. Казахстан



заклучил соглашение о сотрудничестве с ИТЭР для изучения радиационной стойкости систем диагностики плазмы и качества конструкционных материалов. Кроме того, Казахстан в партнерстве с Беларусью, Кыргызстаном, Российской Федерацией и Таджикистаном занимается совместным использованием токамака КТМ, что дополнительно способствует развитию НИОКР в этом регионе. ■

Российская Федерация

В Российской Федерации направления развития термоядерной энергетики заданы в Национальной стратегии по атомной энергии, в которой рассматриваются как чисто термоядерные энергетические установки, так и гибридные реакторы синтеза–деления. Среди основных участников этой инициативы — Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Министерство науки и высшего образования (включая Российскую академию наук) и Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Главными направлениями исследований являются токамаки, лазерные системы и гибридные системы синтеза–деления. Последние считаются стратегически важными для работы будущих ядерных реакторов и термоядерных установок в Российской Федерации. ■

1 ИФМИФ-DONES — строящийся комплекс для испытания материалов в Гранаде, Испания. Проект осуществляется под руководством Испании и Хорватии; Испания финансирует 50% всех расходов на строительство и 10% эксплуатационных расходов, Хорватия — 5% расходов по каждой из статей. В ИФМИФ-DONES будет использоваться ускоритель частиц для получения непрерывного пучка дейтронов, направленного на мишень, представляющую собой отражатель из жидкого лития. В результате взаимодействия между дейтерием и литием будет высвобождаться достаточно нейтронов для того, чтобы можно было смоделировать поток нейтронов, который со временем планируется получить на EU-DEMO. Непосредственно за литиевой мишенью будет находиться высокопоточный испытательный модуль, в котором будут размещены капсулы с образцами материалов для испытаний под нейтронным облучением [88].

2 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси посещает центр испытаний систем дистанционного манипулирования и робототехники в Калхэме, Соединенное Королевство.



Соединенное Королевство

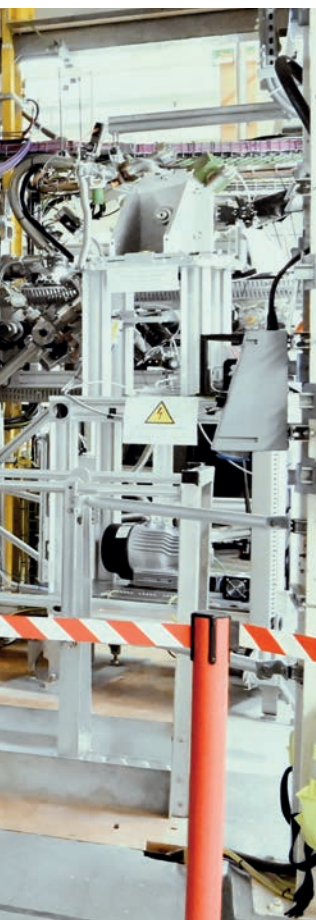
УАЭСК — это национальная организация Соединенного Королевства, отвечающая за исследования и внедрение термоядерной энергии. Она курирует работу компании «Юкей индустриал фьюжн солишнз», которая отвечает за создание прототипа термоядерной электростанции STEP. Кроме того, УАЭСК осуществляет программу «Будущее термоядерного синтеза» для содействия реализации Стратегии Соединенного Королевства в области термоядерного синтеза. Эта программа предполагает строительство новых установок в кампусе Калхэм УАЭСК на юге Англии для освоения новых технологий и расширения возможностей термоядерного топливного цикла. Цель программы «Будущее термоядерного синтеза» — быть на переднем крае мировой инновационной деятельности и наращивать общий промышленный потенциал посредством международного сотрудничества и разработки перспективных термоядерных электростанций. Кроме того, для формирования экспертного потенциала в области термоядерного синтеза в рамках различных дисциплин и на разных уровнях будет введен учебный модуль по термоядерному синтезу.

В 2021 году недалеко от Роттерхэма в Южном Йоркшире УАЭСК открыло Центр термоядерных технологий [89] для разработки и испытания материалов и компонентов будущих термоядерных электростанций. Кроме того, УАЭСК сотрудничает с научными кругами, другими исследовательскими организациями и участниками системы промышленных поставок в ряде областей, включая робототехнику и материалы.

Термоядерные устройства УАЭСК включают токамаки MAST Upgrade и JET. Работа с плазмой в JET завершилась в конце декабря 2023 года, и в настоящее время под надзором УАЭСК осуществляется проект вывода из эксплуатации и перепрофилирования JET [90]. Это первая в мире программа, которая будет способствовать развитию научных и инженерных знаний для создания будущих термоядерных установок и электростанций. Среди других проектов — роботизированная разборка токамака JET, изучение проблемы восстановления трития для повторного использования в качестве термоядерного топлива и дальнейшие разработки в кампусе Калхэм УАЭСК. ■

1 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси осматривает MAST Upgrade.

2 Соглашение между МАГАТЭ и правительством Чили, подписанное Л. Уэртой из Чилийской комиссии по ядерной энергии в присутствии заместителя министра энергетики Чили Л. Ф. Рамоса.



Латинская Америка и Карибский бассейн

Аргентина, Бразилия, Коста-Рика, Мексика, Перу и Чили

Общемировая тенденция по активизации работ в сфере термоядерного синтеза прослеживается также в ряде стран Латинской Америки, включая Аргентину, Бразилию, Коста-Рику, Мексику, Перу и Чили. С целью укрепления регионального потенциала в области физики термоядерного синтеза и плазмы ведется работа по развитию научных исследований, налаживанию сотрудничества посредством проведения совместных экспериментов, научных стажировок, координированных программ и сессий летних школ, посвященных физике плазмы и научно-техническим аспектам термоядерного синтеза.

В 2024 году МАГАТЭ в сотрудничестве с Принстонской лабораторией физики плазмы начало проведение новой серии вебинаров, посвященных текущему прогрессу и последним

событиям в научном исследовании термоядерного синтеза и плазмы в Латинской Америке.

