

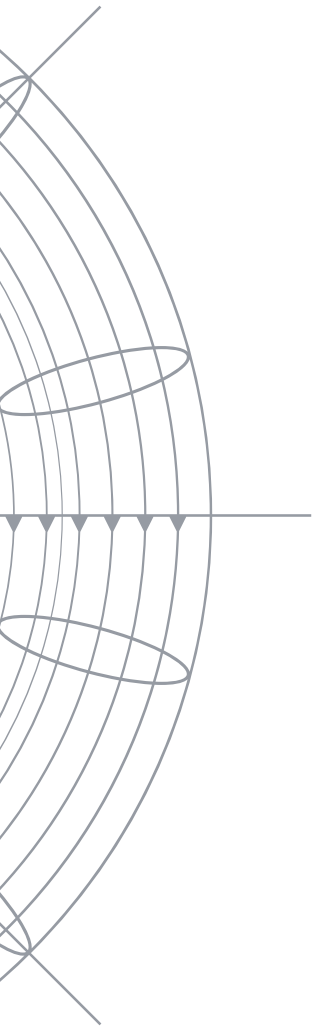


IAEA

Международное агентство по атомной энергии

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ — КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Общее видение развития
термоядерной энергетики



Термоядерный синтез — ключевые элементы

Общее видение развития
термоядерной энергетики

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перспектива использования термоядерного синтеза как потенциального решения для долгосрочного и устойчивого обеспечения всего мира экологически чистой энергией рассматривается уже несколько десятилетий. Пришло время перейти от теории к практике. Последние разработки в области термоядерного синтеза вдыхают новую жизнь в развитие термоядерных установок, и в этом ключе их внедрение в обозримом будущем становится все более вероятным.

Движимый такими национальными и международными программами, как проект ИТЭР, этот сектор сейчас находится на пороге беспрецедентной трансформации. Катализатором этой трансформации стали научные прорывы в сочетании с заметным притоком инвестиций со стороны частного сектора. В ходе моих встреч я неоднократно наблюдал примеры воодушевления, энтузиазма и уверенности среди ученых и инженеров, которые продвигают множество инновационных идей для внедрения систем термоядерного синтеза. В нынешних условиях, когда наиболее остро стоят две проблемы — изменение климата и энергетическая безопасность, — появление нового экологически чистого источника энергии будет принципиально значимым для их долгосрочного решения.

Кроме того, я отмечаю заинтересованность ключевых игроков в конструктивном сотрудничестве и обмене опытом, знаниями и ресурсами для решения остающихся вопросов и создания промышленной базы в интересах устойчивого развития термоядерной энергетики. Для содействия этому процессу важно, чтобы все заинтересованные стороны, участвующие в развитии термоядерной энергетики, разделяли общее видение и понимание пути, ведущего к промышленному освоению термоядерного синтеза. С учетом этих задач в настоящей публикации МАГАТЭ определен набор элементов, которые будут иметь ключевое значение для дальнейшего развития термоядерной энергетики. Они составляют всеобъемлющую «дорожную карту» и являются полезными ориентирами для ученых, инженеров, представителей регулирующих органов, предпринимателей и политиков во всем мире на пути к будущему, где центральное место в глобальном энергетическом ландшафте в краткосрочной и среднесрочной перспективе займет термоядерная энергия.



В публикации рассматриваются основные предпосылки, необходимые для воплощения этого видения на практике.

Структура документа построена вокруг шести ключевых элементов, каждый из которых охватывает важнейшие аспекты парадигмы термоядерной энергетики. К ним относятся приоритеты и контрольные точки исследований, разработок и демонстрации и этапы промышленного освоения технологий; управление ресурсами, рабочей силой и знаниями; ядерная безопасность, физическая безопасность и нераспространение; глобальное сотрудничество; роли заинтересованных сторон; а также взаимодействие с общественностью. Вместе эти элементы формируют основу согласованной стратегии, позволяющей преодолевать сложности и реализовывать возможности, изначально присутствующие на пути развития термоядерной энергетики.

МАГАТЭ признательно всем тем, кто внес свой вклад в настоящую публикацию, в том числе членам Международного совета по термоядерным исследованиям и другим международным экспертам и рецензентам, за их ценный вклад и целенаправленную работу для выпуска публикации в столь короткие сроки. МАГАТЭ сохраняет твердую приверженность развитию термоядерной энергетики и выступает за любые инициативы, которые приближают нас к осуществлению мечты о неисчерпаемом и чистом источнике энергии. Будем вместе осваивать новые возможности, которые открывает термоядерный синтез, и прокладывать путь к более благоприятному и устойчивому будущему для всех.

Рафаэль Мариано Гросси
Генеральный директор МАГАТЭ

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к освоению энергии термоядерного синтеза приобретает в современном мире все более выраженный характер, ведь термоядерная энергетика обещает стать неисчерпаемым, чистым и устойчивым источником для удовлетворения энергетических потребностей будущего. До недавнего времени вектор развития термоядерной энергетике в основном определялся национальными и международными программами, такими как проект ИТЭР. Однако произошел значительный сдвиг, обусловленный настоятельной необходимостью использовать чистые источники энергии для борьбы с изменением климата и обеспечения энергетической безопасности. Последние научные и технологические прорывы в области термоядерного синтеза в сочетании с притоком значительных инвестиций со стороны частного сектора стремительно меняют положение дел в термоядерной энергетике. Усилия государственного сектора на пути к практическому применению термоядерного синтеза объединяются с инициативами заметно выросшего частного сектора, который в настоящее время насчитывает более 40 активно развивающихся компаний и осваивает более чем 7 миллиардов долларов инвестиций, делая ставку на коммерциализацию этой технологии.

Несмотря на разнообразие технических подходов и механизмов финансирования для развития термоядерной энергетике, как государственный, так и частный сектор преследуют общую цель: превратить термоядерный синтез в экономически целесообразный и устойчивый источник энергии. Наличие этой общей цели подчеркивает важность расширения сотрудничества между правительствами и частными организациями, которое будет иметь решающее значение для ускорения наметившегося перехода от исследований к коммерциализации.

¹ По состоянию на июль 2024 года [1].

Хотя эти события вселяют оптимизм в отношении реализации практических шагов по использованию термоядерной энергии в ближайшем будущем, в отношении некоторых ведущихся в этой сфере исследований, разработок и демонстрации (ИРиД) все еще можно констатировать недостаточный прогресс. Кроме того, для успешного внедрения и распространения термоядерных технологий необходимо расширять промышленную базу, развивать глобальные цепочки поставок, подготавливать компетентные кадры, создавать прозрачные правовые и нормативные механизмы и обеспечивать общественную поддержку — а все это требует слаженных усилий многих заинтересованных сторон.

В таком быстро развивающемся секторе крайне важно добиться общего понимания ключевых аспектов, связанных с термоядерной энергией. Это понимание должно присутствовать во всех областях деятельности — от исследований и разработок до внедрения и промышленного применения — и закладывать основу для того, чтобы ориентироваться во всем многообразии сложностей и возможностей, определяющих современную картину термоядерной энергетики. В этой публикации представлен всеобъемлющий обзор шести ключевых элементов, необходимых для того, чтобы сформировать общее видение развития термоядерной энергетики, и тем самым способствовать выработке единого подхода к продвижению термоядерного синтеза как краеугольного камня будущих энергетических решений.

Шесть ключевых элементов деятельности в области термоядерного синтеза

Стр. 8

1.
ИССЛЕДОВАНИЯ,
РАЗРАБОТКИ И
ДЕМОНСТРАЦИЯ

2.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ

Стр. 14

Стр. 22

3.

ЯДЕРНАЯ И
ФИЗИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
И
НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ

4.

ГЛОБАЛЬНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Стр. 30

Стр. 38

5.

ЗАИНТЕРЕСОВАННЫЕ СТОРОНЫ

6.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С
ОБЩЕСТВЕННОСТЬЮ

Стр. 48

ГЛАВНАЯ ЦЕЛЬ

превратить
термоядерный
синтез в
экономически
перспективный
и устойчивый
источник энергии

1.

Приоритеты и контрольные точки **исследований, разработок и демонстрации** и этапы коммерциализации

Коммерциализация решений, использующих энергию термоядерного синтеза, требует дальнейшего прогресса в смежных научных и технологических областях. Для ускорения шагов по демонстрации и внедрению термоядерных установок, а также для развития цепочек поставок необходима постоянная поддержка соответствующих исследований и разработок.

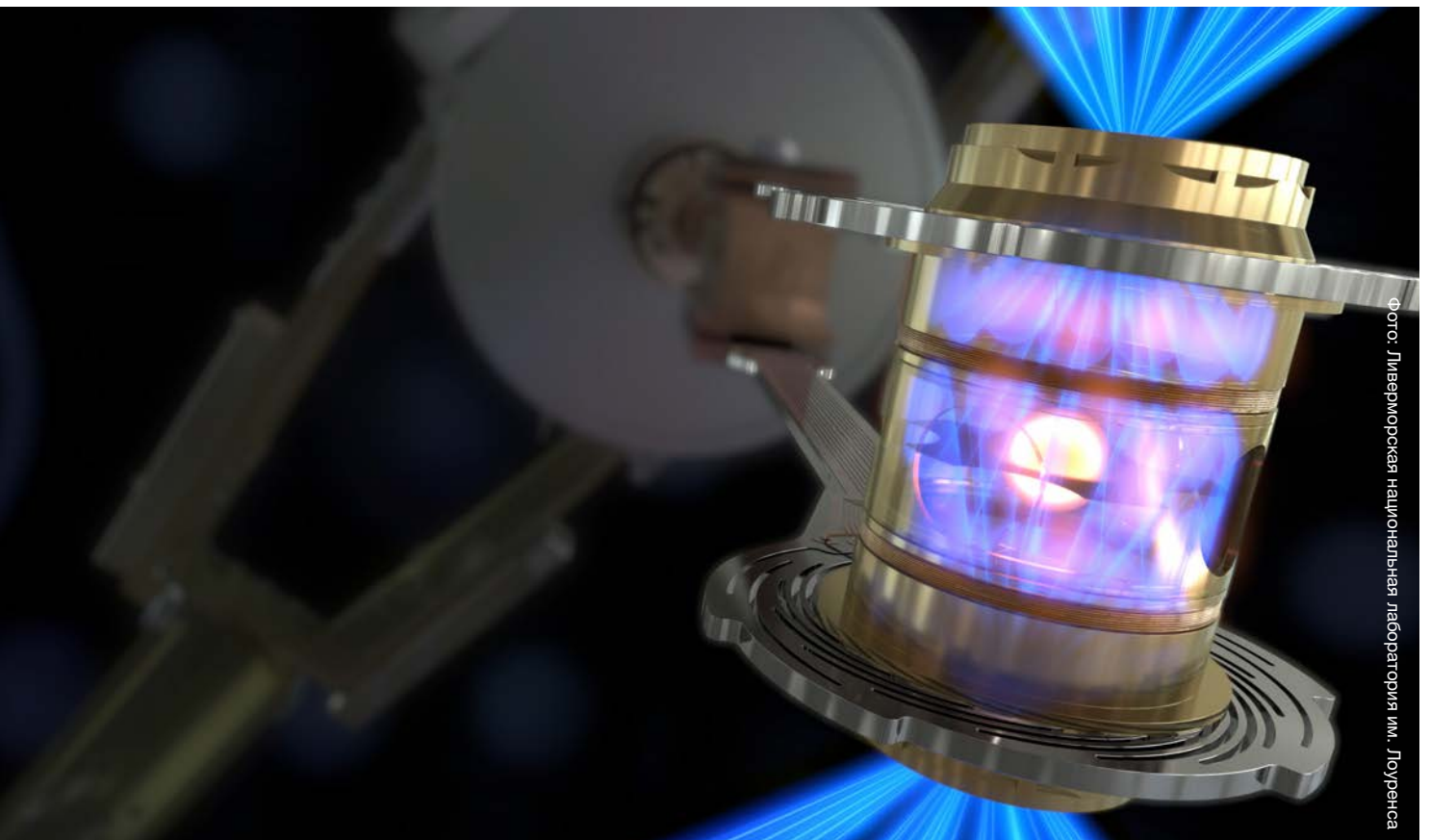


Приоритеты в области исследований, разработок и демонстрации и документирование проделанной работы

При выявлении областей, где достигнутый прогресс еще недостаточен, крайне важно разграничивать уровень готовности различных компонентов термоядерной установки и возможность их интеграции в единую систему, способную обеспечить коммерчески целесообразное производство энергии.

