

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Флагманская публикация МАГАТЭ | Май 2021 года | www.iaea.org/es/bulletin

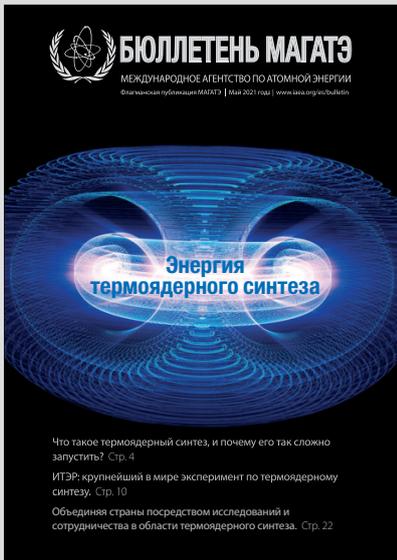


Энергия термоядерного синтеза

Что такое термоядерный синтез, и почему его так сложно запустить? Стр. 4

ИТЭР: крупнейший в мире эксперимент по термоядерному синтезу. Стр. 10

Объединяя страны посредством исследований и сотрудничества в области термоядерного синтеза. Стр. 22



БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации
и коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

А/я 100, 1400 Вена, Австрия

Тел.: (43-1) 2600-0

iaebulletin@iaea.org

Ответственный редактор: Михаэль Амди Мадсен

Редактор: Миклош Гашпар

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по адресу
www.iaea.org/bulletin

Выдержки из материалов МАГАТЭ, содержащихся в Бюллетене МАГАТЭ, могут свободно использоваться при условии указания на их источник. Если указано, что автор материалов не является сотрудником МАГАТЭ, то разрешение на повторную публикацию материала с иной целью, чем простое ознакомление, следует испрашивать у автора или предоставившей данный материал организации.

Мнения, которые выражены в любой подписанной статье, опубликованной в Бюллетене МАГАТЭ, необязательно отражают точку зрения Международного агентства по атомной энергии, и МАГАТЭ не несет за них никакой ответственности.

Обложка:

В токамаке частицы плазмы, нагретые до сотен миллионов градусов и удерживаемые магнитными полями, сливаются вместе, производя энергию.
(Shutterstock.com)

Читайте наши новости на сайтах:



Миссия Международного агентства по атомной энергии состоит в том, чтобы предотвращать распространение ядерного оружия и помогать всем странам — особенно развивающимся — в налаживании мирного, безопасного и надежного использования ядерной науки и технологий.

Созданное в 1957 году как автономная организация под эгидой Организации Объединенных Наций, МАГАТЭ — единственная организация системы ООН, обладающая экспертным потенциалом в сфере ядерных технологий. Уникальные специализированные лаборатории МАГАТЭ способствуют передаче государствам — членам МАГАТЭ знаний и экспертного опыта в таких областях, как здоровье человека, продовольствие, водные ресурсы, экономика и окружающая среда.

МАГАТЭ также служит глобальной платформой для укрепления физической ядерной безопасности. МАГАТЭ выпускает Серию изданий по физической ядерной безопасности, в которой выходят одобренные на международном уровне руководящие материалы по физической ядерной безопасности. МАГАТЭ также ставит своей задачей содействие минимизации риска того, что ядерные и другие радиоактивные материалы попадут в руки террористов и преступников и что ядерные установки окажутся объектом злоумышленных действий.

Нормы безопасности МАГАТЭ закладывают систему фундаментальных принципов безопасности и отражают международный консенсус в отношении того, что можно считать высоким уровнем безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности МАГАТЭ разрабатывались для всех типов ядерных установок и деятельности, преследующих мирные цели, а также для защитных мер, необходимых для снижения существующих рисков облучения.

Кроме того, при помощи своей системы инспекций МАГАТЭ проверяет соблюдение государствами-членами их обязательств, касающихся использования ядерного материала и установок исключительно в мирных целях, в соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия и другими соглашениями о нераспространении.

Работа МАГАТЭ многогранна, и в ней участвует широкий круг партнеров на национальном, региональном и международном уровне. Программы и бюджет МАГАТЭ формируются на основе решений его директивных органов — Совета управляющих, насчитывающего 35 членов, и Генеральной конференции всех государств-членов.

Центральные учреждения МАГАТЭ находятся в Венском международном центре. Полевые бюро и бюро по связи расположены в Женеве, Нью-Йорке, Токио и Торонто. В Вене, Зайберсдорфе и Монако работают научные лаборатории МАГАТЭ. Кроме того, МАГАТЭ оказывает содействие и предоставляет финансирование Международному центру теоретической физики им. Абдуса Салама в Триесте, Италия.

Как помочь сделать термоядерный синтез реальностью

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

На состоявшейся в 1958 году второй Международной конференции Организации Объединенных Наций по использованию атомной энергии в мирных целях старшие должностные лица МАГАТЭ узнали о попытках стран использовать энергию термоядерного синтеза, которые до этого составляли государственную тайну. Согласно этим раскрытым данным термоядерный синтез мог обеспечить человечество практически безграничной энергией. В результате термоядерного синтеза происходит слияние ядер, что при том же количестве топлива приводит к высвобождению гораздо большей энергии, чем в случае реакции деления ядер, когда атомы расщепляются.

В конце 1950-х годов, когда казалось, что ископаемые виды топлива будут использоваться бесконечно, а об изменении климата еще не задумывались, термоядерный синтез рассматривался как «неплохая перспектива» — один из вариантов производства энергии в далеком будущем. Сегодня мы живем совсем в другом мире, где спрос на экологически чистую энергию опережает предложение. На безвредные для окружающей среды источники энергии, такие как термоядерный синтез, обращают внимание руководители, инвесторы и широкая общественность.

В ходе термоядерного синтеза производится в четыре раза больше энергии на килограмм топлива, чем при реакции деления ядер, и почти в четыре миллиона раз больше энергии, чем при сжигании нефти и угля. Сегодня активное международное сотрудничество приближает нас к моменту, когда термоядерный синтез станет реальностью.

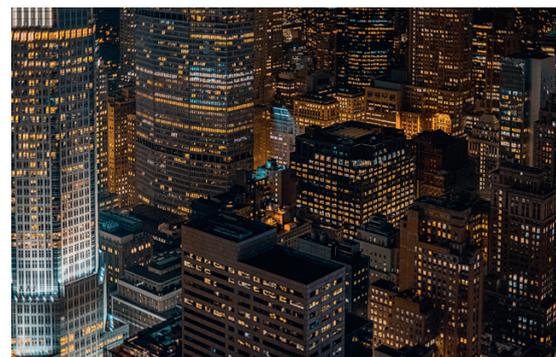
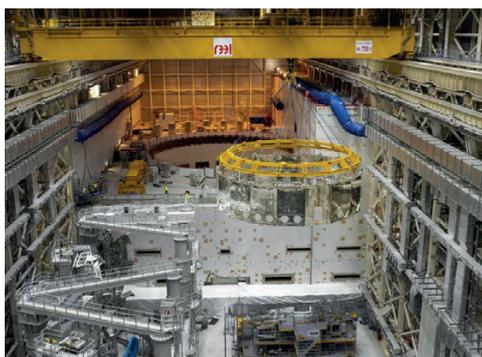
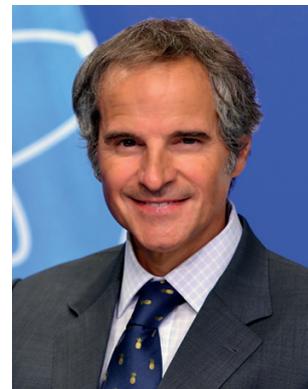
Ярким примером этого является ИТЭР — крупнейший в мире экспериментальный проект в области термоядерного синтеза (см. статью на стр. 10), в котором участвуют ученые из 35 стран, стремящиеся достичь самоподдерживающейся термоядерной реакции. Строительство идет полным ходом, и, когда оно будет завершено, ИТЭР положит начало следующему этапу развития термоядерной энергетики — демонстрационным термоядерным энергетическим установкам (DEMO), которые впервые будут производить электроэнергию в результате термоядерного синтеза.

МАГАТЭ находится в авангарде усилий по разработке DEMO, содействуя международному сотрудничеству и обмениваясь наилучшей практикой, почерпнутой из проектов по всему миру (см. статью на стр. 12). МАГАТЭ способствует проведению дискуссий по DEMO и стимулирует всесторонний международный диалог, чтобы преодолеть серьезные технические трудности и сделать термоядерную энергетику реальностью.

Публикуемый МАГАТЭ научный журнал под названием «Ядерный синтез» свидетельствует о нашей приверженности термоядерным исследованиям. Это самый старый и авторитетный журнал по тематике термоядерного синтеза в мире. Он помогает исследователям и инженерам, работающим с термоядерным синтезом в различных странах. Каждый год его полная версия скачивается полмиллиона раз, и он остается наиболее влиятельным журналом в своей сфере.

В настоящем выпуске Бюллетеня мы рассказываем об усилиях правительств и о все более активном участии частного сектора в термоядерных проектах. Растущий интерес со стороны инвесторов и крупных производителей энергии показывает, что технический прогресс, необходимый для того, чтобы сделать термоядерный синтез реальностью, ускоряется.

Известный советский физик Лев Арцимович сказал: «Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству». Это время пришло. Решение проблемы изменения климата стало глобальным приоритетом, а декарбонизация наших источников энергии — одной из важнейших задач. Благодаря термоядерному синтезу человечество может вступить в будущее с экологически чистой энергией, которое стало как никогда близко.



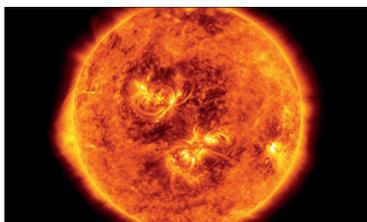
(Фото: ИТЭР)

(Фото: ИТЭР)

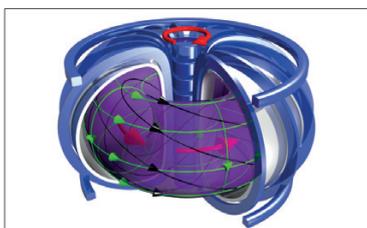
(Фото: Freepik.com)



1 Как помочь сделать термоядерный синтез реальностью



4 Что такое термоядерный синтез, и почему его так сложно запустить?