В мае 2024 года МАГАТЭ и правительство Чили подписали соглашение об укреплении сотрудничества в сфере ядерных технологий и лития [91]. Оно имеет целью освоение ядерных технологий для увеличения добычи лития и позволяет МАГАТЭ оказывать более широкую поддержку этому региону. Литий применяется в термоядерном синтезе и других отраслях энергетики.

В июне 2024 года МАГАТЭ и правительство Перу подписали совместную декларацию о сотрудничестве в области применения ядерных технологий в горнодобывающей промышленности, чтобы помочь Перу в деле охраны окружающей среды, создав условия для экологически устойчивой добычи полезных ископаемых и разведки месторождений лития [92]. ■

3 Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси подписывает соглашение с министром иностранных дел Перу Х. Гонсалесом-Олаэчеа в ходе своего визита в Перу в июне 2024 года.



◀ Вебинары МАГАТЭ о
деятельности в области
термоядерного синтеза
в Латинской Америке

Северная Америка

США

Министерство энергетики США уже несколько десятилетий инвестирует средства в исследования термоядерного синтеза по линии программы Бюро по научным исследованиям в области термоядерной энергии. В рамках этой работы оказывается содействие проектам международного сотрудничества, таким как ИТЭР, а также программе Национального управления ядерной безопасности по инерционному термоядерному синтезу. В последнее время Агентство передовых исследований в области энергетики (ARPA-E) наметило потенциально революционные направления НИОКР по термоядерному синтезу, уделив основное внимание созданию условий для скорейшего вывода на рынок термоядерных технологий. Текущей задачей программы по термоядерному синтезу Министерства энергетики США является увязка фундаментальных исследований в области термоядерного синтеза с прикладными исследованиями, чтобы удовлетворить потребности растущей термоядерной отрасли США. В США работает больше всего компаний, занимающихся термоядерной энергией (в общей сложности 25), в том числе многие из числа крупнейших. Кроме того, в США насчитывается больше всего

термоядерных установок, которые уже эксплуатируются, строятся или разрабатываются (более 40). В связи с этим в настоящее время Министерство энергетики США координирует широкий спектр новых мероприятий, имеющих своей конечной целью вывод на рынок технологии термоядерного синтеза. К ним относятся Поэтапная программа развития термоядерной энергетики [93], международные мероприятия по укреплению энергетической безопасности и технологического лидерства [94] и различные межведомственные правительственные мероприятия [95] по оценке международной конкурентной среды и развития рынка, разработке соответствующей нормативной базы регулирования, выстраиванию цепей поставок, обеспечению инклюзивного развития кадрового потенциала, обеспечению энергетической и экологической справедливости, поиску реалистичных способов утилизации и переработки отходов и обеспечению участия общественности. ■

Канада

Канада обладает значительным экспертным потенциалом в ключевых областях, необходимых для создания зрелой термоядерной отрасли, таких как производство дейтерия и трития и обращение с ними, робототехника, дистанционное манипулирование, а также материаловедение. Этот потенциал





может быть использован для содействия развитию термоядерной отрасли и хорошо согласуется с потребностями технологий термоядерного синтеза. Несмотря на эти сильные стороны, государственная поддержка НИОКР в области термоядерного синтеза в Канаде не столь велика, и текущая деятельность осуществляется в основном научными учреждениями и частными компаниями.

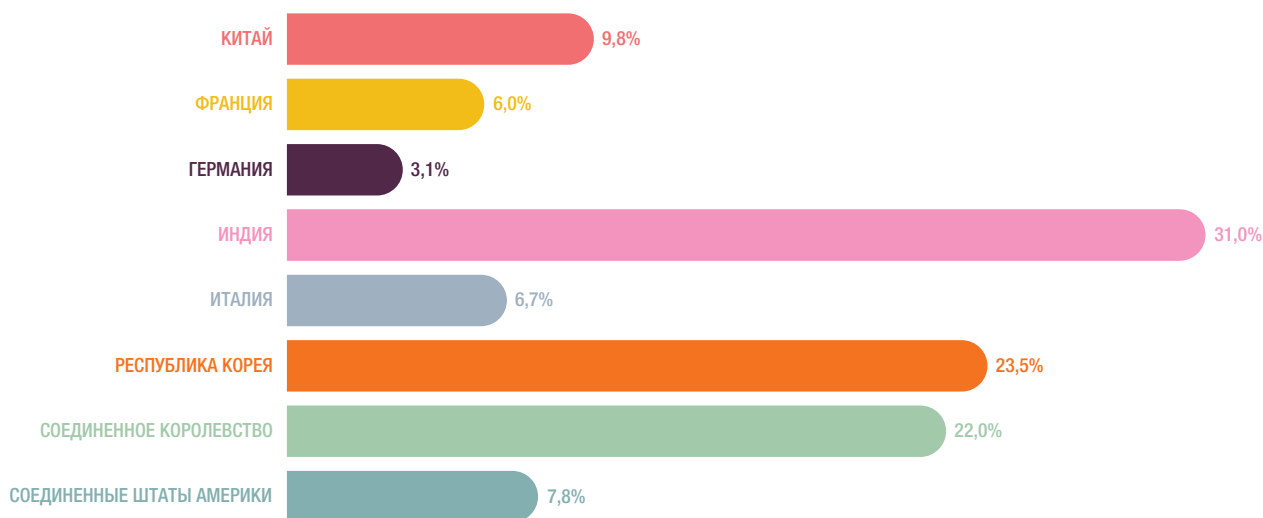
В докладе «Термоядерная энергия для Канады» [48], подготовленном под руководством ЯЛК, канадскому правительству настоятельно рекомендуется выработать ясную политику и мандат для создания экосистемы термоядерной энергетики. В этой связи ЯЛК объявили, что начнут процесс приглашения к участию в создании малых модульных реакторов, в том числе прототипов термоядерных установок [50]. Кроме того, ЯЛК расширили программу «Канадская инициатива ядерных исследований», чтобы уделять больше внимания НИОКР в области термоядерного синтеза, поощряя осуществление совместных проектов с поставщиками усовершенствованных ядерных реакторов. ■



Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси во время посещения Принстонской лаборатории физики плазмы, США, в сентябре 2024 года.