Ниже рассматриваются принципиально важные области исследований, разработок и демонстрации, для которых характерен более низкий уровень готовности технологий (УГТ)² с точки зрения возможности создания термоядерной установки. Хотя каждая из этих областей имеет ключевое значение, к числу наиболее насущных потребностей в контексте получения энергии термоядерного синтеза на основе дейтериево-тритиевой (D–T) реакции относится разработка материалов, устойчивых к экстремальным условиям, и совершенствование тритиевого топливного цикла.

² Уровни готовности технологий представляют собой стандартизированный и объективный метод оценки зрелости различных технологий и их компонентов.

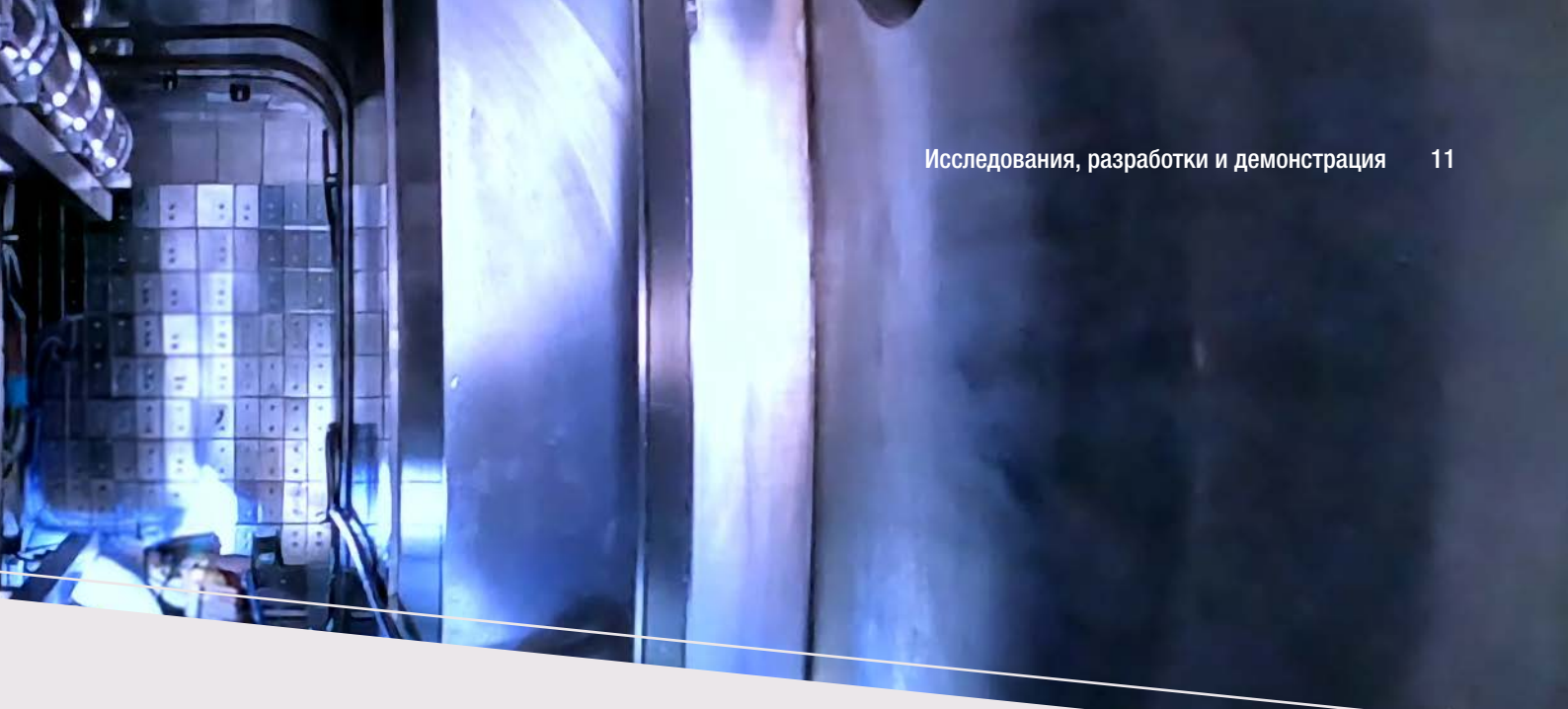


Материалы, устойчивые к экстремальным условиям

Интенсивный поток высокоэнергетических нейтронов и других частиц, образующихся в процессе термоядерного синтеза, создает экстремальные условия для конструкционных материалов. Первоочередной задачей для повышения коммерческой применимости технологий синтеза является поиск материалов, способных лучше противостоять таким условиям при сохранении структурной целостности и приемлемых уровней активации. Эти материалы также должны отвечать требованиям поддержания чистоты плазмы и быть совместимы со сложными тепловыми, радиационными и вакуумными условиями внутри термоядерной установки. Некоторые требования к конструкционным материалам могут быть смягчены благодаря применению таких инновационных концепций, как жидкие первые стенки. Кроме того, важно учитывать потенциальное воздействие этих экстремальных условий на разные другие материалы, в том числе используемые в модулях blankets, системах диагностики, системах нагрева, дистанционных манипуляторах и диверторах, а также учитывать ряд прочих свойств материалов, помимо механических характеристик.

Тритиевый топливный цикл

Основным видом топлива для термоядерных установок, в которых используется реакция D–T, является тритий — радиоактивный изотоп водорода. Однако тритий имеет относительно короткий период полураспада (12 лет) и практически не встречается в природе. Важное значение для запуска, а затем и поддержания термоядерной реакции на установках, использующих энергию дейтериево-тритиевого синтеза, имеет разработка эффективных методов воспроизводства и извлечения трития.



Управление процессами энерговыделения в плазме

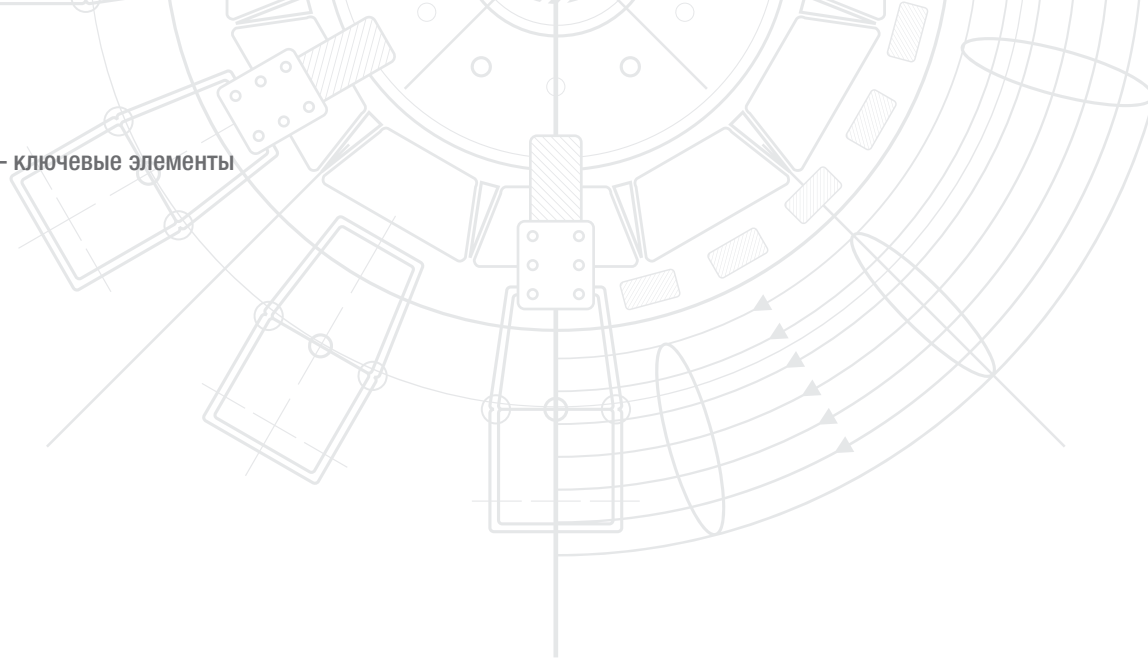
Одной из главных проблем термоядерных установок неизбежно становится управление процессами энерговыделения и выброса частиц из плазмы. В случае подходов, основанных на магнитном удержании плазмы, возникает дополнительная проблема, связанная с взаимодействием находящейся в устойчивом состоянии плазмы и материала. Формирующиеся внутри термоядерных установок экстремальные условия по плотности энерговыделения предполагают необходимость решения сложных инженерных задач, в частности, в области обращенных к плазме материалов, методов охлаждения и конструкции компонентов. Ключевым направлением экспериментальной отработки остается проведение исследований подходящих режимов плазмы.

Дистанционное манипулирование

Термоядерные установки предполагают экстремальные условия среды, где нет места человеку. В связи с этим для выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту могут требоваться дистанционные манипуляции. Для коммерческого применения термоядерной энергии необходимо продолжать усилия по разработке таких систем дистанционного манипулирования, в том числе с использованием перспективных роботизированных систем.

Отвод тепла

Для получения конкурентоспособной стоимости электроэнергии необходимы решения, обеспечивающие эффективный вывод тепловой составляющей энергии плазмы, образующейся в термоядерной установке, а соответствующие компоненты должны быть в достаточной степени доступными. Для концепций, в основе которых лежит паровой цикл, термодинамическая эффективность установки возрастает, если бланкет способен работать при более высоких температурах, для чего необходимы менее подверженные активации материалы.



Для большинства концепций освоения энергии синтеза применимы одни и те же аспекты ИРиД, однако требуется продолжать разработки и в ряде дополнительных областей, представляющих специфический интерес в контексте технологии удержания³ и выбора топлива⁴. После того как будет достигнут более высокий УГТ в обсуждаемых областях, для успешной коммерциализации термоядерного синтеза потребуется еще оптимизировать проектные решения и аттестовать используемые компоненты (например, радиационно-стойкие материалы, защищенные от радиации датчики) с учетом условий термоядерной установки, с самых ранних этапов принимая во расчет различные ограничения в плане безопасности и в экономическом плане. Это включает разработку комплексных решений, объединяющих в себе наработки из таких областей, как физика горячей плазмы, технология удержания, управление тепловыделением и экранирование.

Необходимы согласованные усилия по всем аспектам ИРиД и интеграции, о которых говорилось выше. Ускорить развитие термоядерной энергетики и проложить путь к ее более широкому освоению может использование последних достижений в области технологий — таких как высокопроизводительные вычисления, искусственный интеллект и перспективные технологии производства. Кроме того, для успешной коммерциализации термоядерной энергетики крайне важно создать необходимую инфраструктуру (включая соответствующие установки, системы и основы их организации), которая будет поддерживать весь жизненный цикл решений, построенных на использовании энергии термоядерного синтеза.

Наконец, по мере того, как технологии использования энергии синтеза будут продвигаться от стадии разработки к демонстрации и внедрению, важно, чтобы как существующие, так и новые заинтересованные стороны в секторе термоядерной энергетики должным образом документировали полученные результаты и распространяли соответствующую информацию. Важную роль здесь будет играть следование общепринятым методам работы, таким как применение процедур независимой экспертизы, обеспечение прозрачности в информировании о достигнутом прогрессе, защита интеллектуальной собственности, в применимых случаях, а также эффективное взаимодействие с правительствами, инвесторами и общественностью на основе налаживания стратегической коммуникации.

³ Например, в случае синтеза с инерционным удержанием плазмы к ключевым областям ИРиД относится также масштабирование мишеней и ускорителей-драйверов с учетом экономических соображений.

⁴ Выбор топлива определяется типом рассматриваемой реакции синтеза; например, дейтерий-тритий, дейтерий-дейтерий, дейтерий-гелий-3 или протон-бор-11.

Приоритеты и контрольные точки исследований, разработок и демонстраций для ускорения коммерциализации

Для оценки прогресса ИРиД в области термоядерной энергетики могут использоваться следующие показатели развития:

- демонстрация высокой эффективности и работы в непрерывном режиме (или работы в импульсном режиме с высокой частотой повторения импульсов в случае применения инерциального удержания и магнитного обжатия) при достижении условий, характеризующих взаимодействие плазмы и материалов, которые могут обеспечивать приемлемый срок службы внутрикорпусных компонентов.
- Для концепций на основе термоядерной реакции D–T:
 - достижение коэффициента размножения трития⁵ выше единицы, возможно, с использованием обогащения литием-6;
 - демонстрация эффективности извлечения и рециркуляции трития;
 - проработка соответствующих цепочек поставок для производства тритиевого топлива;
- способность показать чистый прирост энергии, который может быть снят с термоядерной установки.