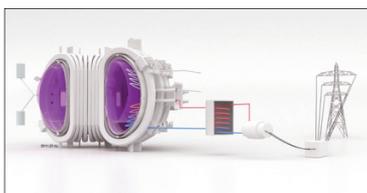
6 Термоядерный синтез с магнитным удержанием плазмы в токамаках и стеллараторах



8 Рассмотрение альтернатив магнитному удержанию плазмы



10 ИТЭР: крупнейший в мире эксперимент по термоядерному синтезу



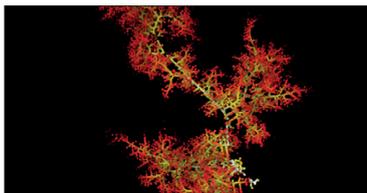
12 Демонстрационные термоядерные энергетические установки

Важный этап на пути к крупномасштабному производству электроэнергии на коммерческой основе



14 Безопасность термоядерного синтеза

Процесс, безопасный по своей сути



16 Как базы данных МАГАТЭ помогают в исследованиях, призванных сделать возможным использование термоядерного синтеза на коммерческой основе



18 Пылающая плазма
Важнейший шаг на пути к термоядерной энергетике



20 Совершенствование материалов и технологий для термоядерного синтеза



22 Объединяя страны посредством исследований и сотрудничества в области термоядерного синтеза

Вопросы и ответы

24 Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству

Мировой обзор

26 Мечтатели и прагматики

Зачем термоядерной энергетике частные предприятия и стартапы

— Саймон Вудраф

Сегодня в МАГАТЭ

28 Новости МАГАТЭ

32 Публикации

Что такое термоядерный синтез и почему его так сложно запустить?

Ирена Шатцис и Маттео Барбарино

Пятьсот лет назад ацтеки, проживавшие на территории современной Мексики, верили, что солнечная энергия иссякнет без крови от человеческих жертвоприношений. Сегодня мы знаем, что Солнце, а также все другие звезды вырабатывают энергию за счет реакции, называемой термоядерным синтезом. Если термоядерный синтез удастся воспроизвести на Земле, то будет получено практически безграничное количество чистой, безопасной и доступной энергии для удовлетворения мирового спроса.

Как именно происходит термоядерный синтез? Вкратце термоядерный синтез — это процесс, в ходе которого два легких атомных ядра объединяются в одно более тяжелое ядро с высвобождением огромного количества энергии. Термоядерные реакции происходят в материи, находящейся в состоянии плазмы — горячего заряженного газа, состоящего из положительных ионов и свободно движущихся электронов и обладающего уникальными свойствами, отличными от твердых тел, жидкостей и газов.

При слиянии на Солнце ядра сталкиваются друг с другом при очень высокой температуре, превышающей десять миллионов градусов Цельсия, что необходимо для преодоления взаимного электрического отталкивания. Как только ядра преодолевают это отталкивание и оказываются на очень близком расстоянии друг от друга, ядерная сила притяжения между ними перевешивает электрическое отталкивание и позволяет им слиться. Чтобы это произошло, ядра должны находиться в замкнутом пространстве, что увеличивает вероятность их столкновения. На Солнце условия для термоядерного синтеза создаются в результате колоссального давления, создаваемого его огромной гравитацией.

Количество энергии, выделяемой при термоядерном синтезе, очень велико — в четыре раза больше, чем при реакциях деления ядер. На термоядерных реакциях может быть основана работа будущих термоядерных энергетических реакторов. Согласно планам в

термоядерных реакторах первого поколения будет использоваться смесь тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития. В теории с использованием всего нескольких граммов этих реагентов можно произвести один тераджоуль энергии, что приблизительно равно энергии, необходимой одному человеку в развитой стране в течение шестидесяти лет.

Путь к звездам

На Солнце термоядерный синтез естественным образом вызывается огромной гравитационной силой, однако без этой силы для протекания реакции необходима более высокая температура. На Земле для слияния дейтерия и трития нужна температура, превышающая 100 миллионов градусов Цельсия, и сильное давление, а также достаточно замкнутое пространство для удержания плазмы и обеспечения протекания термоядерной реакции в течение определенного времени для достижения чистого прироста энергии, когда количество произведенной термоядерной энергии больше, чем количество энергии, использованной для нагрева плазмы.

Хотя в настоящее время в ходе экспериментов регулярно достигаются условия, очень близкие к тем, которые требуются в термоядерном реакторе, необходимо улучшить показатели удержания и стабильности плазмы. Ученые и инженеры со всего мира продолжают испытывать новые материалы и разрабатывать новые технологии для получения термоядерной энергии.

Исследования в области термоядерного синтеза и физики плазмы проводятся более чем в 50 странах, и в ходе многих экспериментов были успешно проведены термоядерные реакции, хотя чистый прирост энергии так и не был достигнут. Количество времени, необходимого для воссоздания процесса, происходящего на звездах, будет зависеть от мобилизации ресурсов в рамках глобального партнерства и сотрудничества.

Солнце, а также все другие звезды вырабатывают энергию за счет реакции, называемой термоядерным синтезом. Если эту реакцию удастся воспроизвести на Земле, то будет получено практически безграничное количество чистой, безопасной и доступной энергии для удовлетворения мирового спроса.

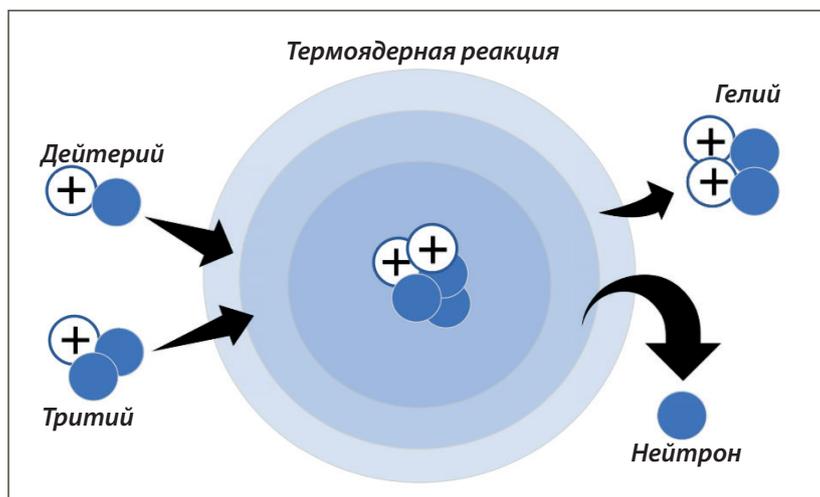
(Изображение: NASA/SDO/AIA)

История сотрудничества

С тех пор как в 1930-е годы стало понятно, как работает термоядерный синтез, ученые не оставляют попыток воспроизвести и использовать его. Вначале эти попытки держались в секрете. Однако вскоре стало ясно, что такие сложные и дорогостоящие исследования можно проводить только на основе сотрудничества. На второй Международной конференции Организации Объединенных Наций по использованию атомной энергии в мирных целях, состоявшейся в 1958 году в Женеве, Швейцария, ученые поведали миру об исследованиях в области термоядерного синтеза.

МАГАТЭ всегда было в авангарде международных термоядерных исследований. В 1960 году МАГАТЭ начало издавать журнал «Ядерный синтез» в целях обмена информацией о соответствующих достижениях, и сегодня он считается ведущим периодическим изданием в этой области. Первая международная Конференция МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза состоялась в 1961 году, и с 1974 года МАГАТЭ проводит такую конференцию каждые два года, чтобы стимулировать обсуждение событий и достижений в этой сфере.

В 2007 году по итогам длившихся два десятилетия переговоров относительно конструкции и местонахождения крупнейшей в мире международной термоядерной установки во Франции началось строительство ИТЭР, чтобы продемонстрировать научную и техническую возможность выработки термоядерной энергии (см. статью на стр. 10). Депозитарием Соглашения ИТЭР является Генеральный директор МАГАТЭ. После ИТЭР планируется создание демонстрационных термоядерных энергетических установок (DEMO), призванных показать, что управляемый термоядерный синтез может генерировать нетто-электроэнергию. МАГАТЭ проводит семинары-практикумы по DEMO для



В качестве топлива для будущих термоядерных электростанций будет использоваться смесь двух изотопов водорода — дейтерия и трития. Внутри реактора происходит столкновение и слияние ядер дейтерия и трития, что приводит к образованию гелия и высвобождению нейтронов.

(Изображение: МАГАТЭ/М. Барбарино)

облегчения сотрудничества в определении и координации регулярной деятельности по программе DEMO во всем мире (см. статью на стр. 12).

Ожидается, что термоядерный синтез сможет удовлетворять энергетические потребности человечества в течение миллионов лет. Термоядерное топливо имеется в избытке, и его легко получить: дейтерий можно с небольшими затратами добывать из морской воды, а тритий можно производить из широко распространенного в природе лития. Термоядерные реакторы не будут вырабатывать высокоактивные долгоживущие ядерные отходы, а аварии с расплавлением активной зоны термоядерного реактора практически невозможны.

Важно отметить, что в результате термоядерного синтеза в атмосферу не выбрасывается углекислый газ и другие парниковые газы. Вместе с АЭС, работа которых основана на принципе деления ядер и которые также являются низкоуглеродным источником энергии, в будущем термоядерные электростанции смогут внести вклад в смягчение последствий изменения климата.