Термояде синтез в цифрах

рный



Положительный совокупный рост числа оригинальных статей, представляемых на конференциях по энергии термоядерного синтеза, в разбивке по странам (2006–2023 годы).

В течение последних 17 лет Индия, Республика Корея и Соединенное

Королевство лидировали по росту общего числа оригинальных статей, что свидетельствует о все большей вовлеченности этих стран в международное сотрудничество. Такой рост говорит о чрезвычайно важной роли глобального взаимодействия в

ускорении прогресса на пути к освоению термоядерной энергии, поскольку совместный экспертный потенциал и коллективные усилия дают толчок инновациям и способствуют научным открытиям.

Термоядерная энергия в 2024 году: общая картина

За период с 2021 по 2024 год в отрасли термоядерной энергетики были отмечены значительный рост и диверсификация. Существенно возросло общее число термоядерных проектов, при этом заметно увеличилось число проектов с альтернативным и инерционным удержанием плазмы и стеллараторных конструкций, что свидетельствует о переходе к изучению разного рода других технологий помимо традиционных токамаков.

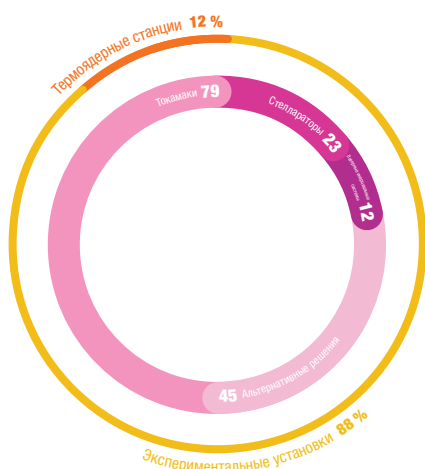
В 2024 году отмечено более равномерное соотношение между экспериментальными проектами и термоядерными установками, свидетельствующее о том, что эта отрасль постепенно встает на ноги. В ней также наблюдался значительный рост числа запланированных проектов, что говорит о стратегическом долгосрочном планировании. Кроме того, почти вдвое увеличилась доля частного сектора,

что свидетельствует о возросшем коммерческом интересе и инвестициях, которые дополняют последовательную и твердую поддержку этой деятельности государством.

2024 год знаменует собой динамичный этап в освоении термоядерной энергии, характеризующийся технологическим разнообразием, стратегическим планированием и более выраженной тенденцией к сотрудничеству между государственным и частным секторами. ■

Рост инвестиций и многообразие технологических подходов

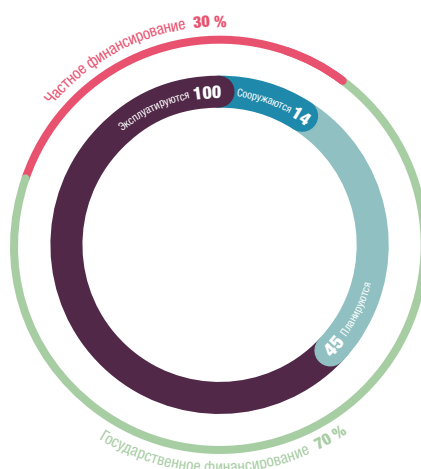
Последние тенденции в секторе термоядерной энергетики сулят многообещающие перспективы, включая ускорение технологического прогресса, рост объема инвестиций и более широкое внедрение этой технологии. Появление



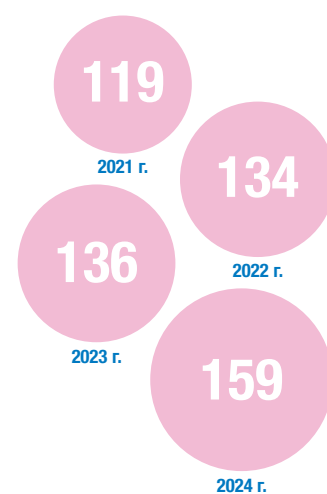
В 2024 году большинство термоядерных установок представляли собой экспериментальные конструкции (139 устройств). Хотя преобладающим типом устройств в 2024 году остаются токамаки, в последние годы получили распространение и другие конструкции установок.

множества альтернативных конструкций термоядерных установок и значительный рост числа проектов, предполагающих внедрение лазерных и стеллараторных технологий, свидетельствуют о том, что для создания устойчивой термоядерной энергетики изучаются различные концепции. Такой диверсифицированный подход может существенно расширить возможности для новых открытий.

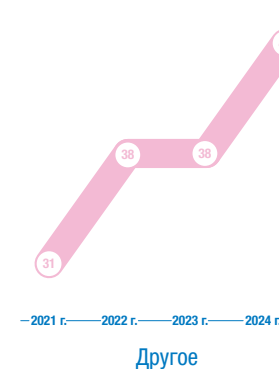
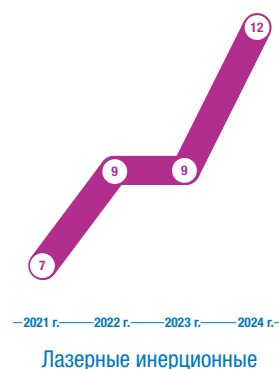
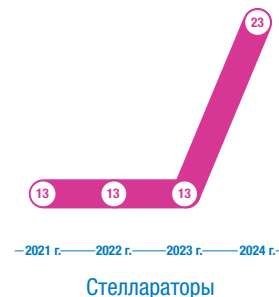
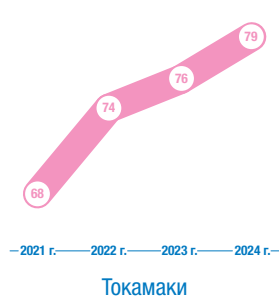
Дальнейшее взаимодействие между государственным и частным секторами будет иметь решающее значение для ускорения технологического прогресса и превращения успешных экспериментальных моделей в действующие термоядерные электростанции. ■



Государственное финансирование термоядерных установок в 2024 году остается на прежнем уровне, тогда как объемы частного финансирования термоядерных проектов с 2021 года выросли более чем в два раза. В 2024 году в эксплуатации находится больше термоядерных установок, чем когда-либо прежде: их стало на пять больше, чем в 2023 году, а многие другие установки находятся в стадии планирования.