Для коммерциализации термоядерной энергетики необходимо пройти следующие основные этапы:

- демонстрация одновременно топливной самодостаточности⁶ и чистого прироста энергии в отдельно взятой термоядерной установке;
- выбор и обустройство площадки термоядерной установки и получение лицензий/разрешений на строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации;
- разработка соответствующей стратегии и нормативных механизмов обращения с отходами;
- присоединение термоядерной установки к системе управления энергопотреблением или энергосети по конкурентоспособной цене.

⁵ Отношение общего количества наработанного трития к общему количеству израсходованного в термоядерной установке.

⁶ За счет самостоятельной наработки или подачи топлива извне.



2.

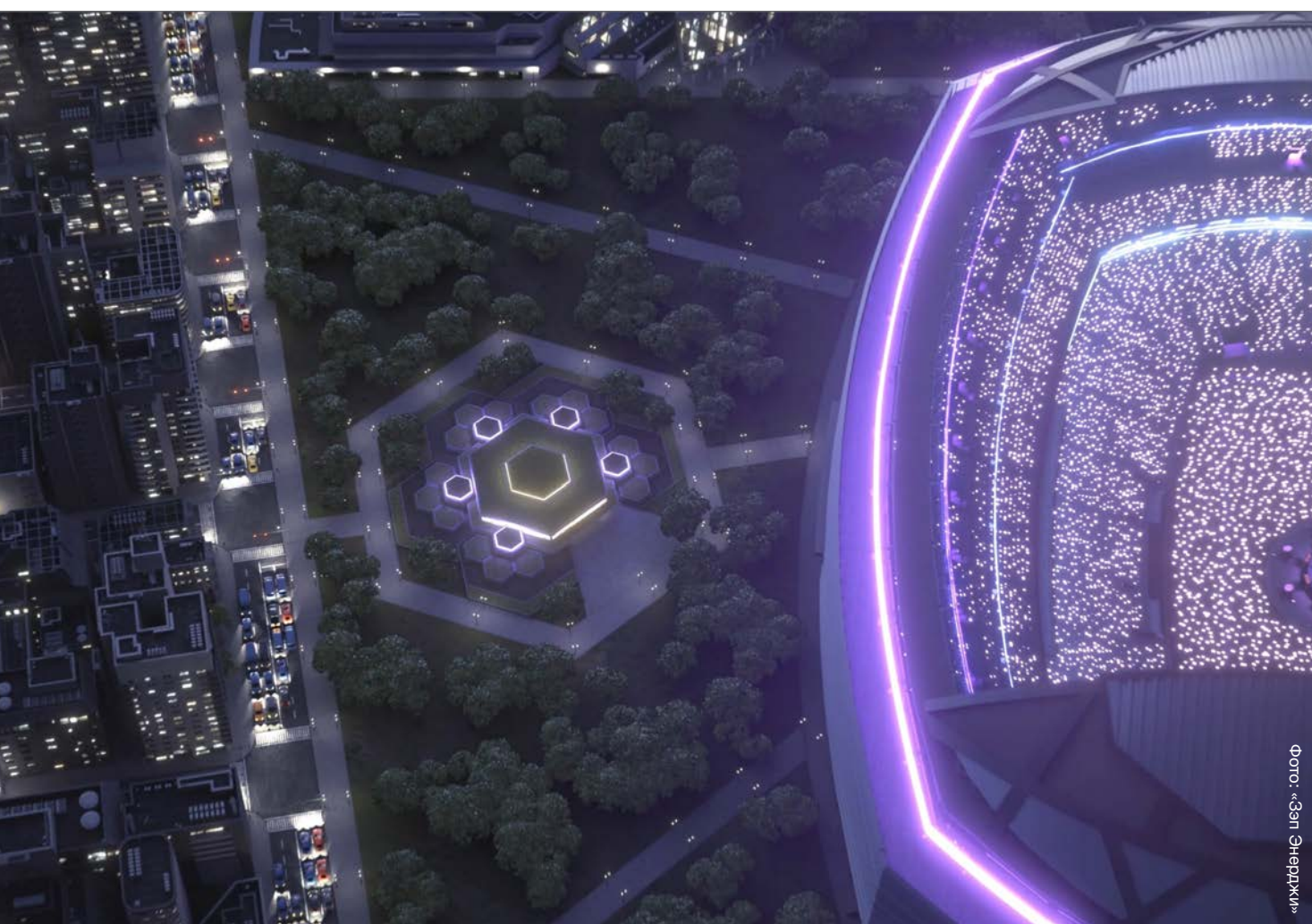
Управление ресурсами, персоналом и знаниями для **промышленного освоения** синтеза

Создание полноценной индустрии, способной раскрыть потенциал термоядерного синтеза, требует достаточных ресурсов, обеспечения множественных каналов денежных поступлений, подготовки компетентной рабочей силы, разработки эффективных стратегий управления знаниями, а также прозрачной нормативно-правовой базы и системы интеллектуальной собственности.



Финансовые ресурсы и механизмы финансирования

Нельзя недооценивать объем инвестиций, как государственных, так и частных, а также сроки, на протяжении которых необходимо будет поддерживать приток инвестиций. Это объясняется технической сложностью освоения термоядерных технологий, строго нормированными условиями, которые необходимо будет поддерживать на любой энергетической установке, а также масштабами научных и промышленных объектов, сооружение которых потребуются для организации исследований, разработок, испытаний, изготовления компонентов и, наконец, собственно производства энергии.



Государственным и частным ресурсам будут отводиться разные, но при этом взаимодополняющие роли. Инвестиции со стороны государственных структур будут иметь ключевое значение в контексте следующих направлений.

Финансирование исследований и ранних разработок

Освоение энергии термоядерного синтеза по-прежнему предполагает существенные усилия в области ИРиД. В областях ИРиД с низким показателем УГТ важную роль предстоит сыграть научно-исследовательским институтам и аналогичным государственным организациям, а дальнейшее развитие отрасли потребует постоянного финансирования таких институтов и их программ. Важными участниками на ранних стадиях разработки являются также частные структуры: хотя они и в меньшей степени вовлечены в фундаментальные исследования, но, как правило, имеют возможность привлекать государственную поддержку посредством различных механизмов, такие как гранты, налоговые льготы и государственно-частные партнерства. Государственная поддержка и финансирование имеет определяющее значение для ускорения ИРиД, особенно на текущем этапе развития этой зарождающейся отрасли. Однако фактическая стратегия такой поддержки должна выбираться с особой осторожностью, поскольку слишком затруднительные процедуры (например, фрагментация механизмов поддержки, размер отдельных грантов, договоренности, касающиеся уже созданных продуктов интеллектуальной собственности, учет и анализ затрат, сложность представления отчетности) могут сделать такие механизмы поддержки непривлекательными как для государственных, так и для частных структур.

Финансирование демонстрационных проектов

Для того чтобы заложить основы и поддержать развитие отрасли, не обойтись без проектов, которые служат для демонстрации технологий и/или выступают в качестве опытно-испытательных установок, но при этом могут нуждаться в государственном финансировании, если они не представляют собой коммерческой ценности. Такие проекты (например, **ИТЭР**) могут создавать условия для формирования целой системы поставок, поскольку государственные и частные компании конкурируют за участие в них и тем самым развивают свои компетенции и промышленную базу. Финансирование таких проектов должно поддерживаться даже при возникновении трудностей или задержек, причем такие проекты должны быть в достаточной степени актуальными с точки зрения коммерческого использования, продолжительными и многочисленными, чтобы создать условия для формирования и поддержания промышленной системы поставок.

ИТЭР — крупнейшая термоядерная экспериментальная установка, которая в настоящее время строится во Франции. Этот проект представляет собой совместное международное предприятие Китая, Европейского союза, Индии, Республики Корея, Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки и Японии. Цель проекта ИТЭР — продемонстрировать научную и технологическую осуществимость получения энергии по принципу термоядерного синтеза.

Поддержка опытно-промышленных установок и/или первых в своем роде проектов

Некоторые национальные стратегии развития термоядерного синтеза, в основе которых лежит сочетание государственной политики и коммерческой практики, предполагают, что демонстрацией и внедрением термоядерных установок в промышленных масштабах будут заниматься преимущественно частные, а не государственные структуры. Для достижения этой цели правительствам необходимо будет создать условия для перехода от государственного к частному сектору, используя соответствующие механизмы распределения рисков для установок на ранних стадиях промышленного внедрения (опытно-промышленные установки и/или первые в своем роде проекты), где соотношение риска и прибыли таково, что все равно не обойтись без определенной помощи со стороны государства, чтобы облегчить частному сектору задачу привлечения необходимого капитала. Эта помощь может принимать различные формы, как уже было продемонстрировано в других отраслях со сравнительно высокой степенью сложности, где за реализацию проектов отвечают либо государственные организации, либо организации частного сектора с опорой на механизмы распределения рисков⁷.

Финансирование (долевое и долговое) за счет частных инвестиций может охватывать следующие аспекты, но не ограничиваться ими:

- разработка и промышленное освоение технологии в рамках использования конкретных решений в области термоядерного синтеза и связанных с ними установок и компонентов;
- развитие промышленного потенциала в форме профессиональных знаний, процессов (например, производственных процессов) и методов, необходимых для воплощения таких решений на практике;
- конструирование испытательных стендов (например, для отработки топливного цикла) и опытных установок (например, пилотных, первых в своем роде и *n*-ых в своем роде).

⁷ Примерами таких механизмов распределения рисков являются, в частности, программы развития на основе контрольных этапов; контракты, предусматривающее возмещение разницы в ценах; либо контракты с использованием регулируемой базы активов.

Кадровые ресурсы

Для полноценной подготовки кадровых ресурсов, отвечающих требованиям коммерциализации термоядерной энергетики, необходим комплексный подход, включающий как государственные, так и частные национальные инициативы, в основу которых могут быть положены программы международного сотрудничества и обмена знаниями.

Учитывая ограниченность сообщества специалистов по термоядерному синтезу, необходимы согласованные усилия для привлечения, обучения, подготовки и повышения квалификации профессиональных кадров, представленных учеными, инженерами, руководителями проектов, операторами, техниками и сотрудниками регулирующих органов, которые будут способны решать разнообразные задачи, связанные с внедрением технологий термоядерного синтеза, с акцентом на развитие широкого спектра компетенций, выходящих за рамки текущих усилий по подготовке будущих исследовательских работников.

Формированию такого кадрового потенциала будет во многом способствовать тот факт, что термоядерная отрасль уже привлекает таланты, компетенции и опыт из других отраслей. Этот процесс можно ускорить с помощью целевых программ переподготовки. Однако нельзя недооценивать уровень конкуренции за талантливых научных и инженерных работников высокого класса между отраслями и государственными научно-исследовательскими учреждениями.

Необходимо уделять особое внимание подготовке специалистов с мышлением, ориентированным на проблематику отрасли, обладающих широкими техническими знаниями, способностью осваивать разные технические дисциплины и опыт на разных этапах жизненного цикла проекта. Это необходимо для того, чтобы избежать образования «разрывов» между специальностями или между этапами разработки, проектирования и внедрения, а также для того, чтобы поддержать отрасль в ее стремлении удовлетворить ожидаемые потребности, связанные с расширением и коммерциализацией этой технологической ниши. Кроме того, учитывая, что для эксплуатации термоядерных установок потребуется надежная система поставок, охватывающая как узкоспециализированные изделия для термоядерной технологии, так и компоненты, широко применяемые в других отраслях промышленности, поощрение таких междисциплинарных компетенций приобретает жизненно важное значение.