Термоядерный синтез с магнитным удержанием плазмы в токамаках и стеллараторах

Вольфганг Пикот

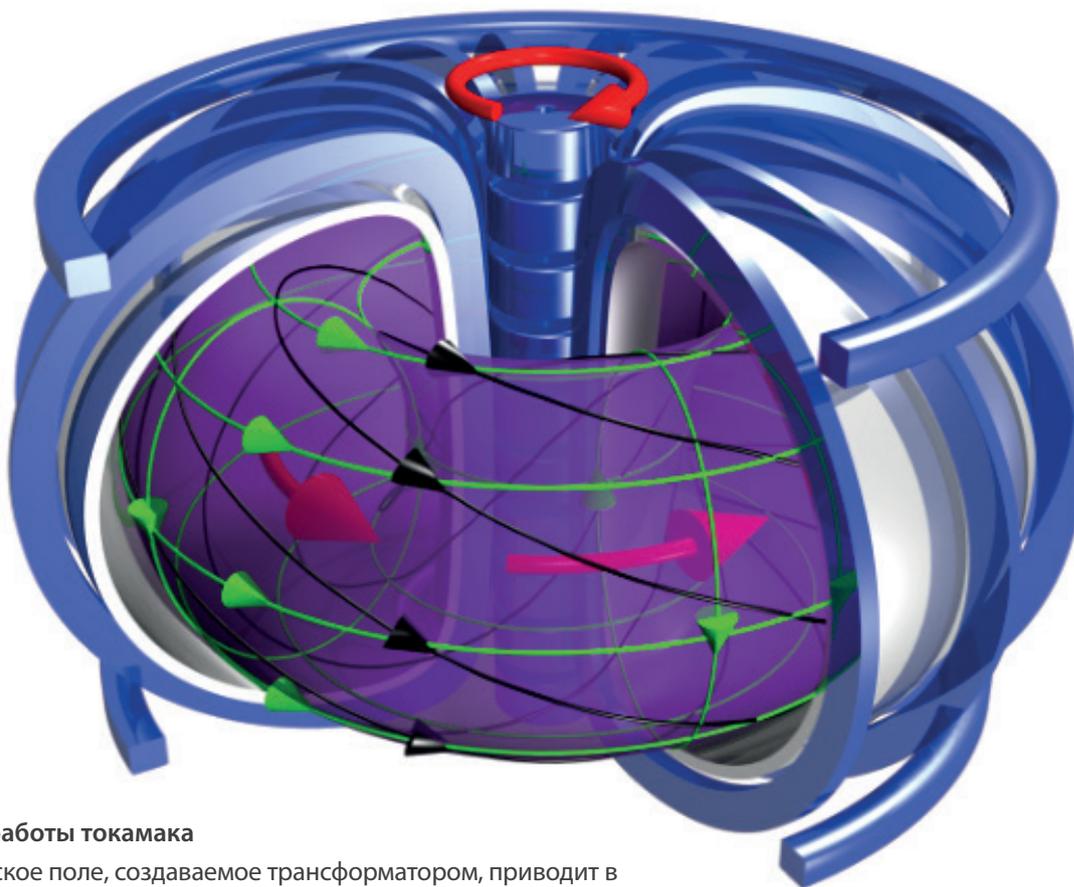
В 1934 году в лаборатории впервые произошла реакция термоядерного синтеза, что было большим прорывом для того времени. Однако сегодня это не так сложно сделать: в 2018 году двенадцатилетний подросток вошел в Книгу рекордов Гиннеса как самый молодой человек, успешно проведший термоядерный эксперимент в домашних условиях.

К сожалению, такие эксперименты дают результат, который удерживается лишь доли секунды, и производство и поддержание термоядерных реакций в течение длительного времени остается серьезной проблемой. Только если будет разработан устойчивый и надежный способ производства термоядерной энергии, термоядерный синтез может стать коммерчески целесообразным источником энергии.

Термоядерная энергетика

В термоядерной энергетике используется энергия, высвобождаемая при слиянии легких атомных ядер. Когда две такие частицы объединяются в одну, образуется ядро, которое немного легче, чем суммарная масса исходных ядер. Эта разница не исчезает, а преобразуется в энергию. Удивительно, но такая ничтожная потеря массы превращается в огромное количество энергии, что делает развитие термоядерной энергетике весьма перспективным.

Существуют три состояния материи: твердое, жидкое и газообразное. Если газ подвергается воздействию очень высоких температур, то он превращается в плазму. В плазме электроны отрываются от атомов. Атом, у которого нет электронов, вращающихся вокруг ядра,



Принцип работы токамака

Электрическое поле, создаваемое трансформатором, приводит в движение ток (большие красные стрелки) через плазменный столб.

В результате образуется полоидальное магнитное поле, которое сжимает поток плазмы таким образом, что в разрезе он приобретает форму круга (зеленые вертикальные круги). Внутри корпуса, по форме напоминающего бублик, создается вакуум, и сжатый таким образом столб позволяет не допустить утечки. Другое магнитное поле, проходящее вдоль всего корпуса, называется тороидальным (зеленые горизонтальные линии).

Сочетание этих двух полей создает похожую на спираль трехмерную кривую (показана черным цветом), способную удерживать плазму.

является «ионизированным» и называется ионом. Таким образом, плазма состоит из ионов и свободных электронов. При этом ученые могут стимулировать ионы так, чтобы они сталкивались друг с другом, сплавлялись и высвобождали энергию.

Поддерживать стабильность плазмы для извлечения энергии весьма непросто. Она хаотична, имеет сверхвысокую температуру, подвержена турбулентности и нестабильна по другим параметрам. Понимание, моделирование и контроль плазмы чрезвычайно сложны, но за последние десятилетия исследователи добились в этом больших успехов.

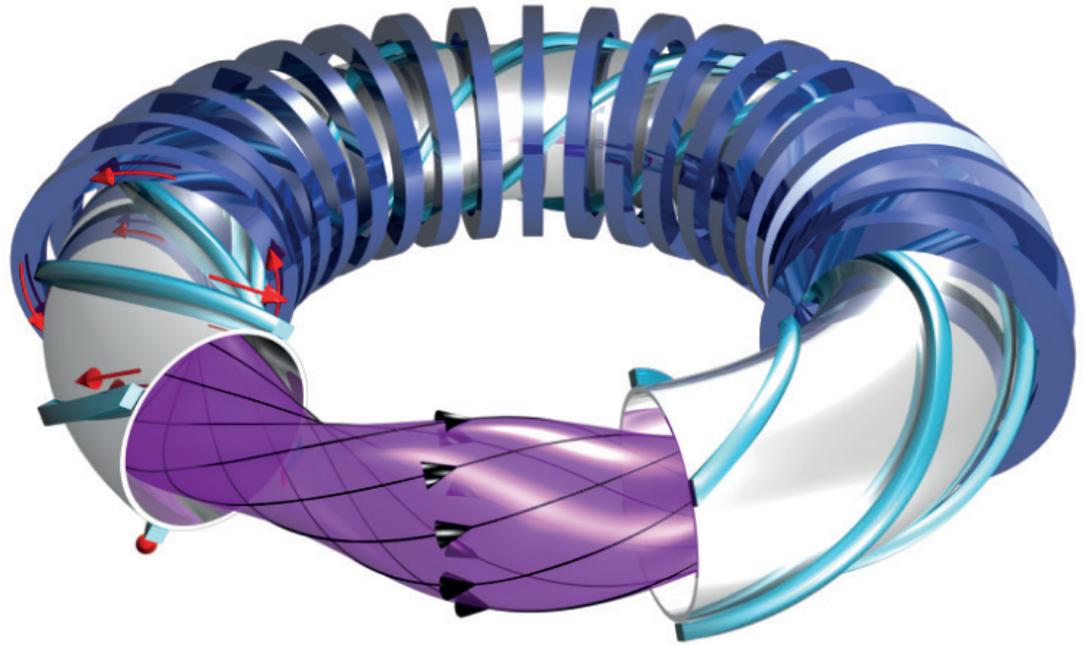
Для манипуляций с плазмой ученые используют устройства магнитного удержания. Наиболее распространенными термоядерными реакторами такого типа являются токамаки и стеллараторы. В настоящее время это наиболее перспективные концепции для будущих термоядерных энергетических установок.

Принцип работы обоих типов реакторов основан на том факте, что заряженные частицы реагируют на магнитные силы. Ионы удерживаются мощными магнитами в реакторах. Электроны также скрываются силами реакторов. Магнитные силы постоянно вращают частицы в реакторных камерах, по форме напоминающих бублик, не позволяя им покинуть плазму.

Одна проблема, разные решения

Поскольку конфигурации стеллараторов делают их сложными для создания, сегодня большинство устройств для термоядерного синтеза представляют собой токамаки (сокращение названия «тороидальная камера с магнитными катушками»). В настоящее время функционируют около 60 токамаков и 10 стеллараторов.

Оба типа реакторов имеют свои преимущества. Токамаки лучше поддерживают высокую температуру плазмы, а стеллараторы лучше обеспечивают ее стабильность. Хотя



Скручивание магнитов позволяет получить спиралевидную форму без использования трансформатора: такая конфигурация называется стелларатором.

(Изображения: Институт физики плазмы им. Макса Планка, Германия)

сейчас более распространены токамаки, все же возможно, что однажды предпочтение при создании термоядерных энергетических установок будет отдано стеллараторам.

Исследователи добились больших успехов в области термоядерного синтеза с магнитным удержанием и теперь могут с легкостью создавать плазму со сверхвысокой температурой. Они разработали мощные магниты для удержания плазмы и новые материалы, способные выдерживать большую нагрузку в корпусах реакторов. Прогресс в области экспериментальной работы, теории, моделирования и использования симуляторов позволил достичь более глубокого понимания поведения плазмы, и такие экспериментальные установки (токамаки и стеллараторы) как ИТЭР будут играть центральную роль в доказательстве научной и технической возможности производства термоядерной энергии.

Рассмотрение альтернатив магнитному удержанию плазмы

Лазерный термоядерный синтез, линейные устройства и усовершенствованные виды топлива

Александра Пеева

Лазерный термоядерный синтез — это метод запуска термоядерных реакций, представляющий собой потенциальную альтернативу магнитному удержанию плазмы (см. статью на стр. 6). Он предусматривает использование инерциального удержания: с помощью мощных лазеров нагреваются и сжимаются крошечные сферические капсулы, содержащие топливные таблетки из изотопов водорода, таких как дейтерий и тритий.

Интенсивный нагрев поверхности капсулы приводит к микровзрыву топлива, в результате чего поверхностный слой таблетки подвергается абляции и взрывается. Создаваемая инерция удерживает топливо достаточно долго для того, чтобы произошла термоядерная реакция.

Эксперименты в области лазерного термоядерного синтеза начались в 1970-е годы. Сегодня на Национальной установке по термоядерному зажиганию (НИФ) в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в Соединенных Штатах Америки имеется 192 лазера, что с большим отрывом делает ее самой крупной в мире лазерной установкой. На НИФ лазеры нагревают внутренние стенки цилиндрического золотого контейнера, называемого хольраумом, в котором находится капсула с топливной таблеткой из дейтерия и трития. В результате взаимодействия лазера и хольраума генерируется рентгеновское излучение, которое нагревает и сжимает капсулу, создавая центральную точку температурного максимума внутри таблетки, где происходит термоядерная реакция.

Чтобы произошло зажигание и начался полностью самоподдерживающийся термоядерный синтез, капсулы НИФ должны выделять примерно в 30 раз больше энергии, чем они поглощают.

«За последние пять лет мы добились на НИФ значительного прогресса, и теперь мы можем производить

от двух с половиной до трех раз больше энергии по сравнению с тем количеством, которое поступает в точку температурного максимума топлива, — рассказывает Брайан Спирс, заместитель руководителя по моделированию ядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы на НИФ. — До 30-кратного увеличения все еще далеко, но это нелинейный процесс, и мы уже внедрили множество важных технических решений для достижения этой цели».