Количество проектов в области термоядерной энергии растет год от года, и вместе с ним растут и интерес и объемы инвестиций в термоядерную энергетику со стороны государственных и частных организаций.



▲
Количество термоядерных устройств в годовом разрезе.

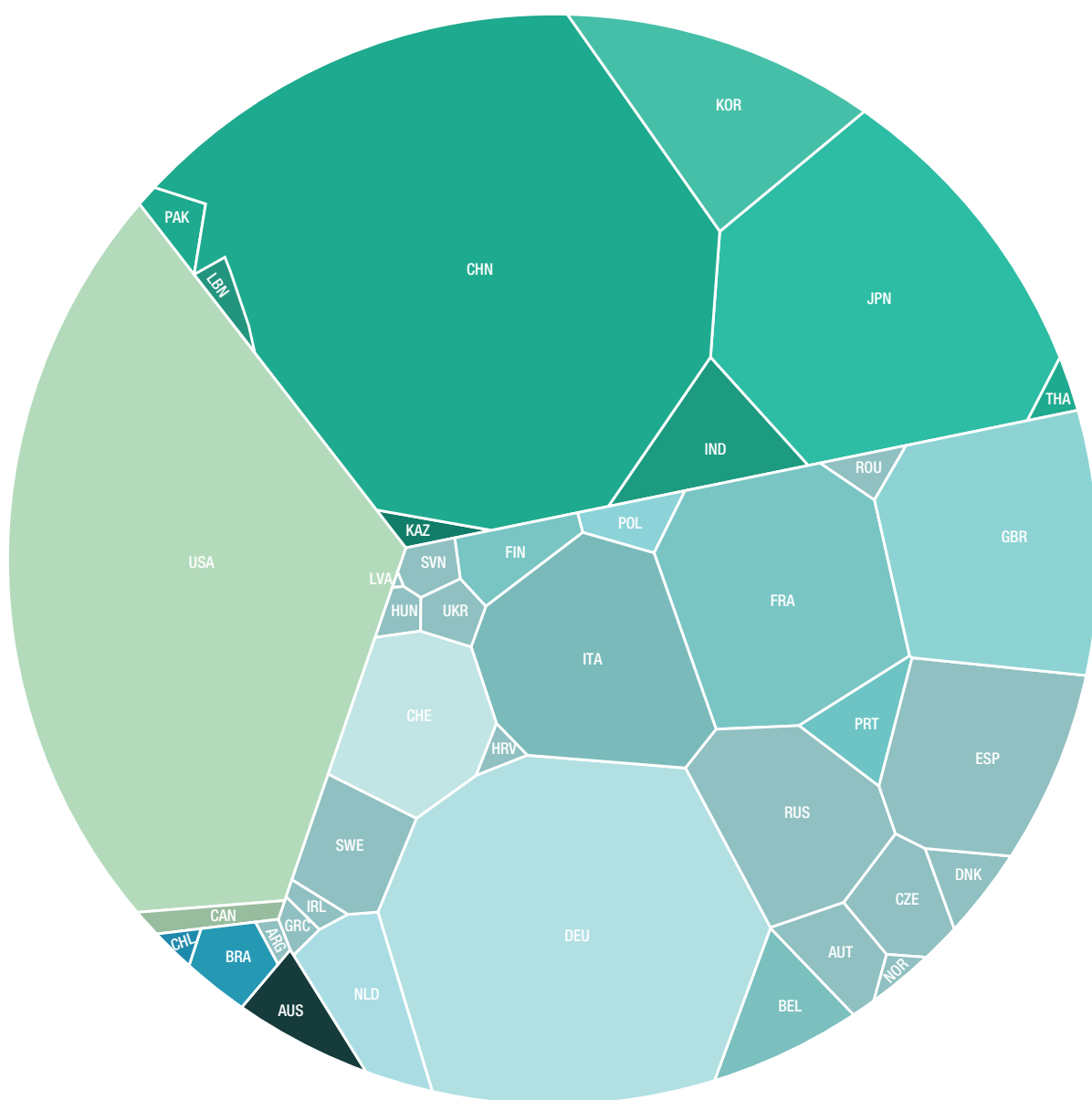
Тенденции в области исследований термоядерного синтеза (2014–2023 годы)

За последнее десятилетие многие страны мира внесли значительный вклад в исследования в области термоядерной энергетики. Свидетельством растущего интереса и дальнейшего развития в этой области является совокупное количество статей, принятых к публикации в журнале «Ньюклар фьюжн» в период с 2014 по 2023 год.

Прослеживаемые на материале этих статей тенденции основываются на данных, относящихся непосредственно к содержанию «Ньюклар фьюжн», но не обязательно отражают глобальные тенденции в исследованиях и разработках в области термоядерного синтеза.

Наибольшее количество материалов за эти годы представлено исследователями из Китая (858 принятых статей). Это свидетельствует о том, что в последнее десятилетие Китай уделяет большое внимание термоядерному синтезу. Значительный вклад в эту область также вносят другие страны, включая США (762 статьи) и Германию (447 статей), чему способствуют их значительные инвестиции в науку и технологии. Кроме того, ряд стран, такие как Япония (346 статей), Франция (200 статей), Великобритания (196 статей), Италия (174 статьи) и Испания (129 статей), на протяжении многих лет реализуют исследовательские программы в этой области и являются важнейшими участниками международных исследований.

Наряду с Китаем и Японией, значительный вклад от Азиатского региона вносят авторы из Республики Корея (129 статей), что лишний раз подчеркивает растущую роль этого региона в термоядерных исследованиях. Заметных успехов в этой области также добилась Индия (57 статей). Сильные позиции в области термоядерных исследований сохраняет Российская Федерация (115 статей). Такие страны, как Нидерланды (47 статей), Швеция (43 статьи), Бельгия (38 статей), Чешская Республика (36 статей) и Австралия (13 статей), последовательно обеспечивают устойчивый приток научных данных, особенно в рамках международных партнерств и специализированных направлений исследований в области термоядерного синтеза. ■



◀ **Наиболее часто цитируемая статья, изданная с 2014 года**



Наиболее часто загружаемая статья, изданная в 2024 году



◀ **Наиболее часто загружаемая статья, изданная с 2014 года**



Глобальные тенденции в области исследований термоядерного синтеза, которые прослеживаются по количеству статей, принятых к публикации в журнале «Ньюклеар фьюжн» (статьи, принятые в 2014–2023 гг.). Материалы участников из организаций ИТЭР и JET учитываются в статистике по Франции и Великобритании соответственно.