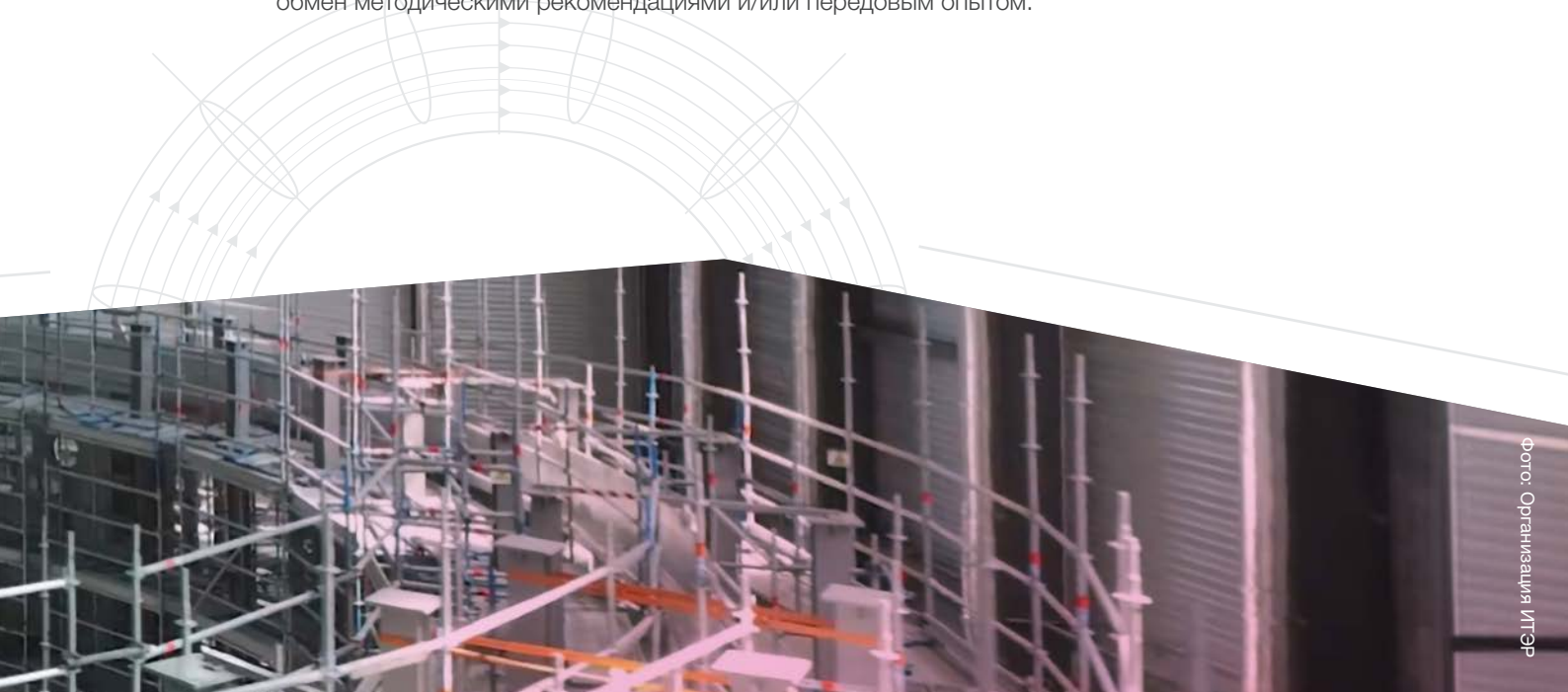


Управление знаниями

Развитие термоядерной отрасли и промышленное освоение термоядерной энергии требуют создания и широкого распространения профильных знаний, касающихся научных, инженерных, производственных и эксплуатационных аспектов. Сегодня значительная часть деятельности по развитию таких знаний и обмену ими приходится на проекты, финансируемые государством. Поэтому участникам проектов необходимо стремиться к тому, что в максимально возможной степени создавать, документировать и распространять такие знания (в рамках соответствующих протоколов). Участию государственного и частного секторов в процессах управления и обмена знаниями может способствовать проработка четких и надежных механизмов защиты интеллектуальной собственности. Важную роль могут также играть отраслевые форумы, которые создают условия для обмена информацией, имеющей важное значение с точки зрения таких аспектов, как техническая безопасность, физическая безопасность и высокие стандарты работы в интересах всеобщего блага.

Учитывая, что термоядерная энергетика является развивающейся отраслью, для которой также характерно использование нескольких разных технических подходов, важно, чтобы обмен знаниями происходил на уровне имеющих аналогичную сложность, но более зрелых отраслей, а также на уровне проектов, рассматривающих различные подходы к удержанию плазмы для получения энергии синтеза. В этой связи важную роль могут сыграть профессиональные объединения, отраслевые организации и программы обмена информацией между регулирующими органами.

Наконец, в значительной степени способствовать развитию отрасли может также приобретение и систематизация знаний в рамках национальных и международных норм, кодексов и стандартов, а также обмен методическими рекомендациями и/или передовым опытом.



Путь к промышленному освоению



Несмотря на то, что термоядерный синтез по-прежнему можно считать зарождающейся областью, которая является продуктом эволюции существующего энергетического сектора, вполне вероятно, что появятся крупные компании-интеграторы, предприятия второго эшелона, специализирующиеся на определенных системах или подсистемах термоядерной установки, и очень большое число малых и средних предприятий, обладающих конкретными правами интеллектуальной собственности на те или иные компоненты и детали. Для обеспечения динамичного развития сектора потребуются меры, которые позволят компаниям всех этих типов наращивать свои компетенции и опыт в сфере термоядерного синтеза.

Решающее значение для зарождения процветающей отрасли термоядерной энергетики имеет успешный переход от исследований и ранних разработок к применению технологий термоядерного синтеза в промышленном масштабе. Сложилось так, что роль де-факто якорных заказчиков⁸ традиционно выполняют крупномасштабные национальные и международные проекты, которые вносят значительный вклад в поддержание функционирования системы поставок и доступности людских ресурсов в сфере термоядерного синтеза. Для дальнейшего развития отрасли необходимо, чтобы государственный сектор продолжал играть активную роль в поддержании системы поставок за счет своих государственных программ, в том числе путем создания новых исследовательских центров, обеспечивая плавную передачу знаний и опыта, накопленных в ходе реализации государственных программ, предприятиям отрасли в рамках соответствующих механизмов взаимодействия. Эти государственные программы будут дополнять собой инвестиции со стороны частного сектора, которые могут охватывать направления деятельности, ранее уже упоминавшиеся на стр. 17. Кроме того, в любом случае потребуется создать ряд ключевых стимулирующих факторов, включая следующие.

⁸ Функции якорного заказчика подразумевают долгосрочное обязательство государственных структур обеспечивать стабильную доходную базу и снижать финансовые риски для частных компаний.

Прозрачная и стабильная нормативно-правовая база

Важным фактором, способствующим привлечению частного финансирования и разработке надежных планов развития, является ясность в отношении нормативно-правовой базы, включая формализацию процессов получения разрешений на выбор площадки, строительство и эксплуатацию.

Надежная система защиты интеллектуальной собственности

Для облегчения сотрудничества между сторонами в процессе перехода от исследований к коммерциализации технологии необходима надежная система защиты интеллектуальной собственности.

Технологии, актуальные как для термоядерной энергетики, так и для других рынков

Одной из главных проблем для создания термоядерной отрасли с опорой на частные инициативы является то, что с учетом временных рамок, обусловленных необходимостью развития технологий, инвесторам часто необходимы потоки денежных поступлений краткосрочного и среднесрочного характера. Они могут быть обеспечены за счет применения разработанных для термоядерного синтеза технологий на других рынках (например, инновационные материалы, робототехника, медицинские разработки). Соответствующие программы развития, будь то государственные или частные, могут составляться с учетом этой возможности.

Более широкая экосистема сотрудничества

За счет создания центров, объединяющих потенциал на местах (часто региональных, предусматривающих участие государства и местных органов самоуправления и общественных кругов), можно ускорить процессы создания и распространения знаний и разработки технологий, формируя условия для появления динамичной среды, в рамках которой множество организаций могут сотрудничать, разделять расходы на разработку, а также объединять имеющийся опыт и компетенции.

3.

Ядерная безопасность, физическая безопасность и нераспространение

Нормативное регулирование аспектов технической и физической безопасности термоядерных установок должно быть соразмерно представляемым ими рискам, учитывая такие специфические особенности, как отсутствие цепной реакции и возможность немедленной остановки. Не менее важно заложить в эту технологию низкий риск с точки зрения распространения, обеспечивая учет соответствующих требований еще на этапе проектирования и нормативный надзор по мере развития термоядерной энергетики.



Основы радиационной безопасности

Необходимым условием успешного внедрения термоядерной энергетики является соответствие проектов требованиям технической и физической безопасности. Подход к обеспечению безопасности для термоядерных установок должен соответствовать документу Серии норм безопасности МАГАТЭ № SF-1, «Основополагающие принципы безопасности» [2], который касается любых обстоятельств, связанных с радиационными рисками, включая использование в медицинской сфере, для генерации электроэнергии и в промышленности. Основополагающая цель, вокруг которой строятся эти принципы — это защита людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения.

Изложенные в SF-1 [2] основополагающие принципы безопасности применимы ко всем установкам и видам деятельности, используемым в мирных целях, в течение всего срока их эксплуатации, а также в отношении защитных мер, необходимых для снижения существующих радиационных рисков. К таким установкам и видам деятельности относятся любые места, где образуются, перерабатываются, используются, подвергаются физическому манипулированию, хранятся или захораниваются радиоактивные материалы в таких масштабах, при которых необходимо учитывать факторы защиты и безопасности [2]. Таким образом, эти принципы могут быть применимы к термоядерным установкам, где не только используются, но и образуются радиоактивные материалы в таких масштабах, при которых должны приниматься во внимание соображения безопасности.

В частях 1–7 [3–9] Общих требований безопасности МАГАТЭ рассматриваются такие вопросы, как анализ безопасности и нормативно-правовая база. Общие требования безопасности применимы ко всем возможным вариантам использования излучения, включая термоядерные установки.

Организациям, ответственным за оценку и контроль радиационной обстановки, необходимо оценивать и контролировать радиационные риски для людей и окружающей среды, возникающие в результате нормальной эксплуатации и инцидентов/аварий. Это относится ко всему жизненному циклу установки, включая проектирование, эксплуатацию, обращение с топливом и отходами, а также демонтаж/вывод из эксплуатации. Для обоснования безопасности потребуются результаты моделирования и диагностики. Крайне важно, чтобы меры безопасности продумывались с самого начала процесса проектирования всех соответствующих систем. Принимая во внимание новизну термоядерных установок, в анализе безопасности должны быть тщательно учтены неопределенности в характеристиках работы различных систем. В зависимости от особенностей технологии следует принимать в расчет взаимодействие разных материалов (например, лития, воды), образования радиоизотопов и энергий частиц, что может порождать различные опасные факторы. Проектировщикам термоядерных установок необходимо уделять должное внимание этим принципам для уменьшения опасностей и минимизации радиоактивных отходов в случаях, когда это практически осуществимо.

Подходы к нормативному регулированию термоядерной энергетики

Эксперименты по термоядерному синтезу уже лицензированы и используются в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в некоторых государствах — членах МАГАТЭ. Ожидается, что в ближайшие годы разработчики представят первые пилотные и демонстрационные проекты. Если эти проекты окажутся успешными, за ними может последовать широкое внедрение термоядерных установок в промышленных масштабах.

Что касается проектов с перспективами внедрения в промышленных масштабах, государства-члены в настоящее время оценивают подходы к нормативному регулированию термоядерных установок соразмерно представляемым ими рискам. В этих оценках учитываются присущие термоядерному синтезу особенности (например, отсутствие цепной реакции, возможность немедленной остановки при потере энергоснабжения), характеристики используемых радиоактивных материалов и аспекты обращения с радиоактивными материалами на площадке. Такой подход отражает дифференцированный подход МАГАТЭ к нормативному регулированию [10].