Ключом к достижению коммерчески рентабельного термоядерного синтеза является повышение центрального давления в точке температурного максимума топлива в несколько миллиардов раз по сравнению с атмосферным давлением. НИФ добилась существенного прогресса в этой области, перейдя от пластиковых к микрокристаллическим углеродным капсулам высокой плотности, улучшив технические элементы, используемые для поддержки капсул, и усовершенствовав конструкции, с помощью которых капсулы заполняются топливом для термоядерного синтеза. Это позволило экспертам значительно повысить эффективность энергетической связи между энергией, производимой лазером, и энергией, поглощаемой капсулой, и в конечном итоге вырабатывать больше энергии.

«Нам еще предстоит решить серьезные научные задачи, но последние достижения на НИФ и других установках доказывают, что мы приближаемся к пороговому значению, когда зажигание для начала лазерного термоядерного синтеза станет возможным», — говорит Спирс.

В 2020 году МАГАТЭ приступило к реализации нового проекта координированных исследований (ПКИ) под названием «Пути получения энергии в результате инерциального термоядерного синтеза: материаловедческие исследования и разработка



технологий». Этот проект, в котором участвуют 24 института из 17 стран и который является четвертым ПКИ в данной области, направлен на разработку конструкций капсул с высоким коэффициентом усиления для достижения полностью самоподдерживающегося термоядерного синтеза.

Термоядерный синтез в результате столкновения пучков

Еще одной альтернативой лазерному и магнитному удержанию плазмы является использование ионных пучков, генерируемых ускорителями частиц, и нацеливание их друг на друга, чтобы термоядерный синтез происходил в точке их столкновения. Большим недостатком этого метода является высокая вероятность того, что частицы отскочат друг от друга без слияния и выделения энергии.

Частная американская компания «ТАЕ технолоджис» (ТАЕ) использует линейное устройство — цилиндрический реактор длиной 25 метров. Термоядерный синтез происходит в результате выпуска с каждого конца реактора двух потоков плазмы, которые сталкиваются и сливаются в облако в центре. Затем в это облако запускаются атомы дейтерия, чтобы заставить его вращаться, тем самым поддерживая плазму в горячем и стабильном состоянии.

От альтернативного удержания плазмы до усовершенствованных видов топлива

Еще одно преимущество термоядерного синтеза с помощью лазеров или линейных устройств заключается в том, что эти методы легче адаптировать к использованию топлива помимо дейтерия и трития. Традиционно для термоядерного синтеза используется смесь этих изотопов водорода, поскольку они по сравнению с другими видами топлива достигают наибольшей скорости реакции при более низкой температуре.

Однако тритий радиоактивен и не встречается в природе в сколь-либо значительных количествах. Поэтому его приходится вырабатывать посредством ядерной реакции между нейтронами, получаемыми в результате термоядерного синтеза, и литием, окружающим стенку реактора. Энергия этих нейтронов также создает значительные трудности, поскольку вакуумная камера реактора изготовлена из таких материалов, что при

столкновении нейтронов со стенками реактора ее конструкции и элементы становятся радиоактивными. Это требует принятия дополнительных мер по обеспечению радиационной безопасности и утилизации отходов (см. статью на стр. 14).

Чтобы обойти проблемы, связанные с использованием трития, в настоящее время проводятся эксперименты с применением альтернативного или усовершенствованного термоядерного топлива, такого как протон–бор-11 (p–B-11). Бор-11 нерадиоактивен и составляет около 80 процентов всего бора, встречающегося в природе, поэтому он легко доступен. Однако главная проблема использования p–B-11 для термоядерного синтеза состоит в том, что в таком случае плазма должна быть в сто раз горячее, чем плазма, содержащая дейтерий и тритий. К счастью, при использовании лазерного зажигания или линейных устройств нагрев ограничивается точками температурного максимума: остальная плазма не должна быть значительно горячее.

«P–B-11 является наиболее экологически чистым и безопасным для окружающей среды источником топлива на Земле. Его использование не приводит к появлению вредных побочных продуктов, а его природных запасов достаточно, чтобы обеспечивать планету топливом на протяжении тысячелетий. В совокупности эти факторы могут обеспечить максимальную безопасность, экономичность, эффективность и долговечность термоядерных электростанций, — рассказывает Михл Биндербауэр, исполнительный директор ТАЕ. — Основная трудность с p–B-11 заключается в том, что для поддержания термоядерной реакции требуется более высокая температура, чем для других топливных циклов. Для решения этой проблемы ТАЕ разработала альтернативную концепцию удержания плазмы».

Таким образом, в будущем усовершенствованные виды топлива могут обеспечить более эффективный и экономичный способ производства термоядерной энергии.

Операторы Национальной установки по термоядерному зажиганию (НИФ) проверяют окончательную сборку оптики во время планового технического обслуживания. НИФ, расположенная в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, является крупнейшей в мире и наиболее мощной лазерной системой.

(Фото: Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса)



ИТЭР: крупнейший в мире эксперимент по термоядерному синтезу

Вольфганг Пикот

ИТЭР, весящий 23 000 тонн и имеющий высоту почти 30 метров, будет впечатлять своими масштабами. Этот термоядерный реактор будет расположен в центре комплекса площадью 180 гектаров вместе со вспомогательными помещениями и оборудованием. По своим размерам ИТЭР, что в переводе с латыни означает «путь», значительно превзойдет крупнейшие работающие в настоящее время экспериментальные термоядерные реакторы — Объединенный европейский тор (JET) в Соединенном Королевстве и совместный европейско-японский реактор JT-60SA в Японии.

Но каков потенциал ИТЭР, и почему в эпоху миниатюризации и оптимизации необходимо строить исследовательское устройство такого гигантского масштаба?

Одна из основных целей ИТЭР — доказать, что в результате термоядерной реакции может производиться значительно больше энергии по сравнению с тем количеством, которое затрачивается на запуск самого процесса реакции, т. е. что происходит общее увеличение мощности. Такие реакторы, как ИТЭР, называются токамаками (см. статью на стр. 6). В них используется сочетание систем нагрева, сильных магнитов и других устройств для проведения выделяющих энергию термоядерных реакций в сверхгорячей плазме. Возникающие магнитные поля удерживают и вращают заряженные частицы в корпусе реактора, по форме напоминающем бублик, чтобы они могли сливаться и производить термоядерную энергию.

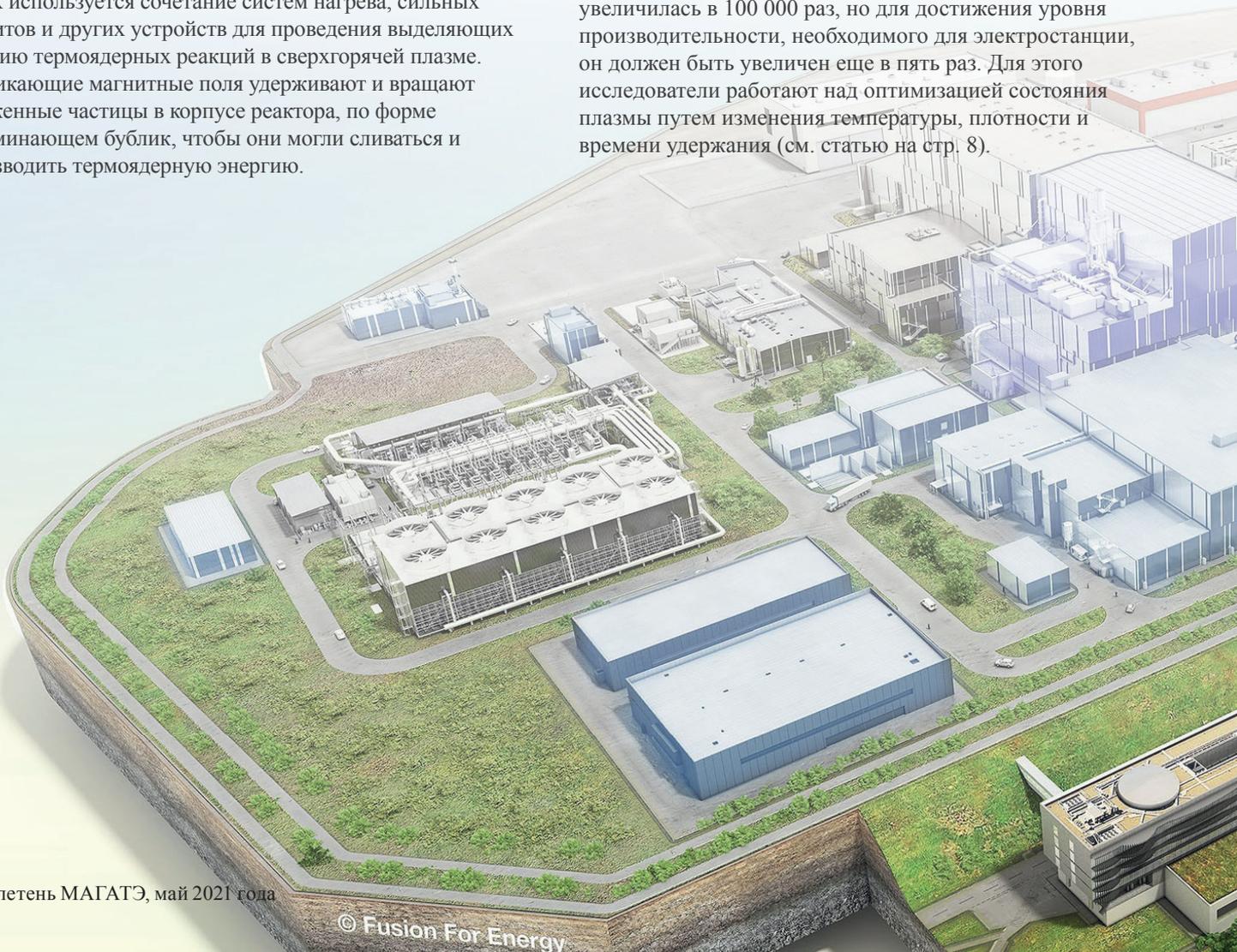
Что касается размера, то более крупные токамаки обеспечивают лучшую изоляцию и дольше удерживают частицы, получаемые в результате термоядерного синтеза. Таким образом, они производят больше энергии, чем менее крупные установки.

Важным показателем эффективности реактора является коэффициент усиления термоядерной энергии, представляющий собой соотношение произведенной термоядерной энергии и энергии, поданной в плазму для стимулирования реакции. Он обозначается символом «Q».