Список использованных источников

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition (2022), <https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition>
- [2] EUROFUSION, Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes (2024), <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>
- [3] NORMILE, D., First plasma fired up at world's largest fusion reactor (2023), <https://www.science.org/content/article/first-plasma-fired-world-s-largest-fusion-reactor3>
- [4] INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Reliable 403 Seconds Stationary H-mode Plasmas Demonstrated on EAST (2023), english.ipp.cas.cn/sywx/202304/t20230417_329393.html
- [5] KREMEN, R., Fusion record set for tungsten tokamak WEST (2024), <https://phys.org/news/2024-05-fusion-tungsten-tokamak-west.html>
- [6] DING, S., et al., A high-density and high-confinement tokamak plasma regime for fusion energy, *Nature* 629 (2024) 555–560 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07313-3>
- [7] SEO, J., et al., Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning, *Nature* 626 (2024) 746–751 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07024-9>
- [8] LEVITT, B. et al., Elevated Electron Temperature Coincident with Observed Fusion Reactions in a Sheared-Flow-Stabilized Z Pinch, *Phys. Rev. Lett.* 132 (2024), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.155101>
- [9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: Insights and Collaboration Opportunities (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/06/26/2421>
- [10] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, ENGINEERING, AND MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, The National Academies Press, Washington, D.C. (2021), <https://doi.org/10.17226/25991>
- [11] CHAPMAN, I., COWLEY, S., WILSON, H., Delivering fusion energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP), *Phil. Trans. R. Soc. A* 382 (2024), <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0416>
- [12] MIT ENERGY INITIATIVE, The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System (2024), https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI_FusionReport_091124_final_COMPLETE-REPORT_fordistribution.pdf
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Opens Fusion Energy Discussion at COP28 as Momentum Keeps Growing (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-opens-fusion-energy-discussion-at-cop28-as-momentum-keeps-growing>
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA World Fusion Outlook 2023, Outlooks, IAEA, Vienna (2023), <https://doi.org/10.61092/iaea.chyw-jq1g>
- [15] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The global fusion industry in 2024 (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [16] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Fusion Industry Supply Chain: Opportunities and Challenges (2023), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/08/FIA-Supply-Chain-2023-FINAL.pdf>
- [17] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, The European High-Level Roundtable on Fusion energy calls for closer collaboration between the public and the private sector (2024), https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/european-high-level-roundtable-fusion-energy-calls-closer-collaboration-between-public-and-private-2024-03-14_en
- [18] WORLD BANK, How Can Public-Private Partnerships (PPPs) be Successful? (2023), <https://www.worldbank.org/en/region/mena/brief/how-can-public-private-partnerships-ppps-be-successful>
- [19] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/energy-and-power/climate-smart-ppps-1>
- [20] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs: Further Reading and Resources (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/climate-smart-ppps-further-reading-and-resources>
- [21] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches Commercializing Fusion Energy Paper (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-commercializing-fusion-energy-paper/>
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Device Information System (2024), <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>
- [23] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN COMMISSION), et al., Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy, Luxembourg, European Union (2024), <https://data.europa.eu/doi/10.2833/323326>
- [24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: Inflation Reduction Act Supporting the Future of DOE Science (2022), <https://www.energy.gov/science/articles/fact-sheet-inflation-reduction-act-supporting-future-doe-science>
- [25] US DEPARTMENT OF THE TREASURY, U.S. Department of the Treasury, IRS Release Proposed Guidance to Continue Investment Boom in Clean Energy Production (2024), <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2376>
- [26] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Consultation on a new National Policy Statement for Fusion Energy (2024), <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/667d5af197ea0c79abfe4d1a/new-nps-for-fusion-energy-consultation-document-1.pdf>