В государствах-членах уже существуют или разрабатываются требования и руководства, касающиеся термоядерных установок и безопасности обращения с радиоактивными отходами и учитывающие национальную нормативную базу и соответствующие риски. Эти требования и руководства охватывают соображения как технической, так и физической безопасности. МАГАТЭ может оказывать регулирующим органам поддержку в разработке требований безопасности и руководств по безопасности применительно к термоядерной энергетике, которые будут отвечать имеющимся технологиям и рискам и учитывать



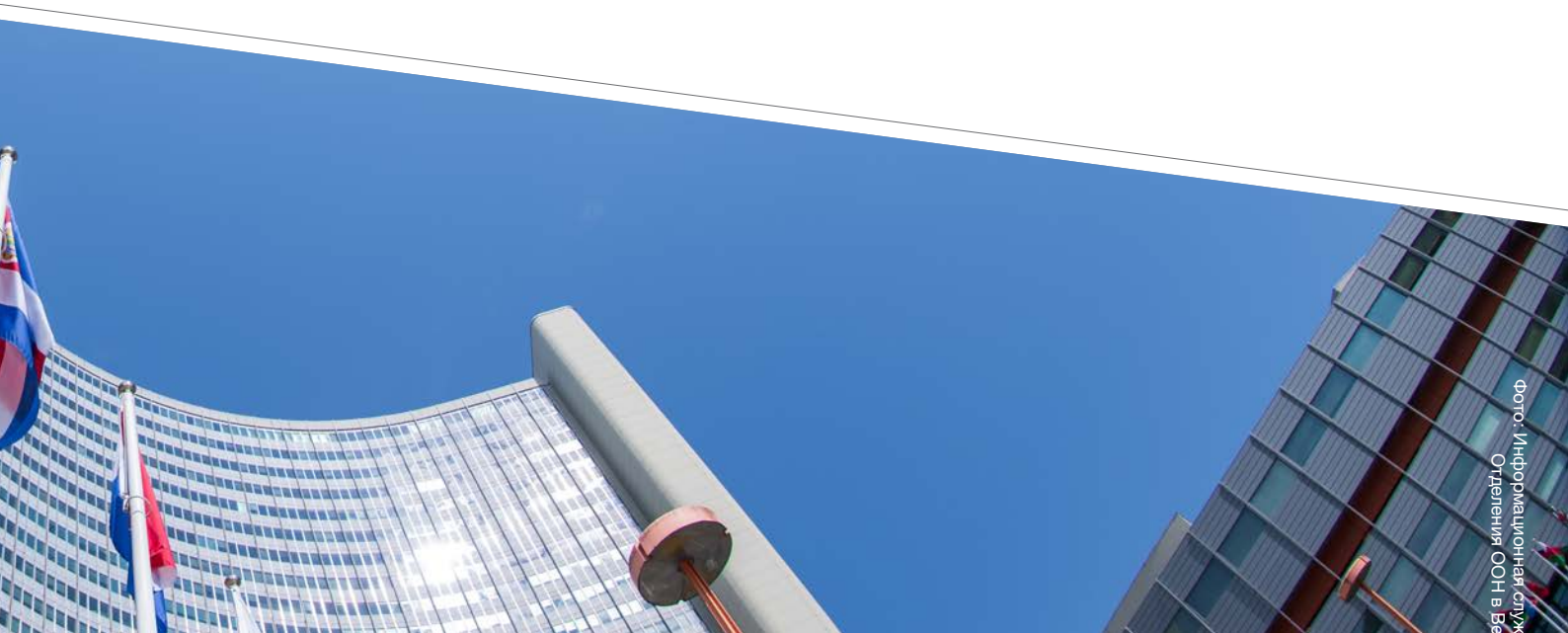
накопленный опыт по мере повышения степени проработанности проектов, как это происходило с режимами нормативного регулирования других технологий.

Несомненные преимущества дает сотрудничество между регулирующими органами. Благодаря общим подходам и последовательности принятия решений в разных государствах-членах, насколько это осуществимо, можно оптимизировать процесс подачи заявок, поскольку у разработчиков будет меньше поводов пересматривать свои заявки, технические решения и обоснования для разных юрисдикций.

Для всех регулирующих органов могут быть полезны общепринятые термины и общие позиции по техническим вопросам, даже если применяются разные подходы к нормативному регулированию. Продолжение сотрудничества в области регулирования применительно к возникающим техническим проблемам, а также вопросам физической безопасности, включая кибербезопасность, может создать условия для обмена знаниями и опытом, обеспечивая должный учет этих вопросов в нормативных документах по термоядерным установкам.

Такие международные организации, как МАГАТЭ, могут способствовать двусторонним и многосторонним обсуждениям между государствами-членами, разрабатывающими схожие нормативно-правовые механизмы. Координация в рамках МАГАТЭ для обеспечения последовательности и согласованности предпринимаемых шагов поможет всем государствам-членам в развитии их систем нормативного регулирования термоядерной энергетики. Решение о том, необходимо ли МАГАТЭ разрабатывать нормы безопасности в отношении термоядерного синтеза, вероятно, будет обоснованным только после того, как термоядерные технологии достигнут зрелости.

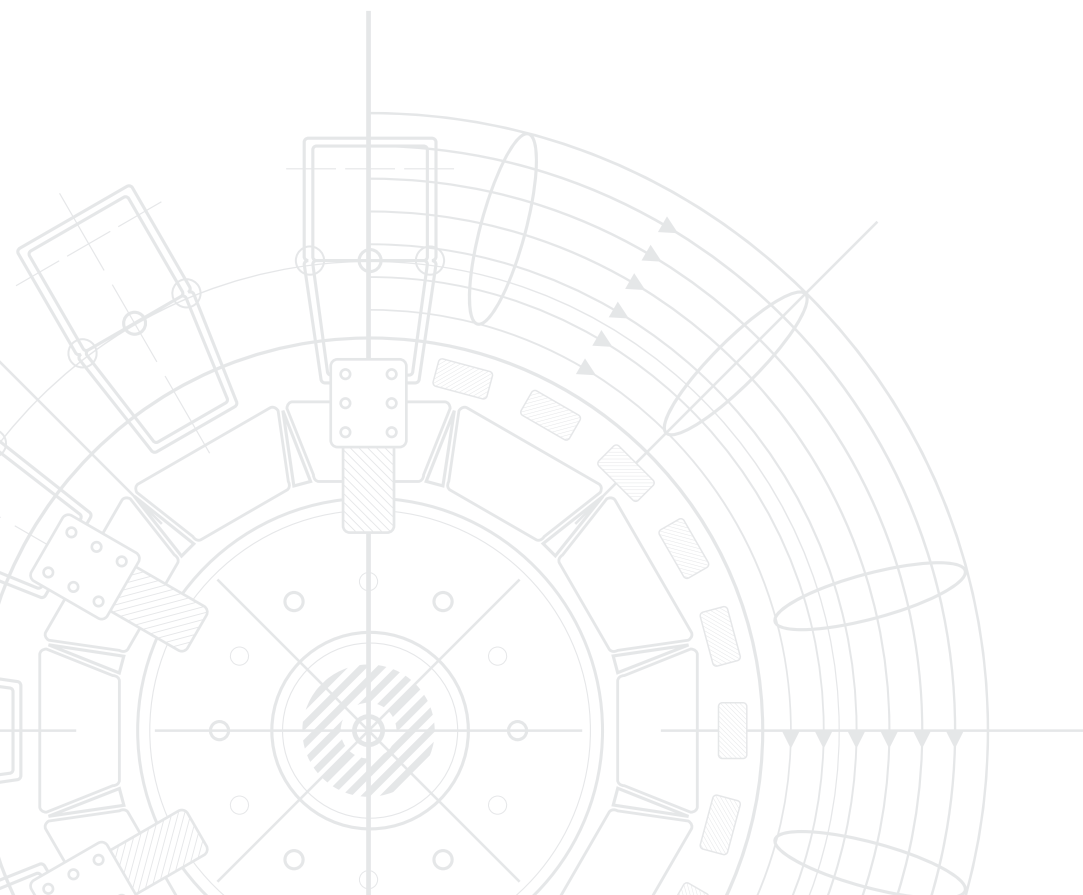
Определенную роль в разработке общих подходов к проектированию могут сыграть отраслевые организации по стандартизации, при этом использование таких подходов позволит упростить проведение рассмотрений регулирующими органами.



Переход к внедрению термоядерных установок в промышленных масштабах

На сегодняшний день опыт в области термоядерной энергии ограничивается научно-исследовательскими проектами. В будущем ожидается переход к производству энергии на основе термоядерного синтеза и широкой коммерциализации этой технологии. Это предполагает строительство термоядерных установок (прототипов, демонстрационных и/или промышленных установок).

По мере дальнейшего развития технологии термоядерного синтеза регулирующие органы могут вводить в свою практику определенные процедуры, соответствующие тому или иному этапу разработки. Например, для определения различных требований к лицензированию и надзорных мероприятий на каждом этапе может использоваться дифференцированный подход. К различиям, определяющим принятие решений в области безопасности, могут относиться более значительные объемы радиоактивных материалов; соображения перевозки, хранения и переработки топлива; категории и объемы подлежащих захоронению отходов; а также необходимость активного охлаждения некоторых компонентов. Регулирующим органам, вероятно, следует исходить из того, что их рассмотрения и процедуры будут иметь большую эффективность в отношении n -ых в своем роде установок. В частности, для обеспечения массового производства и широкого внедрения в сжатые сроки могут потребоваться новые парадигмы лицензирования.



Соображения, касающиеся прочих рисков

МАГАТЭ и многие регулирующие органы государств-членов, координирующие проекты в области термоядерной энергетики, уделяют основное внимание радиологической безопасности и физической безопасности. Термоядерные установки сопряжены с дополнительными потенциальными рисками промышленного и профессионального характера, учитывая наличие в системе высоких энергий и потенциально токсичных материалов. Подробное обсуждение этих рисков выходит за рамки настоящей публикации. Однако, в процессе взаимодействия с общественностью, представители сообщества термоядерной энергетики могут обсуждать пути выявления и смягчения таких рисков в интересах защиты работников и населения.



Соображения, касающиеся нераспространения

Термоядерные установки предназначены для использования в мирных целях. Поэтому многие из них проектируются таким образом, чтобы изначально ограничить неправомерное использование технологии (например, исходя из особенностей конструкции blankets или горячих камер, используемых в установке). Кроме того, разработчикам важно помнить о действующих режимах контроля за экспортом ядерных материалов, имеющих отношение к термоядерной энергетике, таких как тритий и литий-6, а также некоторых технологий, например, расчетных кодов. Предполагается, что за счет механизмов регулирующего надзора будет обеспечиваться приемлемо низкий риск распространения, связанный с термоядерными установками.

В отношении проектов термоядерных установок, которые не предполагают переработки, использования или производства ядерного материала⁹, МАГАТЭ в настоящее время не применяет никаких мер гарантий, кроме тех, которые необходимы для урегулирования, в применимых случаях, вопросов, касающихся точности и полноты представляемой государствами информации. Существующие международные соглашения о гарантиях применяются к проектам, которые предполагают переработку, использование или производство ядерного материала. По мере появления дополнительной информации о проектах термоядерных установок потребуется дальнейшее рассмотрение вопроса о том, будут ли гарантии МАГАТЭ применяться к термоядерным установкам в более широком контексте.

⁹ Гарантии МАГАТЭ применяются в отношении исходного или специального расщепляющегося материала, как это определено в [статье XX Устава МАГАТЭ](#).



4.

Глобальное сотрудничество

Развитие экосистемы термоядерной энергетики ускоряется благодаря международному сотрудничеству и растущей вовлеченности частного сектора. Глобальное сотрудничество крайне важно для работы в областях, которые требуют дальнейшего изучения, а также при создании международных логистических цепей и повышении квалификации работников, что необходимо для коммерциализации термоядерной энергетики.



Развитие экосистемы термоядерной энергетики

Развитие термоядерной энергетики изначально носит международный характер, поскольку для решения остающихся задач в области ИРиД необходимо сотрудничать на глобальном уровне, налаживать транснациональные логистические цепи и повышать квалификацию работников. Такое взаимодействие жизненно необходимо, чтобы за счет промышленного освоения технологий термоядерного синтеза обеспечить переход к устойчивой энергетике.

Последние шестьдесят лет развитие термоядерной отрасли шло благодаря совместным усилиям разных стран в области физики и технологий термоядерного синтеза. Лучшим примером такого взаимодействия является проект ИТЭР. Перевод фундаментальных совместных исследований на практические промышленные рельсы — это ключевой шаг на пути к вовлечению динамично развивающегося частного сектора в сложившуюся экосистему развития термоядерной энергетики.





Такие инициативы на национальном уровне, как немецкая программа **«Термоядерный синтез — 2040»**, японская **«Стратегия содействия инновациям в области термоядерного синтеза»**, стратегия Соединенного Королевства **«Навстречу термоядерной энергетике»** и принятая Соединенными Штатами **«Стратегия в области термоядерной энергетике — 2024»**, — это примеры политики, направленной на поддержку международного сотрудничества, государственных институтов и частных организаций на базе существующей инфраструктуры, а также успешной деятельности по налаживанию связей между различными отраслевыми предприятиями и разработчиками проектов в области термоядерного синтеза. Недавние примеры партнерства между государственным и частным секторами, в частности китайский консорциум **«Чайна фьюжн энерджи»**, итальянский **«Консорциум DTT»** и британская компания **«Юкей индастриал фьюжн солюшнз лтд.»**, демонстрируют потенциал, который есть у такого взаимодействия.

«Термоядерный синтез — 2040» («Fusion 2040») — это программа финансирования, созданная правительством Германии для разработки проекта термоядерной энергетической установки.

«Стратегия содействия инновациям в области термоядерного синтеза» («Fusion Energy Innovation Strategy») — это первая национальная стратегия Японии в области термоядерного синтеза, которая предусматривает создание промышленной группы «Джапэн фьюжн энерджи каунсил» («Japan Fusion Energy Council») с целью ускорения развития термоядерной энергетике.

«Навстречу термоядерной энергетике» («Towards Fusion Energy») — это стратегия Соединенного Королевства по созданию отрасли термоядерной энергетике. В нее включена программа по проектированию, созданию и строительству прототипа термоядерной электростанции STEP («сферический токамак для производства энергии»), а также новая программа НИОКР правительства Соединенного Королевства «Будущее за термоядерным синтезом» («Fusion Futures»).