На сегодняшний день наибольший коэффициент усиления Q, равный 0,67, был достигнут на JET: из 24 мегаватт (МВт) тепловой энергии было произведено 16 МВт термоядерной энергии. Однако для производства электроэнергии потребуются гораздо более высокие значения Q.

Предварительные условия для выработки энергии

Эксперименты с термоядерным синтезом проводятся на протяжении последних 50 лет. За это время производительность термоядерных установок увеличилась в 100 000 раз, но для достижения уровня производительности, необходимого для электростанции, он должен быть увеличен еще в пять раз. Для этого исследователи работают над оптимизацией состояния плазмы путем изменения температуры, плотности и времени удержания (см. статью на стр. 8).



Некоторые из этих улучшений стали возможны благодаря увеличению размеров экспериментальных термоядерных реакторов. Поскольку по сравнению с JET высота и радиус ИТЭР вдвое больше, объем плазмы в нем увеличится в десять раз. Применение новых конструкций и инновационных материалов позволит оснастить ИТЭР одними из самых мощных устройств для нагрева плазмы, которые когда-либо использовались. Всего из 50 МВт тепловой энергии, подаваемой в плазму, на нем будет производиться 500 МВт термоядерной энергии, т. е. значение Q составит по меньшей мере 10. Энергия будет вырабатываться с перерывами: каждый раз термоядерная реакция будет происходить примерно 5–10 минут.

Пиковая производительность ИТЭР будет впечатляющей, но она будет достигаться лишь на очень короткие промежутки времени. Чтобы обеспечить постоянную выработку электроэнергии, будущие термоядерные электростанции должны работать непрерывно. Значение Q , равное пяти, является переломным: при его достижении начинается самонагрев плазмы, и она получает способность самостоятельно поддерживать термоядерную реакцию. Чтобы лучше понять, как обеспечить протекание этой самоподдерживающейся реакции, на ИТЭР в конечном итоге будут достигаться и поддерживаться значения Q , равные пяти, в течение промежутков времени, значительно превышающих десять минут.

Глобальное сотрудничество

В проекте ИТЭР участвуют 35 стран, в которых проживает более половины населения мира и которые производят 85 процентов глобального валового внутреннего продукта (ВВП). Хотя в мире проводится множество других термоядерных экспериментов меньшего масштаба, большинство из них все равно предусматривают

координацию, сотрудничество или взаимодействие с Организацией ИТЭР.

МАГАТЭ и Организация ИТЭР с самого начала поддерживают тесные отношения, особенно в таких областях, как исследования в сфере термоядерного синтеза, управление знаниями, развитие людских ресурсов, а также образовательная и информационно-разъяснительная деятельность. Кроме того, МАГАТЭ помогает Организации ИТЭР обмениваться опытом в сфере ядерной безопасности и радиационной защиты с государствами — членами МАГАТЭ, в том числе с теми, которые не участвуют в проекте. В этом году Организация ИТЭР совместно с Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ) Франции проведет 28-ю Конференцию МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза.

Предполагается, что ИТЭР продемонстрирует научную и техническую возможность выработки термоядерной энергии. Согласно поэтапному плану исследований, первые эксперименты на нем начнутся в 2025 году. Эксперименты на полную мощность должны начаться в 2035 году. В случае успеха они станут важной вехой и ознаменуют собой имеющий историческое значение переход на новый этап по сравнению с экспериментальными исследованиями и первыми демонстрационными термоядерными энергетическими установками (DEMO) (см. статью на стр. 12).

Планируемые DEMO позволят обеспечить чистый прирост электроэнергии. На этапе рассмотрения уже находится ряд предварительных концепций реакторов типа DEMO. Если все пойдет по плану, к середине столетия они могут быть введены в эксплуатацию.



Строительная площадка ИТЭР.

(Фото: ИТЭР)

Демонстрационные термоядерные энергетические установки

Важный этап на пути к крупномасштабному производству электроэнергии на коммерческой основе

Ирена Шатцис и Маттео Барбарино

Цель ИТЭР — крупнейшего в мире экспериментального проекта в области термоядерного синтеза — состоит в том, чтобы доказать возможность выработки нетто-энергии в результате термоядерной реакции. Следующим важным шагом станет демонстрация возможности производства нетто-электроэнергии из термоядерной энергии. Именно для этого нужны DEMO — демонстрационные термоядерные энергетические установки.

Реакторы типа DEMO — это скорее концептуальные проекты, а не конкретные конфигурации термоядерных устройств. Предварительные конструкции финансируемых за счет государственных средств DEMO, создаваемых в нескольких странах, еще предстоит доработать. Это будет сделано после получения результатов экспериментов на ИТЭР.

Планируется, что DEMO будут функционировать почти непрерывно, а чистый прирост электроэнергии будет составлять более 50 мегаватт (MWt). Ключевая проблема, которую они призваны решить, заключается в том, как поддерживать стабильность термоядерной плазмы в течение достаточно длительного времени, чтобы производить энергию на постоянной основе.

Хотя многие решения относительно DEMO еще не приняты, обеспеченный государственным финансированием DEMO, скорее всего, будет представлять собой реактор типа токамак, и в качестве топлива в нем будут использоваться тяжелые изотопы водорода — дейтерий и тритий. Однако доступные мировые запасы трития невелики, поэтому сами DEMO должны будут производить тритий в достаточном количестве с помощью так называемых бланкетов, предназначенных для воспроизводства и извлечения трития. Сеила Гонсалес де Висенте, физик — специалист по термоядерному

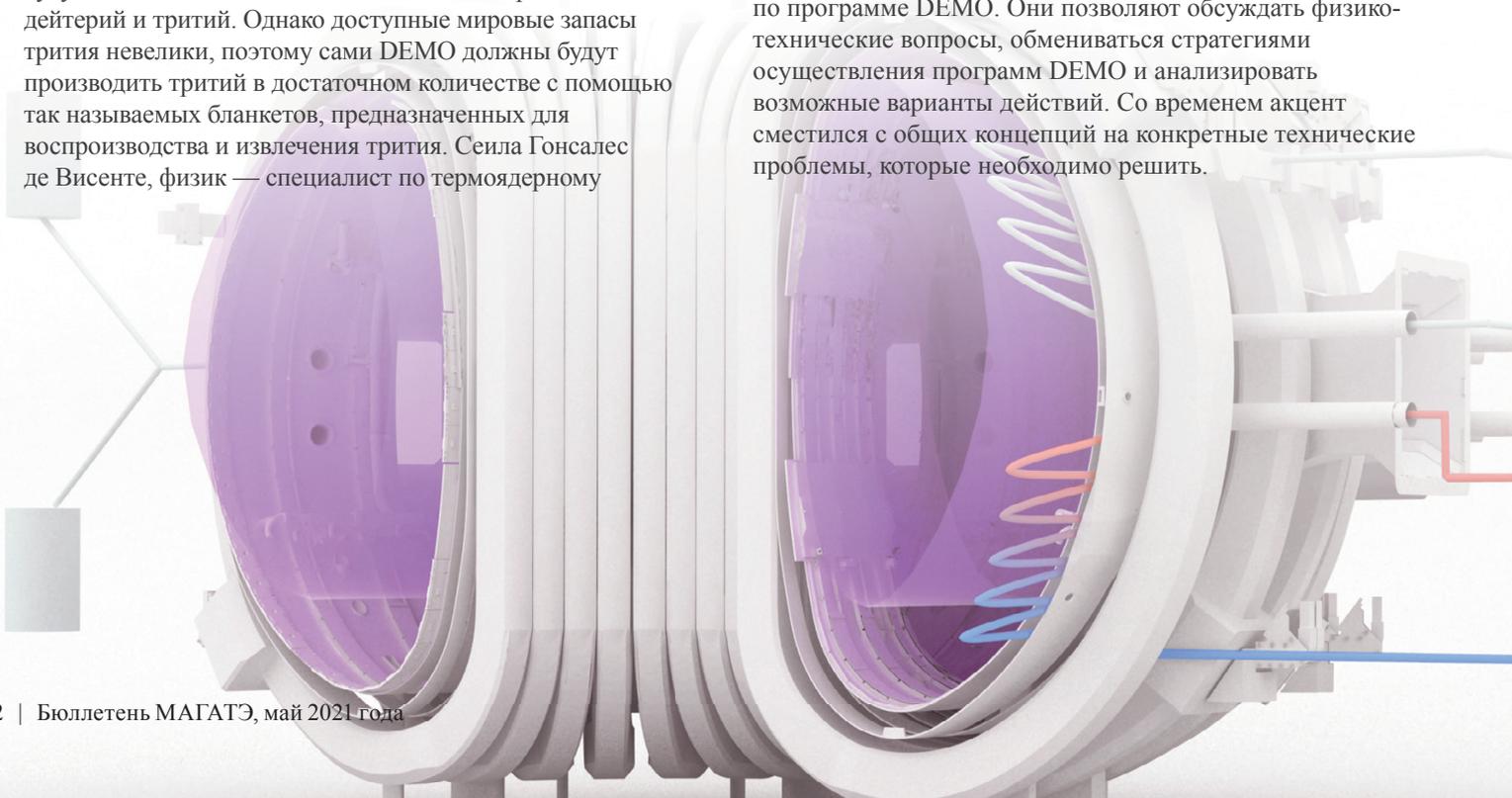
синтезу в МАГАТЭ, говорит, что также предстоит решить проблемы, связанные с подачей, улавливанием, удержанием, извлечением и отделением трития.

Еще одним важным отличием реакторов типа DEMO от существующих экспериментальных реакторов будет добавление систем и использование технологий поглощения термоядерной энергии и ее преобразования в электроэнергию.

«Для установок типа DEMO необходимо разработать и интегрировать сложные элементы и системы, которых нет на существующих экспериментальных термоядерных устройствах. Требуются, в частности, такие элементы, как бланкеты для воспроизводства трития, системы генерации электроэнергии и системы контроля горения, — рассказывает Элизабет Сарри, глава Отдела технологий Управления по атомной энергии Соединенного Королевства. — Условия работы DEMO особенно неблагоприятны для материалов, поскольку горячая плазма создает большой поток нейтронов и высокую плотность энергии на стенках. Для DEMO требуется разрабатывать новые материалы и технологии».

Роль МАГАТЭ

Концепции DEMO и подходы к их реализации изучают группы исследователей в разных странах. МАГАТЭ содействует международной координации и обмену наилучшей практикой, проводя технические совещания и — с 2012 года — регулярные семинары-практикумы по программе DEMO. Они позволяют обсуждать физико-технические вопросы, обмениваться стратегиями осуществления программ DEMO и анализировать возможные варианты действий. Со временем акцент сместился с общих концепций на конкретные технические проблемы, которые необходимо решить.