- [27] EUROPEAN COMMISSION, Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act), COM/2023/161 final (2023), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52023PC0161>
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, New IAEA Initiative to Enhance Fusion Energy Collaboration (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-initiative-to-enhance-fusion-energy-collaboration>
- [29] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Towards fusion energy: the UK fusion strategy: The next stage of the UK's fusion energy strategy (2023), <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf>
- [30] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UK launches search for industry partners to develop fusion plant (2024), <https://www.gov.uk/government/news/uk-launches-search-for-industry-partners-to-develop-fusion-plant>
- [31] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the UK Department for Energy Security and Net Zero Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion (2023), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-uk-department-energy-security-and-net-zero-concerning>
- [32] THE WHITE HOUSE, International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development (2023), <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/02/international-partnerships-in-a-new-era-of-fusion-energy-development/>
- [33] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization (2024), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-japan-ministry-education-sports-science-and-technology>
- [34] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fusion Energy Strategy 2024 (2024), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf>
- [35] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/congress-increases-u-s-funding-for-fusion-energy-sciences-research/>
- [36] REUTERS, Biden administration expands tax credits beyond wind, solar (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/biden-administration-expands-tax-credits-beyond-wind-solar-2024-05-29/>
- [37] FEDERAL REGISTER, Department of Energy, Fusion Energy Public-Private Consortium Framework, 2024-12539 (2024).
- [38] COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION JAPAN, Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional translation) (2024), https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf
- [39] MOONSHOT RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, Announcing Call for Proposals for Project Managers in Moonshot Goal 10 (2024), <https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202403/index.html>
- [40] THE WALL STREET JOURNAL, China Outspends the U.S. on Fusion in the Race for Energy's Holy Grail (2024), <https://www.wsj.com/world/china/china-us-fusion-race-4452d3be>
- [41] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [42] KOREA JOONGANG DAILY, Gov't to chase 'artificial sun' with \$866 million investment in nuclear fusion reactor development (2024), <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2024-07-24/business/economy/Govt-to-chase-artificial-sun-with-866-million-investment-in-nuclear-fusion-reactor-development/2097463>
- [43] FUSION FOR ENERGY, Discussing the European fusion strategy (2024), <https://fusionforenergy.europa.eu/news/discussing-the-european-fusion-strategy/>
- [44] GERMAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, Förderprogramm Fusion 2040, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn (2024).
- [45] ITALIAN MINISTRY OF ENVIRONMENT, Al MASE la prima riunione della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (2023), <https://www.mase.gov.it/comunicati/al-mase-la-prima-riunione-della-piattaforma-nazionale-un-nucleare-sostenibile>
- [46] G7 ITALIA 2024, Apulia G7 Leaders' Communiqué (2024), <https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/Apulia-G7-Leaders-Communique.pdf>
- [47] REUTERS, Britain, Canada sign deal to collaborate on fusion energy (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/britain-canada-sign-deal-collaborate-fusion-energy-2024-02-14/>
- [48] CANADIAN NUCLEAR LABORATORIES, It's Time for a Canadian Fusion Strategy (2024), <https://www.cnl.ca/clean-energy/hydrogen-research/fusion-day-2024/>
- [49] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UKAEA and CNL partner to accelerate fusion energy development (2024), <https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-cnl-partner-to-accelerate-fusion-energy-development>
- [50] WORLD NUCLEAR NEWS, CNL announces programmes to speed fusion deployment (2024), <https://world-nuclear-news.org/Articles/CNL-announces-programmes-to-speed-fusion-deploymen>
- [51] GENERAL FUSION, General fusion partners with Canadian Nuclear Laboratories to advance commercial power plant design (2024), <https://generalfusion.com/post/general-fusion-partners-with-canadian-nuclear-laboratories-to-advance-commercial-power-plant-design/>
- [52] KYOTO FUSIONEERING, Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories Launch Joint Venture, Fusion Fuel Cycles Inc. (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/05/22/2337>
- [53] FUSION ENERGY BASE, Equity Investments to Fusion Energy Companies 2010-2023 by Country (2024), <https://www.fusionenergybase.com/article/equity-investments-to-fusion-energy-companies-2010-2023-by-country>
- [54] FUSION ENERGY BASE, Fusion Energy Base (2024), <https://www.fusionenergybase.com/>

- [55] US CONGRESS, S.870 - A bill to authorize appropriations for the United States Fire Administration and firefighter assistance grant programs, to advance the benefits of nuclear energy, and for other purposes,
<https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870/all-info>
- [56] PADILLA, A. The Fusion Energy Act of 2024, One pager (2024),
<https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/One-Pager-Fusion-Act.pdf>
- [57] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Consolidated Guidance About Materials Licenses, Preliminary Draft Report, Rep. NUREG-1556, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2024).
- [58] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Agile Nations working group on fusion energy regulation: initial recommendations, Policy Paper (2023),
<https://www.gov.uk/government/publications/agile-nations-uk-japan-and-canada-joint-recommendations-on-fusion-energy/agile-nations-working-group-on-fusion-energy-regulation-initial-recommendations>
- [59] DEUTSCHER BUNDESTAG, Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa (2024),
https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504
- [60] MEXICO BUSINESS NEWS, Oil Industry Explores Viability of Nuclear Fusion (2023),
<https://mexicobusiness.news/oilandgas/news/oil-industry-explores-viability-nuclear-fusion>
- [61] RECHARGE, Can a fusion energy pioneer backed by Google and Goldman Sachs help oil giant Occidental suck carbon from the air? (2024),
<https://www.rechargenews.com/energy-transition/can-a-fusion-energy-pioneer-backed-by-google-and-goldman-sachs-help-oil-giant-occidental-suck-carbon-from-the-air-2-1-1661407>
- [62] ENI, Eni signs a new collaboration agreement with CFS to support development of fusion energy (2023),
<https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2023/03/eni-signs-new-collaboration-agreement-with-cfs-development-fusion-energy.html>
- [63] REUTERS, OpenAI CEO Altman says at Davos future AI depends on energy breakthrough (2024),
<https://www.reuters.com/technology/openai-ceo-altman-says-davos-future-ai-depends-energy-breakthrough-2024-01-16/>
- [64] HELION ENERGY, Helion announces world's first fusion energy purchase agreement with Microsoft (2024),
<https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/>
- [65] COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS, Commonwealth Fusion Systems Raises \$115 Million and Closes Series A Round to Commercialize Fusion Energy (2024),
<https://cfs.energy/news-and-media/close-series-a-round>
- [66] NIKKIEI ASIA, Honda-backed Israeli startup to use nuclear fusion to power EVs (2024),
<https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Honda-backed-Israeli-startup-to-use-nuclear-fusion-to-power-EVs>
- [67] PR NEWswire, NT-Tao Raises \$22M Series A to Ensure a Secure, Clean Energy Future with a Compact and Scalable Nuclear Fusion Solution (2023),
<https://www.prnewswire.com/il/news-releases/nt-cao-raises-22m-series-a-to-ensure-a-secure-clean-energy-future-with-a-compact-and-scalable-nuclear-fusion-solution-301735890.html>
- [68] REUTERS, Chinese EV maker Nio invests in nuclear fusion startup (2023),
<https://www.reuters.com/business/energy/chinese-ev-maker-nio-invests-nuclear-fusion-startup-2023-05-19/>
- [69] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches 2024 Supply Chain Report (2024),
<https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-supply-chain-report/>
- [70] WORLD NUCLEAR NEWS, British-Japanese partnership for fusion development (2023),
<https://world-nuclear-news.org/Articles/British-Japanese-partnership-for-fusion-development>
- [71] TOKAMAK ENERGY, Tokamak Energy and Furukawa Electric Group strengthen relationship to progress commercial fusion energy (2024),
<https://tokamakenergy.com/2023/01/11/tokamak-energy-and-furukawa-electric-group-strengthen-relationship-to-progress-commercial-fusion-energy/>
- [72] HELION, Helion and Nucor announce collaboration to deploy 500 MWe fusion power plant (2023),
<https://www.helionenergy.com/articles/helion-nucor-collaboration-to-deploy-500-mw-fusion-power-plant/>
- [73] RECHARGE, 'Fusion in five years' | AI and Facebook billionaire-backed pioneer signs Microsoft up for 'star power' (2023),
<https://www.rechargenews.com/energy-transition/fusion-in-five-years-ai-and-facebook-billionaire-backed-pioneer-signs-microsoft-up-for-star-power/2-1-1450880>
- [74] WORLD NUCLEAR NEWS, OPG investigates fusion as future option for Ontario (2024),
<https://world-nuclear-news.org/Articles/OPG-investigates-fusion-as-future-option-for-Ontar>
- [75] BRUCE POWER, Bruce Power, General Fusion, and Nuclear Innovation Institute sign agreement to advance a net-zero future (2022),
<https://www.brucepower.com/2022/02/02/bruce-power-general-fusion-and-nuclear-innovation-institute-sign-agreement-to-advance-a-net-zero-future/>
- [76] CHINA DAILY, Controlled nuclear fusion emerges as new frontier for China's venture capitalists (2024),
<https://www.chinadaily.com.cn/a/202407/23/WS669f5ca3a31095c51c50f7ad.html>
- [77] CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, China Sets to Build Fusion Energy Research Facility (2023),
https://english.cas.cn/newsroom/multimedia_news/202309/t20230918_376979.shtml
- [78] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Chinese Fusion Energy Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion Power (2024),
<https://www.fusionindustryassociation.org/chinese-fusion-energy-programs-are-a-growing-competitor-in-the-global-race-to-fusion-power/>
- [79] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024),
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Survey of Fusion Devices 2022, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022)