«Стратегия в области термоядерной энергетике — 2024» («Fusion Energy Strategy 2024») — стратегия по термоядерной энергетике Соединенных Штатов Америки, направленная на ускорение создания промышленных термоядерных установок в сотрудничестве с частным сектором. В нее также включена рамочная программа по созданию планируемого государственно-частного консорциума в области термоядерной энергии.

«Чайна фьюжн энерджи консорциум» («China Fusion Energy Consortium») — это промышленный консорциум, основанный правительством Китая в целях развития и совершенствования технологии термоядерного синтеза.

«Консорциум DTT» («DTT Consortium») — это государственно-частное партнерство, задачей которого является строительство и эксплуатация экспериментальной термоядерной установки DTT («опытный реактор-токамак с дивертором»).

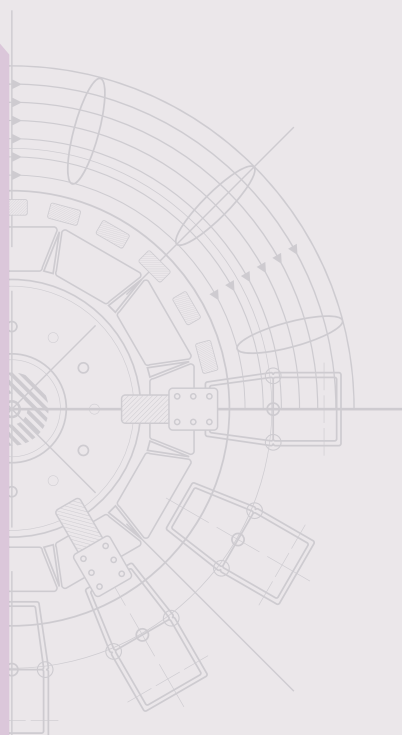
«Юкей индастриал фьюжн солюшнз лтд.» («UK Industrial Fusion Solutions Ltd») — это государственно-частное партнерство, целью которого является создание прототипа термоядерной электростанции с применением технологии STEP.



Кроме того, такие модели партнерства между государственным и частным секторами, как разработанная Соединенными Штатами Америки **«Поэтапная программа развития термоядерного синтеза»** и инициатива **INFUSE** — это примеры эффективного механизма расширения доступа термоядерной отрасли к техническим и финансовым ресурсам, а также стимулирования инвестиций, что ускоряет прогресс на пути от фундаментальных исследований к промышленному внедрению. Существование таких программ подчеркивает важность разделения возможных рисков, применения поэтапного подхода и получения государственной поддержки для создания динамично развивающейся и открытой экосистемы термоядерной энергетики в целях перехода от разработки технологий к их промышленному внедрению с упором на защиту интеллектуальной собственности и разнообразие технологических подходов.

«Поэтапная программа развития термоядерного синтеза» («Milestone-Based Fusion Development Program») — рассчитанная на пять лет программа Министерства энергетики США, направленная на содействие проектным работам и НИОКР применительно к частным экспериментальным термоядерным установкам.

INFUSE (Иновационная сеть по вопросам термоядерной энергетики, «Innovation Network for Fusion Energy») — это инициатива Министерства энергетики США, нацеленная на предоставление термоядерной отрасли доступа к технической и финансовой поддержке по линии бюджетных учреждений при министерстве.



Использование возможностей международного сотрудничества и государственно-частного партнерства

Глобальное сотрудничество в условиях здоровой конкуренции

Международное сотрудничество — это обязательное условие обмена знаниями в области физики и технологий термоядерного синтеза: оно способствует поиску новых направлений развития и ускоряет процесс промышленного внедрения этой технологии. Благодаря взаимодействию на международном уровне появляется возможность накапливать экспертные знания и совместно нести расходы на проекты ИРИД, оказывать взаимную поддержку в целях ускорения прогресса путем обмена информацией и знаниями, а также помогать странам создавать профильную инфраструктуру. Потребность во времени и ресурсах растет пропорционально повышению уровня технической сложности задач в области ИРИД, что подчеркивает необходимость сотрудничества на международном уровне для скорейшего достижения цели — промышленного внедрения и коммерциализации этой технологии на основе распределения рисков и инвестиций. В этой связи в качестве примера можно привести проект ИТЭР, который включает этапы проектирования, НИОКР и строительства. Экосистемы, содействующие здоровой конкуренции между различными подходами к развитию термоядерной энергетики, являются основой для параллельной реализации стратегий государственного и частного сектора в контексте глобального сотрудничества.

Эффективное использование капиталоемких объектов

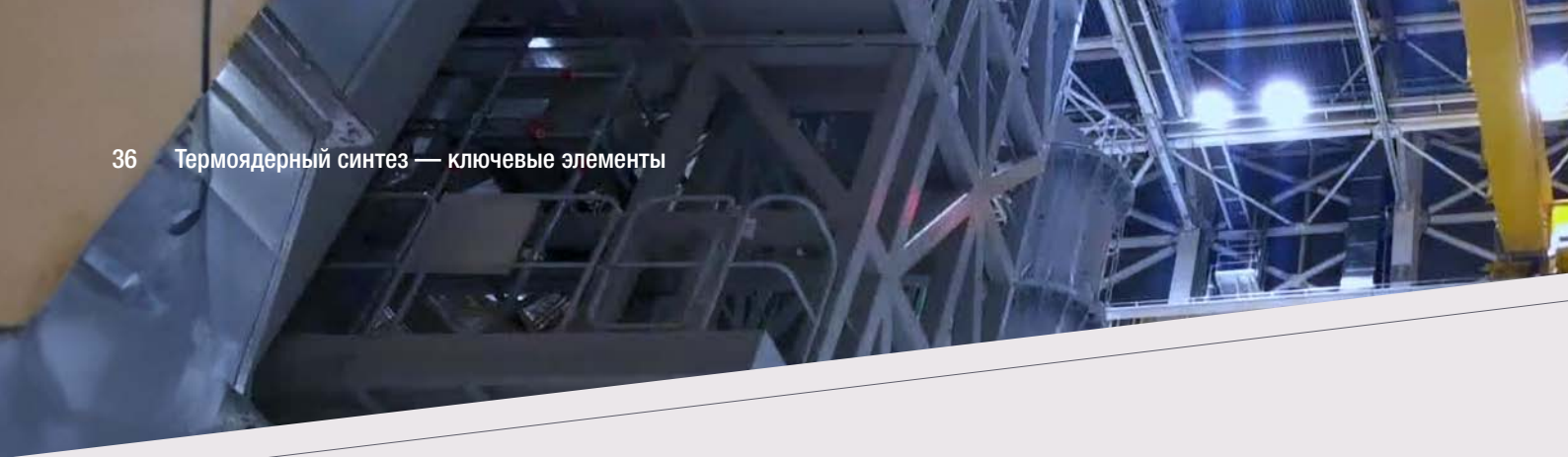
Во многих странах для развития термоядерной энергетики по линии национальных программ используется уже существующая инфраструктура НИОКР. Она включает экспериментальные установки, системы регенерации топлива, системы хранения, установки, оснащенные контурами теплоносителей на основе жидких металлов, а также облучательные, испытательные и производственные установки. Из-за высокой капиталоемкости строительство испытательных установок будет недоступно для стран, только начинающих реализацию программ развития термоядерной энергетики. Дополнительно ускорить внедрение термоядерных установок и избежать дублирования усилий поможет совместное использование инфраструктуры в разных странах мира, а также вовлечение более широких отраслевых кругов, представленных частным сектором. Распределение расходов между двумя или более странами позволит избежать дублирования инфраструктуры, что будет выгодно как для участвующих государств, так и для отрасли в целом. Для запуска подобных механизмов могут использоваться взаимно согласованные соглашения о сотрудничестве.

Совместное использование и ведение баз данных

Важно, чтобы отраслевое сообщество признало насущную необходимость более широкого доступа к научным данным для исследователей, директивных органов и общественности, что будет способствовать повышению прозрачности и воспроизводимости результатов исследований, а также обмену знаниями на международном уровне. Крайне важно создать централизованную базу данных для групп, занимающихся НИОКР в области физики и технологий термоядерного синтеза. Кроме того, благодаря такой платформе все заинтересованные стороны смогли бы получить доступ к данным в различных форматах и к информации о прикладных направлениях применения.

Обмен персоналом, развитие кадрового потенциала

Среди преимуществ международного сотрудничества — совместное использование ресурсов и богатого интеллектуального потенциала, представленного сообществом специалистов по термоядерному синтезу. Страны могут ускорить темпы своего технологического развития и продвинуться в реализации национальных программ путем укрепления партнерских отношений с другими странами, которые накопили больше опыта и достигли большего прогресса в этой области. Кроме того, благодаря расширению сотрудничества повышается разнообразие и увеличивается кадровый резерв специалистов, которые в будущем могут стать ведущими учеными в этой отрасли. При помощи программ обмена кадрами стороны, занимающиеся совместными исследованиями конкретных направлений в области термоядерного синтеза, получают доступ к инфраструктуре друг друга при условии предоставления необходимых стимулов и эффективного управления правами интеллектуальной собственности. В частности, по линии таких программ можно на взаимовыгодной основе организовать обучение персонала, отвечающего за эксплуатацию установок.



Валидация используемых при проектировании кодов

Важную роль в процессе проектирования и анализа безопасности играют расчетные коды и аналитические методы. Специалисты по проектированию в сфере термоядерного синтеза могут совместно формулировать принципы, которым компаниям-разработчикам необходимо следовать, чтобы соблюдать нормативные требования. Благодаря механизмам международного сотрудничества можно организовать обмен базами данных и кодами для обеспечения их валидации и верификации.

Сотрудничество в области нормативного регулирования

По мере своего успешного развития технологии термоядерной энергетики будут применяться не в отдельных странах, а во всем мире. Их внедрению и широкому использованию будут способствовать соответствующие согласованные на международном уровне механизмы регулирования, учитывающие связанные с термоядерными установками риски. Через международное сотрудничество открывается путь к совершенствованию механизмов регулирующего контроля и закреплению практики регулирования.

Создание надежных логистических цепей и обеспечение доступности основных материалов

По мере перехода стран мира на экологически чистые энергетические технологии экспоненциально будет расти потребность в основных ресурсах (в частности, в дейтерии, тритии, гелии, конструкционных материалах, литии, бериллии, вольфраме, меди, композитных материалах на основе карбида кремния), необходимых для повсеместного применения таких устойчивых технологий. Во всем мире обострится конкуренция за ресурсы, необходимые для строительства и эксплуатации термоядерных установок. В этой связи необходимо рассмотреть следующие ключевые вопросы: а) как можно нарастить производство для удовлетворения растущего спроса и б) откуда можно поставлять основные материалы. Доступные в рамках сообщества термоядерного синтеза механизмы сотрудничества позволяют заинтересованным сторонам совместно определять приоритетные направления в области НИОКР в рамках логистической цепи. Такой упреждающий подход не только способствует инновациям, но также смягчает влияние фактора доступности материалов на достижение поставленных экспертами целей, прокладывая путь к более эффективному и устойчивому освоению энергии термоядерного синтеза. Тесное сотрудничество между профильными специалистами является залогом достижения поставленных целей на взаимовыгодной основе и обеспечения бесперебойных поставок основных материалов, что является важным фактором безопасного и надежного функционирования энергосистем.

5.

Роли заинтересованных сторон

Чтобы ускорить внедрение и распространение технологий термоядерного синтеза, национальным правительствам, регулирующим органам, исследовательским институтам, научному сообществу, частным компаниям, международным и некоммерческим организациям необходимо действовать согласованно.





Национальные правительства

Учитывая значительные ресурсы, необходимые для демонстрации и строительства термоядерных установок, а также центральную роль, которая может быть отведена энергии термоядерного синтеза в экологически чистых энергетических системах, роль ключевых действующих лиц и заинтересованных сторон неизбежно возьмут на себя национальные правительства. В данной связи их участие может выражаться в реализации следующих мер.

Публикация национальной политики и дорожной карты создания термоядерной отрасли

Меры, принимаемые национальными правительствами, должны быть хорошо понятны всем заинтересованным сторонам, согласованы с различными исполнительными органами и должны последовательно выполняться, но прежде всего они должны быть ориентированы на реализацию четко обозначенной общей цели и плана. Многие страны разрабатывают соответствующие национальные стратегии и дорожные карты, в которых сформулированы их цели в области энергии термоядерного синтеза, а также указаны конкретные задачи, сроки и меры. Крайне важно, чтобы в этих регулятивных документах учитывался значительный вклад, который использование энергии термоядерного синтеза может внести в борьбу с изменением климата и укрепление энергетической безопасности, а также основные предпосылки, механизмы взаимодействия, отношения взаимозависимости, в частности инструменты финансирования и субсидирования, задача которых — содействовать выводу технологий термоядерной энергетики на рынки и повышению их конкурентоспособности. Такие стратегии могут охватывать и другие этапы, помимо первоначальных шагов по освоению конкретной технологии, и включать в себя подробную информацию о мерах по ее внедрению в промышленных масштабах в разумные сроки.