«На технических совещаниях МАГАТЭ и семинарах-практикумах по программе DEMO внимание сосредоточено на выявлении проблем и обсуждении проводимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, что позволяет нам совместно определять потребности и анализировать возможные решения. Один из примеров — появление серьезной проблемы управления плазмой на установках типа DEMO, когда требуется длительное или почти непрерывное удержание плазмы», — объясняет Сарри, выполнявшая функции председателя на последних трех семинарах-практикумах по программе DEMO в 2016–2019 годах.

Планы по всему миру

Хотя все еще рассматриваются различные варианты производства электроэнергии с помощью термоядерного синтеза, научно-технические вопросы, которые предстоит решить, в целом согласованы. Разные страны установили различные сроки, но общий консенсус среди ученых заключается в том, что они могут построить и ввести в эксплуатацию реактор типа DEMO, вырабатывающий электроэнергию, к 2050 году.

В Китае был достигнут существенный прогресс в планировании строительства Китайского испытательного термоядерного реактора (CFETR). Это устройство поможет преодолеть разрыв между ИТЭР и DEMO. Сооружение CFETR начнется в 2020-е годы, после чего в 2030-е годы будет построена установка DEMO.

В Европе за разработку DEMO отвечает консорциум EUROfusion. В настоящее время этот проект находится на этапе концептуального проектирования (2021–2027 годы). Он призван продемонстрировать осуществимость термоядерного синтеза с технической и экономической точки зрения путем производства нескольких сот мегаватт нетто-электроэнергии.

Индия объявила о том, что примерно в 2027 году она планирует приступить к сооружению устройства под названием SST-2, предназначенного для проверки концепций и элементов реактора для DEMO, а в 2037 году — к строительству самой установки DEMO.

Японская объединенная специальная проектная группа по термоядерной установке DEMO в настоящее время работает над концептуальным проектом DEMO с непрерывным потоком плазмы (JA DEMO). Строительство этого устройства должно начаться около 2035 года.

В 2012 году Республика Корея начала разработку концептуального проекта установки K-DEMO, намереваясь к 2037 году приступить к ее строительству, а в 2050 году — к производству на ней электроэнергии. На первом этапе (2037–2050 годы) K-DEMO будет использоваться для разработки и тестирования элементов, которые затем будут реализованы в ее конструкции. На втором этапе (после 2050 года) предполагается, что она сможет обеспечить выработку нетто-электроэнергии.

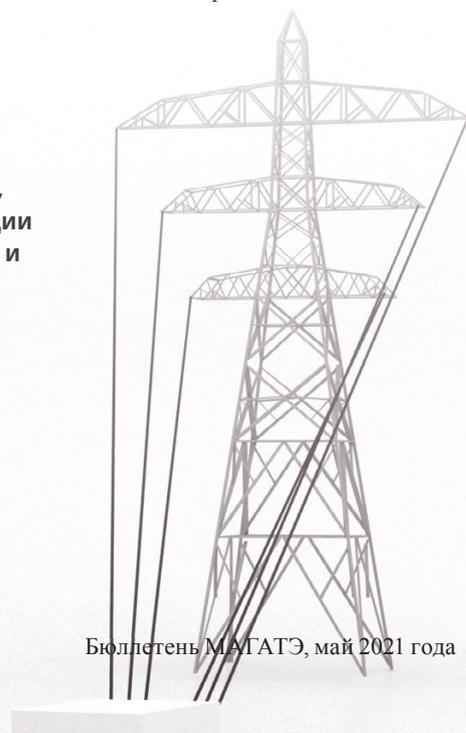
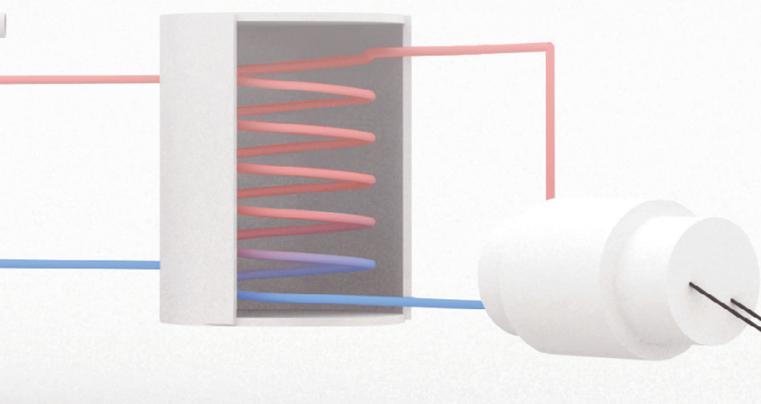
Российская Федерация планирует создать гибридную установку синтеза-деления с термоядерным источником нейтронов (ДЕМО-ТИН), в которой полученные в результате термоядерного синтеза нейтроны будут использоваться для преобразования урана в ядерное топливо и ликвидации радиоактивных отходов. ДЕМО-ТИН планируется построить к 2023 году в рамках национальной ускоренной стратегии по созданию термоядерной электростанции к 2050 году.

Эксперты по термоядерному синтезу в Соединенных Штатах Америки недавно опубликовали два доклада, в которых рекомендуется начать национальную научно-техническую программу, предусматривающую налаживание государственно-частного партнерства, чтобы в конечном итоге сделать термоядерный синтез коммерчески рентабельным. Этого планируется достичь в период 2035–2040 годов, чтобы сделать страну одним из лидеров в области термоядерного синтеза и ускорить ее переход к низкоуглеродной энергетике к 2050 году.

Параллельно с этим многочисленные коммерческие предприятия, получающие средства из частных источников, также делают успехи в развитии концепций термоядерных электростанций, опираясь на ноу-хау, появившиеся за годы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, финансируемых государствами, и предлагая еще более амбициозные сроки.

Художественное изображение термоядерной электростанции, преобразующей тепло от реакции термоядерного синтеза в тепло и электричество.

(Источник: EUROfusion)



Безопасность термоядерного синтеза

Процесс, безопасный по своей сути

Карли Уиллис и Джоанн Лю

При ядерном делении энергия образуется в результате расщепления атомных ядер, в то время как при термоядерном синтезе происходит их слияние с высвобождением энергии. Хотя обе атомные реакции производят энергию путем изменения атомов, их фундаментальные различия имеют далеко идущие последствия для безопасности.

Условия, необходимые для запуска и поддержания термоядерной реакции, делают невозможными аварии, которые способна вызвать реакция деления, или аварии с расплавлением активной зоны из-за цепной реакции. Для термоядерных электростанций потребуются запредельные условия — температуры свыше 100 миллионов градусов Цельсия, чтобы достичь достаточно высокой плотности частиц для протекания реакции. Поскольку термоядерные реакции могут происходить только в таких экстремальных условиях, неконтролируемая цепная реакция невозможна, объясняет Сеила Гонсалес де Висенте, физик — специалист по термоядерному синтезу в МАГАТЭ.

Для термоядерных реакций требуется постоянное поступление топлива, и они очень чувствительны к любым изменениям в эксплуатационных условиях. Поскольку термоядерная реакция может остановиться за несколько секунд, она по определению безопасна. «Термоядерный синтез — это самоограничивающийся процесс: если вы не сможете контролировать реакцию, она остановится сама собой», — добавляет Гонсалес де Висенте.

Кроме того, термоядерный синтез не приводит к образованию высокоактивных долгоживущих ядерных отходов. «В результате термоядерного синтеза производятся только радиоактивные отходы низкой активности, которые не представляют серьезной опасности», — отмечает Гонсалес де Висенте. Загрязненные предметы, такие как защитная одежда, чистящие средства и даже медицинские пробирки и тампоны, — это короткоживущие низкорadioактивные отходы, с которыми можно безопасно обращаться, соблюдая базовые меры предосторожности.

В большинстве современных экспериментальных термоядерных устройств в качестве топлива используется смесь дейтерия и трития. Тритий — это радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,3 года. Гонсалес де Висенте объясняет, что в результате термоядерной реакции высвобождаются нейтроны, которые ударяются о стенки, окружающие активную зону реактора, и поглощаются ими. «Нейтроны вступают в реакцию с литием, содержащимся в стенке, образуя тритий, который затем может быть вновь введен в установку».

При этом ядерные и термоядерные установки имеют некоторые общие черты, например в плане обращения с радиоактивным материалом и использования систем охлаждения. «Регулирующие органы имеют огромный опыт в сфере безопасности и физической безопасности при протекании реакции деления. Мы работаем с ними над обеспечением того, чтобы все накопленные знания применялись и в отношении термоядерного синтеза, — отмечает Гонсалес де Висенте — Однако не все может быть скопировано, поэтому следует определять и учитывать характерные для термоядерного синтеза отличия, такие как меньшее количество и разнообразие радиоактивных материалов, невозможность аварий с расплавлением активной зоны и отсутствие долгоживущих отходов. МАГАТЭ оказывает помощь в этих усилиях».

Международное сотрудничество

ИТЭР — крупнейший в мире экспериментальный проект в области термоядерного синтеза — объединяет экспертов из 35 стран, которые работают над тем, чтобы сделать термоядерные источники энергии реальностью, а также по мере развития проекта помогают решать проблемы безопасности и физической безопасности термоядерного синтеза.

Высокий уровень безопасности может быть обеспечен путем применения к термоядерному синтезу тех норм безопасности, которые относятся к ядерному делению, в том числе норм безопасности МАГАТЭ. К примеру, как и в случае с реакторами, работа которых основана на принципе ядерного деления, на проектируемых термоядерных установках должны учитываться регулирующие положения в отношении дозы, и установки следует конструировать таким образом, чтобы минимальная доза находилась на разумно достижимом низком уровне. Однако с учетом фундаментальных различий в риске аварий необходимо применять дифференцированный подход, чтобы избежать чрезмерного регулирования процесса термоядерного синтеза. «Проблема со всеми существующими нормами безопасности заключается в том, что они ориентированы на ядерное деление, — объясняет Стефан Кальпена, заместитель руководителя Департамента безопасности и качества Организации ИТЭР. — Нам необходимо отбирать нормы, актуальные для термоядерного синтеза, и применять их соразмерно риску, чтобы убедиться, что технология не только реализуема, но и действительно безопасна. Термоядерный синтез — это новый способ создания энергии, и это все еще очень молодая технология».