- [81] HONG, S.H., et al., Neutronics analysis for conceptual design of target system based on a deuteron accelerator-driven fusion neutron source, *Fusion Eng. Des.* 199 (2024) 114103 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114103>
- [82] BUSINESS TIMES, Singapore could star in the race towards nuclear fusion energy (2024), <https://www.businesstimes.com.sg/esg/singapore-could-star-race-towards-nuclear-fusion-energy>
- [83] HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Thailand Tokamak 1 (TT-1) Facility Officially Launched in Thailand (2023), https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202307/t20230728_334143.html
- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Research in Southeast Asia: IAEA and ITER Support School in Thailand (2020), <https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-research-in-southeast-asia-iaea-and-iter-support-school-in-thailand>
- [85] EUROFUSION, The EUROfusion Roadmap (2024), <https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>
- [86] GAUSS FUSION, Establishment of a European Fusion Association (2024), https://cdn.prod.website-files.com/6461f14c58e0282da166d83d/6669502d73c9e85f4d2af3e0_European%20Fusion%20Association_PM_EN%5B86%5D.pdf
- [87] NUCNET, Companies Announce Formation Of Nuclear Fusion Industrial Association (2024), <https://www.nucnet.org/news/companies-announce-formation-of-nuclear-fusion-industrial-association-6-2-2024>
- [88] ITER, Breaking ground at IFMIF-DONES (2023), <https://www.iter.org/newsline/-/3938>
- [89] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, FTF – Testing technology for future fusion power station (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a820d4040f0b62305b9237d/UKAEA_-_Fusion_Technology_Facilities.pdf
- [90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: A new chapter at UK Atomic Energy Authority (2024), https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/files/JDR_New_Chapter_UKAEA.pdf
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Visits Chile to Sign Agreements on Plastic Pollution and Lithium Mining (2024), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-visits-chile-to-sign-agreements-on-plastic-pollution-and-lithium-mining>
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Director General Grossi Visits Peru to Sign Agreements on Atoms4Food, Mining and Lithium (2024), <https://www.iaea.org/newscenter/news/director-general-grossi-visits-peru-to-sign-agreements-on-atoms4food-mining-and-lithium>
- [93] US DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Announces \$46 Million for Commercial Fusion Energy Development (2023), <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-46-million-commercial-fusion-energy-development>
- [94] OFFICE OF CONGRESSIONAL AND INTERGOVERNMENTAL AFFAIRS, Before the House Committee on Science, Space, and Technology Subcommittee on Energy (2023), <https://www.energy.gov/congressional/articles/house-committee-science-space-and-technology-subcommittee-energy-4>
- [95] THE WHITE HOUSE, Parallel Processing the Path to Commercialization of Fusion Energy (2022), <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/06/03/parallel-processing-the-path-to-commercialization-of-fusion-energy/>

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВГТЭ	Всемирная группа по термоядерной энергии
ВТСП	высокотемпературный сверхпроводящий
ЕВЕДА	мероприятия по апробации технических решений и техническому проектированию
ЕС ИИ	Европейский союз искусственный интеллект
ИФМИФ	Международная установка по облучению материалов для термоядерного синтеза
КФС	«Коммонуэлт фьюжн системз»
НИФ	Национальная установка по термоядерному зажиганию
ПГЧС	партнерство между государственным и частным секторами
УАЗСК	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства
ЯЛК	Ядерные лаборатории Канады
CFETR	Китайский испытательный термоядерный реактор
DONES	Источник нейтронов для исследований в рамках проекта DEMO
DTT	опытный реактор-токамак с дивертором
EU-DEMO	Европейская демонстрационная термоядерная энергетическая установка
JET	Объединенный европейский тор
KSTAR	Корейский усовершенствованный исследовательский токамак со сверхпроводящим соленоидом
W7-X	стелларатор Wendelstein 7-X

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Настоящая публикация была отредактирована редакционным персоналом МАГАТЭ в той степени, в какой это было сочтено необходимым для удобства читателей. В ней не затрагиваются вопросы ответственности — юридической или иного рода — за действия или бездействие со стороны какого-либо лица.

Хотя для обеспечения точности информации, содержащейся в настоящей публикации, были приложены большие усилия, ни МАГАТЭ, ни его государства-члены не несут ответственности за последствия, которые могут возникнуть в результате ее использования.

Данные здесь руководящие указания с описанием положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

Использование тех или иных названий стран или территорий не означает какого-либо суждения со стороны издателя — МАГАТЭ — относительно правового статуса таких стран или территорий, их органов и учреждений либо относительно определения их границ.