Роль правительства и результаты, ожидаемые им от других заинтересованных сторон

Национальные правительства будут принимать жизненно важные решения касательно инициатив, финансируемых или контролируемых ими посредством государственных компаний, а также в том случае, если в рамках сотрудничества с частным сектором, который обеспечивает инвестиции и получение желаемых результатов, они выступают в качестве посредника и связующего звена. Разграничение этих функций и конкретные меры, которые они предполагают, а также ожидаемые результаты и правила в отношении участия частного сектора должны быть четко определены и носить прозрачный характер. Эти элементы представляют собой неотъемлемую часть национальной политики.

Создание правовой и нормативной базы

Ключевая задача национальных правительств — это своевременное создание соответствующей правовой и нормативной базы. Не менее важно установить критерии для выбора площадки и согласования реализации проекта. Такая база необходима, чтобы обеспечить развитие технологии в соответствии с основными требованиями, в частности, касающимися ядерной безопасности, физической безопасности и нераспространения. Кроме того, это даст возможность уже на раннем этапе представлять обоснованные проекты и сметы расходов, а также убедить инвесторов, что факторы риска, касающиеся правовых и нормативных аспектов, четко определены, просчитаны и контролируются.

Подготовка общественного обсуждения на национальном и местном уровнях при помощи фактической информации и прагматического подхода

Социальная приемлемость — это важный фактор, обуславливающий возможность развития и внедрения новых технологий. Поэтому национальные правительства могут вносить вклад во взаимодействие с населением и налаживание информационной работы, содействуя открытому и основанному на научных данных диалогу о преимуществах термоядерных технологий, их вкладе в национальную энергетику и экономику, а также объемах и сроках предоставления необходимых инвестиций.

Регулирующие органы

Регулирующие органы — это одновременно и ключевые действующие лица, и заинтересованные стороны в процессе создания термоядерной отрасли. По мере развития соответствующих технологий им будет необходимо совершенствовать собственные навыки и компетенции, в том числе в рамках сотрудничества с представителями отрасли и исследовательскими институтами.

Взаимодействие между национальными регулирующими органами вносит важный вклад в обмен знаниями, накопленными в разных юрисдикциях, поддержку недавно созданных регулирующих органов на межгосударственном уровне, а также ускорение согласования подходов к нормативному регулированию. Все это — неотъемлемая часть становления отрасли, которая будет развиваться в международных масштабах и занимать значительную долю рынка.



Исследовательские институты и научные круги

По сути дела, научные исследования в области термоядерного синтеза должны способствовать совершению открытий. В этом контексте главную роль играют исследовательские институты и научные круги (включая университеты и высшие технические учебные заведения), как государственные, так и частные, которые реализуют программы исследований в целях повышения УГТ и потенциала коммерциализации ключевых базовых технологий до того момента, как их продвижением может заняться частный сектор. Такую деятельность и в целом сотрудничество с частным сектором (в частности, предоставление доступа к исследовательским установкам) необходимо поощрять и направлять на развитие технологий, которые в конечном итоге могут быть коммерциализованы. Сотрудничество между частными и государственными организациями должно иметь под собой надежную основу, обеспечивающую обмен знаниями, создание и защиту интеллектуальной собственности, а также быть ориентировано на программы междисциплинарных исследований.

Исследовательские институты и научные круги также вносят значительный вклад в организацию обучения и развитие компетенций — как самостоятельно, так и в рамках партнерских программ развития людских ресурсов. Это будет способствовать удержанию персонала и созданию будущего кадрового задела, а также приобретению наиболее востребованных знаний в области физики, без которых невозможно создание термоядерных установок. Представители исследовательских и научных кругов могут также сотрудничать с представителями отрасли и регулирующими органами, реализуя совместные программы повышения квалификации. Кроме того, они могут оказывать непосредственную техническую поддержку регулирующим органам в виде предоставления актуальной информации, экспертных услуг и доступа к инфраструктуре.

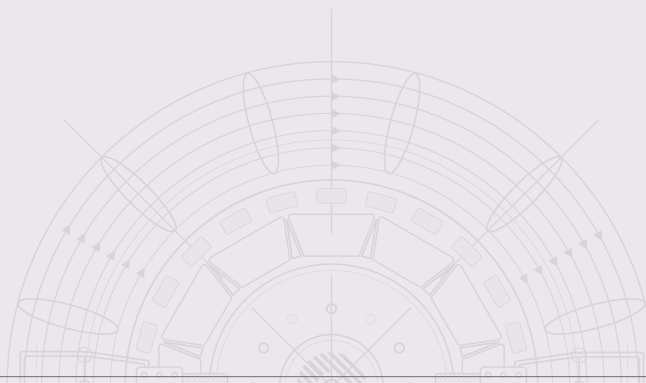
Наконец, исследовательские институты и научные круги также могут вносить вклад в развитие отрасли и формирование ее позитивного образа в сознании общественности.



Компании — поставщики технических решений для термоядерного синтеза

Важное место в развитии термоядерной отрасли занимают компании — поставщики технических решений для термоядерного синтеза. Эти организации используют результаты исследований и ранние разработки для создания промышленных продуктов, которые готовы к продаже, строительству, вводу в эксплуатацию и эксплуатации. По мере развития отрасли появится целый ряд компаний, которые возьмут на себя различные функции в области проектирования, строительства, ввода в эксплуатацию и эксплуатации генерирующих мощностей. На этой ранней стадии разграничение конкретных обязанностей компаний — поставщиков основных технических решений и других поставщиков может быть не так очевидно.

Появление частных компаний — поставщиков решений и привлечение ими инвестиций отражает потенциальный интерес к этому рынку, что крайне важно в контексте поддержания и мотивации растущего международного внимания к развитию, демонстрации и внедрению технологий термоядерного синтеза в приемлемые сроки. На сегодняшний день в мире существует более 40 таких частных компаний, специализирующихся на проблеме термоядерного синтеза, и инвестиции в них составляют более 7 млрд долл. США. Они занимаются разработкой целого ряда технологий, связанных с концепциями магнитного удержания¹⁰, инерциального удержания¹¹ и магнитно-инерциального обжатия¹². Кроме того, такие компании изучают различные композиции термоядерного топлива, включая варианты «дейтерий-третий», «дейтерий-дейтерий», «дейтерий-гелий-3» и «протон-бор-11». Хотя каждый из конкретных подходов к техническому решению проблемы синтеза предполагает разные задачи с точки зрения НИОКР, существует ряд направлений НИОКР, которые могут представлять интерес для большинства частных компаний в этой отрасли, в частности радиационно-устойчивые материалы первой стенки и разработка технологии blankets.



¹⁰ Технологии магнитного удержания лежат в основе таких концепций, как токамак, сферический токамак, стелларатор и гелиотрон, конфигурация с обращенным полем, пробкотрон, левитирующий диполь, системы на основе антипробкотрона и электростатических ловушек смешанного типа.

¹¹ Технологии инерциального удержания включают системы газодинамического и лазерного термоядерного синтеза.

¹² К технологиям магнитно-инерциального обжатия относятся, в частности, жидкостное сжатие, конфигурация с обращенным полем, зета-пинч, плазменный инжектор и системы инерциального термоядерного синтеза с намагниченным лайнером.

Логистические цепи

Помимо наличия собственно поставщиков решений для термоядерного синтеза, для планирования, проектирования, сооружения, ввода в эксплуатацию и эксплуатации термоядерной установки необходимым условием является наличие надежных систем поставок, охватывающих разные технические области. Хотя некоторые из этих областей относятся исключительно к термоядерному синтезу, многие пересекаются с другими отраслями, в частности с ядерной энергетикой, нефтегазовой промышленностью, аэрокосмической и космической отраслью. Такое пересечение создает конкуренцию за квалифицированных работников и ресурсы, поскольку в этих сферах требуются аналогичные навыки и технологические возможности. В список потенциальных участников логистической цепи в сфере термоядерного синтеза входят ключевые поставщики материалов и оборудования, производители компонентов, компании, занимающиеся проектированием станций, компании — исполнители общестроительных работ, а также компании, предоставляющие специализированные и неспециализированные услуги. Учитывая масштабы и сложность такой логистической цепи, она, скорее всего, будет носить международный характер.

Конкуренция за рабочую силу — важнейший фактор, который может повлиять на развитие термоядерной отрасли. По мере увеличения числа точек пересечения с другими отраслями, где наблюдается повышенный спрос на квалифицированную рабочую силу, основной задачей будет становиться найм и удержание сотрудников. Ее решение потребует стратегического планирования и налаживания взаимодействия с другими отраслями — это необходимо, чтобы обеспечить термоядерную отрасль кадрами, обладающими необходимыми навыками и знаниями.



Международные организации

Важнейшую роль в развитии термоядерной энергетики играют международные организации. Их участие распространяется на следующие ключевые области.

- Международные организации могут оказывать помощь в создании основной инфраструктуры для НИОКР в области термоядерной энергии, включая исследовательские установки, а также будущей инфраструктуры, необходимой для термоядерных установок промышленного масштаба. Эти организации часто содействуют предоставлению необходимого финансирования и ресурсов для проектов ИРиД в области термоядерной энергетики. С учетом высокой стоимости и длительных сроков разработки технологий термоядерного синтеза сотрудничество на международном уровне позволяет объединять ресурсы нескольких стран и таким образом делает возможной реализацию амбициозных проектов.
- Международные организации налаживают взаимодействие между странами, учеными и исследователями, обеспечивая обмен знаниями, опытом и результатами исследований. Благодаря таким совместным усилиям становится проще ликвидировать пробелы в знаниях, ускорять развитие технологий и более эффективно решать технические проблемы. Кроме того, широкое участие международных организаций в информационно-просветительской и образовательной деятельности будет способствовать повышению осведомленности и накоплению профильных знаний. Это поможет проектам в области термоядерной энергетики заручиться общественной поддержкой.
- Такие организации могут давать рекомендации относительно стратегических мер в поддержку развития, внедрения и распространения термоядерных технологий. В частности, эти стратегии могут касаться международного сотрудничества, механизмов финансирования и стимулирования ИРиД.

Некоммерческие организации

В контексте развития и внедрения термоядерных технологий различные функции, связанные с изучением общественных интересов и формированием общественного мнения, могут взять на себя некоммерческие организации. В дополнение к информационно-разъяснительной работе на общие темы некоммерческие организации могут вносить важный вклад в проведение дискуссий на международном, национальном и местном уровнях по вопросам изменения климата, правовой базы в энергетической отрасли и воздействия на окружающую среду, а также играть роль выразителя мнений различных групп и сообществ.

Координирующую роль берут на себя отраслевые организации, которые дают частным компаниям возможность обмениваться знаниями в интересах выработки общих стандартов работы и при необходимости выступают в качестве рупора правительств и регулирующих органов по ключевым вопросам. Кроме того, отраслевые организации могут доводить фактические и научные данные и актуальную информацию до сведения ключевых заинтересованных лиц, включая правительства, регулирующие органы и общественность.



6.

Взаимодействие с общественностью, информационно- просветительская работа и коммуникация

Чтобы заручиться общественной поддержкой инициатив по развитию термоядерной энергетики, необходимо эффективное информирование о потенциале этой отрасли как долгосрочного решения проблемы изменения климата и обеспечения энергетической безопасности.