МАГАТЭ содействует развитию этой технологии, проводя технические совещания для экспертов в целях обмена знаниями, которые могут помочь в преодолении проблем термоядерного синтеза и обеспечении безопасности термоядерных установок. Первое совместное техническое совещание МАГАТЭ и ИТЭР по вопросам безопасности и радиационной защиты термоядерных реакторов, на котором Кальпена председательствовал в ноябре 2020 года, было посвящено разработке методологии определения потенциальных видов и количества радиоактивных или опасных материалов, которые могут быть выброшены термоядерными установками

в окружающую среду, а также подготовке применимых к термоядерному синтезу публикаций, аналогичных публикациям Серии норм безопасности МАГАТЭ № SSR-4 и SSG-12. В числе тем, охваченных на этом совещании, были критерии риска для термоядерных установок, а также проектирование и эксплуатация таких установок. На запланированном на октябрь 2021 года семинаре-практикуме по обращению с отходами, образующимися в процессе термоядерного синтеза, будет рассмотрено, как классифицировать и утилизировать радиоактивные отходы, появляющиеся в результате производства термоядерной энергии.

Монтаж одного из секторов вакуумной камеры ИТЭР — устройства массой 440 тонн, которое поможет удерживать плазму.

(Фото: ИТЭР)



Как базы данных МАГАТЭ помогают в исследованиях, призванных сделать возможным использование термоядерного синтеза на коммерческой основе

Александра Пеева

Чтобы реализовать перспективу использования термоядерного синтеза в коммерческих масштабах, необходимо лучше понимать плазму — ионизированный газ со сверхвысокой температурой — и разработать высокоэффективные материалы для реакторов. Базы данных МАГАТЭ, помогающие изучать поведение плазмы и позволяющие моделировать свойства материалов, используемых в термоядерных исследованиях, способствуют прогрессу в исследованиях, призванных в конечном итоге сделать возможным производство термоядерной энергии на коммерческой основе.

Ключевое значение для развития термоядерной энергетики имеет достижение и последующее поддержание экстремальных условий, необходимых для «термоядерного зажигания» — момента, когда термоядерная реакция начинает происходить за счет энергии, которую она сама генерирует. Участвующее в реакции плазменное топливо должно удерживаться в замкнутом пространстве достаточно долго для того, чтобы термоядерный синтез развился и обеспечил достаточный нагрев для самостоятельного протекания.

Для достижения эффекта зажигания инженеры также должны разработать высокоэффективные материалы для стенок реактора, способные выдерживать постоянный

поток энергии в виде выделяющегося тепла и нейтронов. Эта энергия нагревает стенки, а бомбардировка нейтронами может привести к повреждению материала. В результате либо будет нарушена целостность стенок, либо материал попадет в плазму и охладит ее.

Кроме того, материалы реактора должны поглощать как можно меньше трития — одного из изотопов водорода, входящего в состав термоядерного топлива. Поглощенное тритиевое топливо — это потерянное топливо для реакции. Но что более важно, тритий радиоактивен, и чтобы свести к минимуму количество и радиотоксичность образующихся в итоге ядерных отходов, стенки реактора в идеале не должны поглощать тритий и становиться радиоактивными.

Изучение поведения плазмы

Глубокое понимание того, как ведет себя плазма в реакторе, необходимо для увеличения продолжительности времени, в течение которого она может удерживаться магнитными силами. В базах данных МАГАТЭ содержится информация о процессах, происходящих в центральной и периферийной плазме, а также в системах инжекции потока нейтральных частиц, используемых для нагревания плазмы и ее последующего зажигания. В них также содержатся данные о свойствах различных примесей,

которые специально вводятся в плазму для целей диагностики и для повышения устойчивости.

База данных МАГАТЭ ALADDIN с функцией поиска представляет собой хранилище оцененных данных по столкновениям в рамках процессов, связанных с термоядерным синтезом. Она используется исследовательским сообществом для проведения диагностики плазмы и получения информации о важных параметрах плазмы, таких как температура и плотность. Используя ALADDIN, ученые могут лучше понять столкновительные и радиационные свойства ионов, что крайне важно для надежной диагностики плазмы.

Моделирование материалов для термоядерного синтеза

Создание новых материалов для будущих термоядерных электростанций усложняется из-за отсутствия установок, воспроизводящих экстремальные условия термоядерного реактора. Используя методы компьютерного моделирования, высокопроизводительные вычислительные платформы и аналитические экспериментальные средства характеристики, специалисты могут разрабатывать материалы, хорошо подходящие для термоядерной энергетики.

Благодаря моделированию открываются новые материалы и прогнозируется надежность существующих. Это особенно важно для внутренней стенки реактора, которая расположена ближе всего к плазме в корпусе реактора и защищает компоненты корпуса от повреждений, вызванных плазмой.

«Из-за экстремальных условий вблизи первой стенки термоядерного реактора требуется тщательно выбирать материалы, которые должны выдерживать высокие температуры и бомбардировку частицами, не подвергаясь при этом эрозии и не становясь хрупкими

или радиоактивными, а также не удерживая водородное топливо, — рассказывает Кристиан Хилл, руководитель Группы атомных и молекулярных данных МАГАТЭ. — Только имея надежные данные, полученные в результате точных расчетов и экспериментов, можно предсказать соответствующие свойства материалов, потенциально подходящих для использования».

Базы данных МАГАТЭ используются при проведении исследований в области термоядерной энергии и для других применений, связанных с наукой о плазме и соответствующими технологиями. МАГАТЭ собирает и оценивает данные в рамках своих сетей, проектов координированных исследований и технических совещаний и распространяет их через свои бесплатные курируемые онлайн-базы данных с функцией поиска.

«Ценность курируемой международной базы данных заключается в том, что она является постоянным, надежным и доступным хранилищем оцененных данных, которые могут бесплатно использоваться сообществом, занимающимся вопросами термоядерного синтеза. Группа атомных и молекулярных данных МАГАТЭ уникальна и в другом отношении: она существует уже более 40 лет, и это довольно значительный срок», — отмечает Хилл.

Базы данных МАГАТЭ постоянно совершенствуются и расширяются с учетом конкретных потребностей исследователей в данных. В частности, проводится количественная оценка данных, определяется степень их неопределенности и применяются методы проверки, организации и распространения данных.

Все базы данных по термоядерному синтезу, ведущиеся МАГАТЭ, доступны по ссылке: amdis.iaea.org/databases

Визуализация каскада столкновений, приводящих к повреждению кристаллического материала.

(Изображение предоставила Андреа Санди/ Университет Аалто)

Пылающая плазма

Важнейший шаг на пути к термоядерной энергетике

Маттео Барбарино

Идеальные условия для термоядерного синтеза существуют внутри солнечного ядра — это экстремально высокие температуры и огромное давление, создаваемое мощными силами гравитации.

Однако попытки воссоздания этих условий на Земле с помощью термоядерного реактора в отсутствие сильнейших гравитационных сил, присущих звездам, влекут за собой множество технических проблем. Самая большая из них — это поддержание термоядерной плазмы (заряженного газа, состоящего из ионов и свободных электронов, в котором происходит реакция) в нагретом состоянии при температуре более 100 миллионов градусов Цельсия, удержание ее частиц в магнитном поле и сближение их друг с другом на достаточно продолжительное время для того, чтобы они могли вступить в реакцию и высвободить энергию.

Понимание и проверка существующих гипотез о том, как ведет себя эта горячая термоядерная плазма, являются одними из ключевых вопросов, которые должны решить ученые и инженеры по термоядерному синтезу, чтобы в конечном итоге произвести электричество при помощи термоядерного синтеза.

Супертопливо для температур, превышающих температуру Солнца

Выбор топлива для термоядерного синтеза ограничен. Топливо, обладающее самым высоким потенциалом производительности на Земле, изготавливается из смеси ионов дейтерия и трития — двух более тяжелых форм водорода. При столкновении при экстремально высоких температурах происходит синтез дейтерия и трития с образованием заряженных частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, известных как альфа-частицы, а также свободных нейтронов. В то время как нейтроны выходят из магнитного поля и не взаимодействуют с плазмой, альфа-частицы удерживаются магнитным

полем и дополнительно нагревают окружающую плазму. «Управление этим нагревом имеет решающее значение для возможности использования термоядерной энергии», — говорит профессор Австралийского национального университета Мэтью Хоул.

Безопасная и устойчивая термоядерная энергетика полагается на эти заряженные альфа-частицы и их энергию для поддержания постоянной температуры нагрева плазмы, что позволяет реакциям быть самоподдерживающимися. Достижение этого условия имеет решающее значение для эксплуатации термоядерного реактора.

В 1990-х годах экспериментальные термоядерные реакторы производили до 16 мегаватт (МВт) мощности в течение периода времени продолжительностью менее секунды. В ходе тех экспериментов альфа-частицами обеспечивалось лишь около десяти процентов нагрева, а остальное — внешними нагревателями. Понимание того, что происходит, когда альфа-частицы обеспечивают большую часть нагрева, будет приобретаться в ходе реализации инициатив, подобных ИТЭР — международного экспериментального реактора, сооружение которого ведется на территории Франции (см. статью на стр. 10).

«ИТЭР предоставит нам возможность изучения “пылающей плазмы”, в которой не менее 66 процентов всего нагрева будет происходить за счет синтеза альфа-частиц. В этих условиях ИТЭР будет производить 500 МВт термоядерной энергии в течение периода времени продолжительностью до 500 секунд», — объясняет руководитель научного отдела Организации ИТЭР Альберто Лоарте. По его словам, эксперименты, которые будет проводить эта организация, дадут столь необходимые ответы на такие ключевые вопросы физики пылающей плазмы, как способы создания плазмы, которая самоподдерживается за счет внутреннего нагрева собственными альфа-частицами, и выбор оптимальных эксплуатационных условий для высокопроизводительного термоядерного синтеза, совместимых с возможностями стенки реактора по преобразованию энергии.

Как сделать плазму самоподдерживающейся

Важным показателем производительности термоядерного реактора является его «коэффициент усиления термоядерной энергии», который определяется температурой, плотностью и временем удержания энергии плазмы — мерой эффективности поддержания магнитным полем энергии плазмы с течением времени. Для создания самоподдерживающейся реакции требуются три условия: температура около 100 миллионов градусов Цельсия; плотность, которая в миллион раз меньше плотности воздуха; и удержание энергии в течение периода времени продолжительностью всего несколько секунд.

Хотя необходимые условия хорошо понятны, способ их одновременного достижения далеко не очевиден. Например, увеличение плотности плазмы в принципе выгодно, поскольку оно увеличивает вероятность реакций синтеза. Однако, по словам заместителя директора по термоядерному синтезу в Принстонской лаборатории физики плазмы в Соединенных Штатах Америки Ричарда Гаврилюка, как показывают многие эксперименты, по мере приближения плотности к максимуму удержание плазмы работает хуже, чем предполагалось.