Упоминание названий конкретных компаний или продуктов (независимо от того, указаны ли они как зарегистрированные) не означает какого-либо намерения нарушить права собственности и не должно рассматриваться как одобрение или рекомендация со стороны МАГАТЭ.

МАГАТЭ не несет ответственности за постоянство и точность приводимых в настоящей публикации адресов сайтов внешних или третьих сторон и не гарантирует того, что информационное наполнение таких сайтов является или останется точным и релевантным. ■

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Женева) и пересмотренной в 1971 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, может потребоваться разрешение. Более подробная информация приводится на странице <https://www.iaea.org/ru/publikacii/prava-i-razresheniya>. Вопросы следует направлять по адресу:

Издательская секция (Publishing Section)
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр а/я 100
1400 Вена, Австрия
тел.: +43 1 2600 22529 или 22530
эл. почта: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/ru/publikacii

<https://doi.org/10.61092/iaea.lqqh-qagf>

ЧЛЕНАМИ МЕЖДУНАРОДНОГО АГЕНТСТВА ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ЯВЛЯЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ГОСУДАРСТВА:

АВСТРАЛИЯ	ЙЕМЕН	ПОРТУГАЛИЯ
АВСТРИЯ	КАБО-ВЕРДЕ	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА
АЗЕРБАЙДЖАН	КАЗАХСТАН	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АЛБАНИЯ	КАМБОДЖА	РУАНДА
АЛЖИР	КАМЕРУН	РУМЫНИЯ
АНГОЛА	КАНАДА	САЛЬВАДОР
АНТИГУА И БАРБУДА	КАТАР	САМОА
АРГЕНТИНА	КЕНИЯ	САН-МАРИНО
АРМЕНИЯ	КИПР	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
АФГАНИСТАН	КИТАЙ	СВЯТОЙ ПРЕСТОЛ
БАГАМСКИЕ ОСТРОВА	КОЛУМБИЯ	СЕВЕРНАЯ МАКЕДОНИЯ
Бангладеш	КОМОРСКИЕ ОСТРОВА	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
БАРБАДОС	КОНГО	СЕНЕГАЛ
БАХРЕЙН	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕНТ-ВИНСЕНТ И ГРЕНАДИНЫ
БЕЛАРУСЬ	КОСТА-РИКА	СЕНТ-КИТС И НЕВИС
БЕЛИЗ	КОТ-Д'ИВУАР	СЕНТ-ЛЮСИЯ
БЕЛЬГИЯ	КУБА	СЕРБИЯ
БЕНИН	КУВЕЙТ	СИНГАПУР
БОЛГАРИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ
БОЛИВИЯ, МНОГОНАЦИОНАЛЬНОЕ	ЛАОССКАЯ НАРОДНО-	РЕСПУБЛИКА
ГОСУДАРСТВО	ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СЛОВАКИЯ
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛАТВИЯ	СЛОВЕНИЯ
БОТСВАНА	ЛЕСОТО	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО
БРАЗИЛИЯ	ЛИБЕРИЯ	ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ
БРУНЕЙ-ДАРУССАЛАМ	ЛИВАН	ИРЛАНДИИ
БУРКИНА-ФАСО	ЛИВИЯ	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БУРУНДИ	ЛИТВА	СУДАН
ВАНУАТУ	ЛИХТЕНШТЕЙН	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
ВЕНГРИЯ	ЛЮКСЕМБУРГ	ТАДЖИКИСТАН
ВЕНЕСУЭЛА, БОЛИВАРИАНСКАЯ	МАВРИКИЙ	ТАИЛАНД
РЕСПУБЛИКА	МАВРИТАНИЯ	ТОГО
ВЬЕТНАМ	МАДАГАСКАР	ТОНГА
ГАБОН	МАЛАВИ	ТРИНИДАД И ТОБАГО
ГАИТИ	МАЛАЙЗИЯ	ТУНИС
ГАЙАНА	МАЛИ	ТУРКМЕНИСТАН
ГАМБИЯ	МАЛЬТА	ТУРЦИЯ
ГАНА	МАРОККО	УГАНДА
ГВАТЕМАЛА	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	УЗБЕКИСТАН
ГВИНЕЯ	МЕКСИКА	УКРАИНА
Германия	МОЗАМБИК	УРУГВАЙ
ГОНДУРАС	МОНАКО	ФИДЖИ
Гренада	МОНГОЛИЯ	ФИЛИППИНЫ
ГРЕЦИЯ	МЬЯНМА	ФИНЛЯНДИЯ
ГРУЗИЯ	НАМИБИЯ	Франция
ДАНИЯ	НЕПАЛ	ХОРВАТИЯ
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	НИГЕР	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ
КОНГО	НИГЕРИЯ	РЕСПУБЛИКА
ДЖИБУТИ	НИДЕРЛАНДОВ, КОРОЛЕВСТВО	ЧАД
ДОМИНИКА	НИКАРАГУА	ЧЕРНОГОРИЯ
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	Новая Зеландия	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ЕГИПЕТ	НОРВЕГИЯ	ЧИЛИ
ЗАМБИЯ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА	ШВЕЙЦАРИЯ
ЗИМБАБВЕ	ТАНЗАНИЯ	ШВЕЦИЯ
Израиль	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ	ШРИ-ЛАНКА
Индия	ЭМИРАТЫ	ЭКВАДОР
ИНДОНЕЗИЯ	ОМАН	ЭРИТРЕЯ
ИОРДАНИЯ	ПАКИСТАН	ЭСВАТИНИ
ИРАК	ПАЛАУ	ЭСТОНИЯ
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ПАНАМА	ЭФИОПИЯ
Ирландия	ПАПУА — НОВАЯ ГВИНЕЯ	ЮЖНАЯ АФРИКА
Исландия	ПАРАГВАЙ	ЯМАЙКА
ИСПАНИЯ	ПЕРУ	ЯПОНИЯ
ИТАЛИЯ	ПОЛЬША	

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире».

«Решая сложные задачи,
связанные с этой
революционной технологией,
мы непоколебимы
в своем стремлении
овладеть энергией
термоядерного синтеза
ради того, чтобы жить
в устойчивом, благополучном
и безопасном мире».

Генеральный директор МАГАТЭ
Рафаэль Мариано Гросси