Эффективное сотрудничество на основе диалога

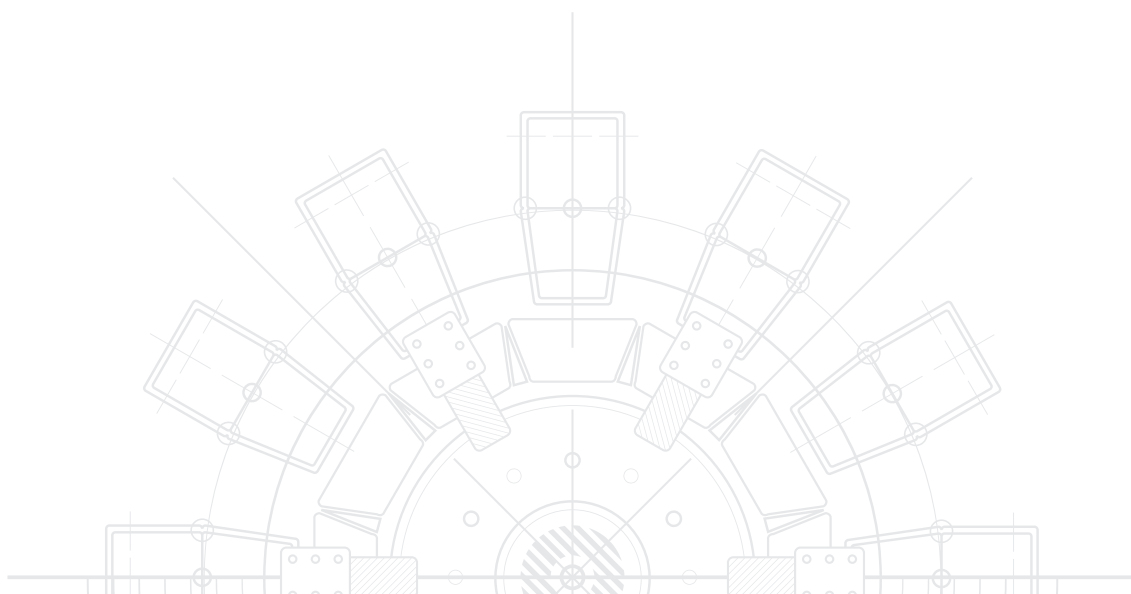
Наиболее эффективный инструмент, позволяющий заручиться общественной поддержкой термоядерной энергетики — это двустороннее взаимодействие. На его основе разработчики, правительства и другие заинтересованные стороны смогут лучше понять и учесть потребности, интересы и временные ожидания местных жителей, а также получить обратную связь по таким вопросам, как обеспечение энергетической и экологической справедливости и воздействие на окружающую среду. Кроме того, общественность сможет получить представление о радиационных рисках, применяемых технических решениях и реалистичных сроках их реализации на практике. При проведении таких дискуссий необходимо учитывать потребности и интересы аудитории, а также привлекать заслуживающих доверия и искренне заинтересованных экспертов, включая представителей правительства, отрасли и регулирующих органов. Поддержание диалога позволит учитывать волнующие общественность вопросы еще на ранних этапах, что будет содействовать формированию у нее позитивного восприятия. Если у аудитории нет возможности обратной связи, те или иные заявления, сделанные постфактум с целью лишь информирования или предоставления комментариев, могут выглядеть неискренними.

За последние годы была проделана большая работа в области применения двусторонней коммуникации для обеспечения положительного восприятия и даже энтузиазма со стороны общественности [11–13]. Благодаря таким усилиям заинтересованные стороны в области термоядерного синтеза могут изучать и применять эффективные методы, используемые в других отраслях, включая концепцию «общественного одобрения» [14], реализуемую в горнодобывающей отрасли или в сфере биомедицинских технологий; «биоэтический анализ» [15–17] в сфере инновационных биомедицинских технологий; «ответственный подход к исследованиям и инновациям» [18–20], в рамках которого на ранних стадиях проектирования учитывается мнение общественности, а также принципы «совместной разработки» [21], предполагающие коллективный вклад общественности и технических экспертов в развитие той или иной технологии.



В рамках всех этих подходов необходимо стремиться к тому, чтобы обсуждение вопросов в области термоядерной энергетики — касающихся развития и перспектив коммерциализации технологий термоядерного синтеза, их потенциальных преимуществ и недостатков, а также ресурсов, необходимых для отработки и внедрения — было открытым и объективным. Интерес со стороны общественности привлекают такие возможности, как облегчение перехода к экологически чистой энергии, экономического развития и решения проблем малообеспеченных слоев населения, удовлетворение растущих потребностей в сфере энергопотребления и развитие других отраслей благодаря технологиям, являющихся результатами НИОКР в области термоядерного синтеза (в частности, технологии, связанные с материалами, магнитами и плазмой).

К числу интересующих общественность проблем относится ситуация с обращением с отходами по сравнению с другими отраслями и возможность возникновения опасных факторов и выбросов, распространяющихся за пределы площадки. Важно четко обозначить потенциальные риски, которые могут возникать как при нормальной эксплуатации установок, так и в случае инцидентов и аварий, а также пути их устранения с целью смягчить или предотвратить негативные последствия за пределами площадки. Открытость и планирование противоаварийных мероприятий в рамках мер по защите населения могут внушить общественности уверенность, доверие и сформировать благоприятное представление о новой технологии. В то же время необходимо проводить границу между термоядерным синтезом и другими технологиями, а также между разными видами термоядерных технологий. Для лиц, отвечающих за связи с общественностью, важно избегать непреднамеренной критики какой-либо технологии и учитывать позицию аудитории и наиболее приемлемые для нее подходы. Выбор соответствующих контексту формулировок позволит избежать нежелательных последствий и точно охарактеризовать этап разработки, на которой находится технология (например, стадия экспериментов, создание демонстрационных образцов, прототипов, установок промышленного класса).





СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Global Fusion Industry in 2024, FIA, Washington, DC (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [2] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКОЕ СООБЩЕСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ МОРСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Основополагающие принципы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, МАГАТЭ, Вена (2007), <https://doi.org/10.61092/iaea.hmxn-vw0a>
- [3] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Государственная, правовая и регулирующая основа обеспечения безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 1 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [4] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 2, МАГАТЭ, Вена (2017), <https://doi.org/10.61092/iaea.cq1k-j5z3>
- [5] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015), <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- [6] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка безопасности установок и деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 4 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [7] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 5, МАГАТЭ, Вена (2010).
- [8] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Вывод из эксплуатации установок, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 6, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [9] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ИНТЕРПОЛ, МЕЖДУНАРОДНАЯ МОРСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ КОМИССИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПО ДОГОВОРУ О ВСЕОБЪЕМЛЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПРОГРАММА

ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО КООРДИНАЦИИ ГУМАНИТАРНЫХ ВОПРОСОВ, Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 7, МАГАТЭ, Вена (2016),
<https://doi.org/10.61092/iaea.3dbe-055p>

- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of a Graded Approach in Regulating the Safety of Radiation Sources, IAEA-TECDOC-1974, IAEA, Vienna (2021).
- [11] HOEDL, S.A., Achieving a social license for fusion energy, *Phys. Plasmas* **29**(9) (2022) 092506,
<https://doi.org/10.1063/5.0091054>
- [12] HOEDL, S. Social acceptance is as important as low costs and net energy production for climate and energy poverty impact, *J. Fusion Energy*. **42** (2023) 22,
<https://doi.org/10.1007/s10894-023-00355-x>
- [13] GUPTA, K., et al. Americans' views of fusion energy: Implications for sustainable public support, *Fusion Sci. and Technol.* **2024** (2024) 1–17,
<https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2328457>
- [14] GUNNINGHAM, N., KAGAN, R.A., THORNTON, D., Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance, *Law & Social Inquiry*, **29**(2) (2004), 307–341,
<https://doi.org/10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x>
- [15] UNESCO, National Bioethics Committees in Action, UNESCO, Paris (2010),
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189548?posInSet=1&queryId=a17553d7-2780-4e51-b9d3-a495cecdab90>
- [16] NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, Novel Techniques for the Prevention of Mitochondrial DNA Disorders: An Ethical Review, Nuffield Council on Bioethics, London (2012).
- [17] WARNOCK M., et al., Report of the Committee of Inquiry into Human Fertilisation and Embryology, U.K. Department of Health & Social Security, London (1984),
<https://www.hfea.gov.uk/media/2608/warnock-report-of-the-committee-of-inquiry-into-human-fertilisation-and-embryology-1984.pdf>
- [18] STILGOE, J., OWEN, R., MACNAGHTEN, P., Developing a framework for responsible innovation, *Res. Policy* **42**(9) (2013) 1568–1580,
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- [19] OWEN, R., MACNAGHTEN, P., STILGOE, J., Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Sci. Publ. Policy* **39**(6) (2012) 751–760,
<https://doi.org/10.1093/scipol/scs093>
- [20] BRAND, T., BLOK, V., Responsible innovation in business: a critical reflection on deliberative engagement as a central governance mechanism, *J. Responsible Innov.* **6**(1) (2019) 4–24,
<https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1575681>
- [21] SMITH J.M., *Extracting Accountability: Engineers and Corporate Social Responsibility*, MIT Press, Cambridge, MA (2021).

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Abdullah, M.S.	Международное агентство по атомной энергии
Allain, J.P.	Министерство энергетики Соединенных Штатов, Соединенные Штаты Америки
Аникеев, А.	Росатом, Российская Федерация
Артисюк, В.	Международное агентство по атомной энергии
Ascić, M.	Международное агентство по атомной энергии
Ashraf, S.	Международное агентство по атомной энергии
Barbarino, M.	Международное агентство по атомной энергии
Becoulet, A.	Организация ИТЭР
Будаев, В.	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация
Chapman, I.	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства, Соединенное Королевство
Clark, T.	Комиссия по ядерному регулированию Соединенных Штатов, Соединенные Штаты Америки
De Caires Watson, D.	Международное агентство по атомной энергии
Desai, S.	«Хилион Энерджи», Соединенные Штаты Америки
Ellis, T.	«Коммонуэлт фьюжн системз», Соединенные Штаты Америки
Federici, G.	«ЮРОфьюжн», Германия
Hoedl, S.	«Поуст Роуд Фаундейшн», Соединенные Штаты Америки
Hole, M.	Австралийский национальный университет, Австралия
Hsu, S.	Министерство энергетики Соединенных Штатов, Соединенные Штаты Америки
Jenko, F.	Институт физики плазмы им. Макса Планка, Германия
Junillon, C.	«Ферст лайт фьюжн», Соединенное Королевство
Ibarra, A.	ИФМИФ-ДОНЕС, Испания
Kaneko, T.	Международное агентство по атомной энергии
Kumar Ellapan, R.	Институт изучения плазмы, Индия
Li, P.	Юго-западный институт физики, Китай
Matsumoto, T.	Национальные научно-технические квантовые и радиологические институты, Япония
Milnes, J.	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства, Соединенное Королевство
Oh, Y.	Корейский институт термоядерной энергии, Республика Корея
Osakabe, M.	Национальный институт термоядерных исследований, Япония
Poli, E.	Институт физики плазмы им. Макса Планка, Германия
Pussieux, T.	Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии, Франция
Rance, P.J.	Международное агентство по атомной энергии
Romanelli, F.	«Консорциум DTT», Италия
Shannon, M.	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства, Соединенное Королевство
Tadger, D.	Международное агентство по атомной энергии
Takeda, S.	«Киото Фьюжиниеринг» («Kyoto Fusionneering»), Япония
Wagner, R.	Международное агентство по атомной энергии
Yokoyama, M.	Национальный институт термоядерных исследований, Япония

Совещания консультантов

Вена, Австрия: 25–29 января 2024 года, 27–29 февраля 2024 года, 16–18 апреля 2024 года

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Берн) и пересмотренной в 1972 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, должно быть получено разрешение, которое обычно является предметом соглашений о роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и рассматриваются в каждом случае в отдельности. Вопросы следует направлять в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу:

Группа маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)
Издательская секция
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр,
а/я 100,
А1400 Вена, Австрия Факс: +43 1 26007 22529
Тел.: +43 1 2600 22417 или 22530
Эл. почта: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

© IAEA, 2024
Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Ноябрь 2024 года
STI/PUB/2099
<https://doi.org/10.61092/iaea.rjb6-m9r0>

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ — КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
МАГАТЭ, ВЕНА, 2024 ГОД
ISBN 978–92–0–128324–5 (печатный формат)
ISBN 978–92–0–128424–2 (формат pdf)

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

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.

В настоящей публикации не затрагиваются вопросы ответственности — юридической или иного рода — за действия или бездействие со стороны каких-либо лиц.

Представленные здесь руководящие указания и рекомендации в отношении выявленных примеров положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государств-членов.

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 корректность приводимых в настоящей публикации адресов веб-сайтов внешних или третьих сторон и не гарантирует того, что информационное наполнение таких веб-сайтов является или останется корректным и релевантным.

В публикации «Термоядерный синтез — ключевые элементы» изложено общее видение развития термоядерной энергетики. В ней сделана попытка сформировать общее понимание пути от исследований, разработок и демонстрации до промышленного освоения технологий синтеза и намечены механизмы сотрудничества, которые помогут поддерживать и продвигать инициативы в области термоядерной энергетики во всем мире. Эта публикация предназначена для научных и инженерных работников, занятых в сфере исследований и разработок по тематике термоядерного синтеза, сотрудников регулирующих органов, предпринимателей и заинтересованных сторон, участвующих в развитии технологий термоядерного синтеза, а также лиц, принимающих политические решения.