Для успеха эксперимента ИТЭР необходимо найти решения этих проблем, а большая часть таких исследований возможна только в рамках международного сотрудничества. Технические совещания МАГАТЭ по вопросам физики энергетических частиц, управления плазмой, а также сбора, проверки и анализа данных о термоядерном синтезе обеспечивают площадку для обмена научными и техническими результатами и помогают разрабатывать инструменты моделирования, которые могут быть использованы для прогнозирования поведения термоядерной плазмы в ИТЭР и будущих термоядерных энергетических реакторах.

Поиск оптимальных условий

Одна из самых сложных задач — это найти оптимальные условия эксплуатации с обеспечением максимальной мощности термоядерного синтеза и управления плазмой, которые бы создавали возможности высокой производительности без нарушения эксплуатационных границ в течение длительных периодов времени. Нарушение эксплуатационных границ проблематично, поскольку это может вызвать нестабильность, которая

может привести к разрушению плазмы в результате явления, известного как «срыв плазмы».

«В тороидальном реакторе типа токамака, таком как ИТЭР, в результате срыва за несколько миллисекунд может произойти стремительное разрушение плазмы и возникнуть значительное тепловое и механическое напряжение компонентов реактора, — объясняет научный координатор секции стабильности и управления Организации ИТЭР Майкл Ленен. — МАГАТЭ помогает избежать этого сценария, содействуя обмену информацией об экспериментальных и теоретических работах, а также моделированию в этой области, уделяя особое внимание в ближайшие несколько лет разработке прочной основы для создания конструкции системы ИТЭР для предотвращения срывов».

Недавние эксперименты и работы по моделированию, включающие методы, основанные на искусственном интеллекте, проливают свет на требуемые условия для обеспечения эффективного управления плазмой, помогая проложить путь к безопасному проектированию и эксплуатации будущих термоядерных электростанций. «Применение высокопроизводительных усовершенствованных статистических методов и подходов на основе машинного обучения к исследованию срывов может помочь выявить существенные закономерности и раскрыть информацию, которая скрывается в накопленных за годы экспериментальных данных», — говорит научный сотрудник Центра науки и синтеза плазмы Массачусетского технологического института (МТИ) Кристина Ри.

При разработке новых решений, позволяющих избежать нарушения границ, возникает продуктивная синергия между физиками, занимающимися теорией управления, специалистами по моделированию, разработчиками сценариев и инженерами по обработке данных. Необходимо провести дополнительную работу по оценке применимости этих методологий, основанных на данных, для таких проектов, как ИТЭР, однако результаты, по словам Ри, уже являются обнадеживающими.

Визуализация потока высокоэнергетических частиц в состоянии плазмы внутри ректора типа токамак.

(Фото: Shutterstock)

Совершенствование материалов и технологий для термоядерного синтеза

Маттео Барбарино

Самым сложным научным и инженерным проектом на Земле, безусловно, является термоядерный синтез. Сооружение термоядерного реактора, достижение самоподдерживающейся реакции и преобразование этой практически неисчерпаемой энергии в электричество навсегда изменят человечество и наши отношения с энергией. Но как бы заманчиво все это ни звучало, путь к этой цели нельзя назвать ни легким, ни гладким. Технические задачи, касающиеся конструкций, топлива и материалов, которые необходимо использовать при создании столь сложных агрегатов, остаются лишь частично решенными.

Чтобы понять технические ограничения и пробелы в знаниях, существующие на сегодняшний день в области энергии ядерного синтеза, достаточно заглянуть внутрь самого реактора.

Внутри реактора токамака (см. статью на стр. 6) сверхгорячий ионизированный газ или «плазма» нагревается до температуры более 100 миллионов градусов Цельсия (°C), чтобы вызвать реакции синтеза. Стенки реактора защищены от летучей плазмы за счет ее удерживания мощными магнитными полями.

Используемая в термоядерном синтезе плазма обычно состоит из дейтерия и трития, представляющих собой два тяжелых изотопа водорода, которые сливаются с образованием гелия и нейтронов. На термоядерных электростанциях инженеры надеются «размножить» или воспроизводить дополнительный тритий за счет самой реакции с помощью еще не прошедшего испытания содержащего литий защитного экрана — blankets, который взаимодействует с нейтронами, возникающими в результате синтеза.

«Энергия нейтронов, которые образуются в результате термоядерного синтеза, создает серьезные проблемы для первой стенки и вакуумной камеры термоядерной электростанции, а это означает, что необходимо уделять внимание радиационным повреждениям, биологической защите, дистанционному манипулированию и безопасности», — объясняет генеральный директор Управления по атомной энергии Соединенного Королевства Ян Чепмен.

Главной задачей инженеров является разработка высокоэффективных материалов, которые способны выдерживать наблюдаемые в процессе реакции высокие температуры и интенсивные потоки нейтронов. Понимание воздействия условий эксплуатации на компоненты, обращенные непосредственно к плазме, также имеет важное значение для будущего крупномасштабных термоядерных электростанций.

Материалы, созданные для экстремальных условий

Создание конструкционных и обращенных непосредственно к плазме материалов, способных противостоять деструкции под воздействием нейтронов, является приоритетной задачей для исследователей. Эти материалы должны иметь такие характеристики безопасности, как низкая наведенная радиоактивность, возникающая под действием нейтронов, чтобы свести к минимуму образование радиоактивных отходов. Однако на сегодняшний день нет достаточного количества специализированных установок для термоядерного облучения, где можно было бы испытывать механизмы радиационной деструкции, а также разрабатывать и проверять материалы в необходимых условиях.



МАГАТЭ помогает решать вопросы, связанные с разработкой и исследованиями материалов для термоядерного синтеза, за счет координации подготовки руководящих принципов в отношении методов испытаний эталонных материалов и устранения пробелов в знаниях в области проектирования установок для испытаний материалов и компонентов, используемых в термоядерных реакторах.

«Такие технологии, как тандемная ионно-лучевая установка, введенная в строй в 2019 году в Институте им. Руджера Бошковица в Хорватии при поддержке МАГАТЭ, могут имитировать условия, в которых материал оказывается внутри термоядерного реактора. Эти условия включают трансмутацию продуктов и моделирование повреждений, вызываемых энергетическими нейтронами и частицами, которые образуются в результате термоядерного синтеза», — говорит директор Отдела физических и химических наук МАГАТЭ Мелисса Денекке.

Главным элементом реактора, где плазма вступает в непосредственный контакт с корпусом реактора, является так называемый «дивертор», и ученые и инженеры стремятся найти его оптимальную конфигурацию, чтобы он лучше выдерживал тепловые потоки, с которыми он соприкасается. Используя знания и данные, полученные с помощью различных экспериментов по облучению и инструментов моделирования, они также разрабатывают и проверяют систему критериев конструкции реактора для всех компонентов, находящихся внутри корпуса, в том числе диверторов.

Очень горячие выхлопы

Расположенный в большинстве конструкций в самой нижней части реактора, куда отводятся загрязнения, такие как гелиевая «зола», дивертор служит «выхлопной трубой» термоядерного реактора, и именно туда направляется любое избыточное тепло. Такая конфигурация помогает производить «более чистую» плазму, способную лучше удерживать энергию, что является критически важным параметром для производительности термоядерного устройства,

обеспечивая тем самым достаточный нагрев плазмы в течение достаточно продолжительного периода времени для того, чтобы могли происходить устойчивые реакции термоядерного синтеза.

В ИТЭР, крупнейшем в мире экспериментальном термоядерном реакторе, дивертор будет выполнен из 54 «кассет», каждая весом 10 тонн. К кассетным сборкам будут предъявляться очень высокие требования; с учетом постоянных тепловых потоков от 10 до 20 мегаватт на квадратный метр и воздействия температур от 1000°C до 2000°C на отдельные элементы кассеты необходимо будет заменить по крайней мере один раз в течение срока службы агрегата с помощью дистанционного манипулятора. Чтобы справиться с экстремальным нагревом и вызывающими повреждения частицами, компоненты, обращенные непосредственно к плазме, будут бронированы вольфрамом — материалом, который одновременно имеет низкий показатель поглощения трития и самую высокую температуру плавления среди всех существующих в природе химических элементов.

«Несмотря на то, что в конструкции дивертора ИТЭР нашли отражение наши самые актуальные знания и возможности с точки зрения физики и технологий, для будущих термоядерных электростанций потребуются новые разработки. Одна из многочисленных важных задач проекта ИТЭР как раз и заключается в их определении», — объясняет Ричард Питтс, руководитель секции экспериментов и работы с плазмой Организации ИТЭР.

Проектирование и строительство будущих термоядерных реакторов будет зависеть от связанных с техникой, технологиями и материалами результатов осуществления ИТЭР и других общепризнанных многонациональных координированных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, но расстояние, отделяющее нас от будущего, обеспеченного энергией за счет термоядерного синтеза, продолжает сокращаться с каждым днем.

В Институте им. Руджера Бошковица в Хорватии при поддержке МАГАТЭ была введена в строй тандемная пучковая установка для облучения материалов, способных выдержать реакцию синтеза, ионами гелия.

(Фото: МАГАТЭ)



Объединяя страны посредством исследований и сотрудничества в области термоядерного синтеза

Элоди Бруссар

«Цельтесь в Луну. Даже если вы промахнетесь, то все равно окажетесь высоко среди звезд», — сказал как-то писатель Норман Винсент Пил. Когда речь идет о термоядерном синтезе, ученые метят очень высоко, пытаясь выяснить, можно ли производить электричество с помощью термоядерной энергии в промышленных масштабах здесь, на Земле.

Исследованиями в области физики плазмы и разработкой технологий термоядерного синтеза занимаются специалисты из примерно 50 стран мира. Многие из этих стран стремятся активизировать свои исследовательские программы в области термоядерного синтеза в условиях быстро растущего спроса на энергию и ускорения климатических изменений в результате сжигания ископаемого топлива.

В целях содействия текущим международным усилиям МАГАТЭ предлагает государствам-членам целый спектр видов деятельности по проведению исследований и созданию потенциала, иногда на региональном уровне, помогая тем самым ликвидировать существующие между странами разрывы в знаниях и опыте в области термоядерного синтеза.

Последние 50 лет МАГАТЭ оказывает поддержку исследованиям и разработкам в области термоядерного синтеза по всему миру, организуя различные форумы, посвященные вопросам термоядерного синтеза, включая проводимую каждые два года международную

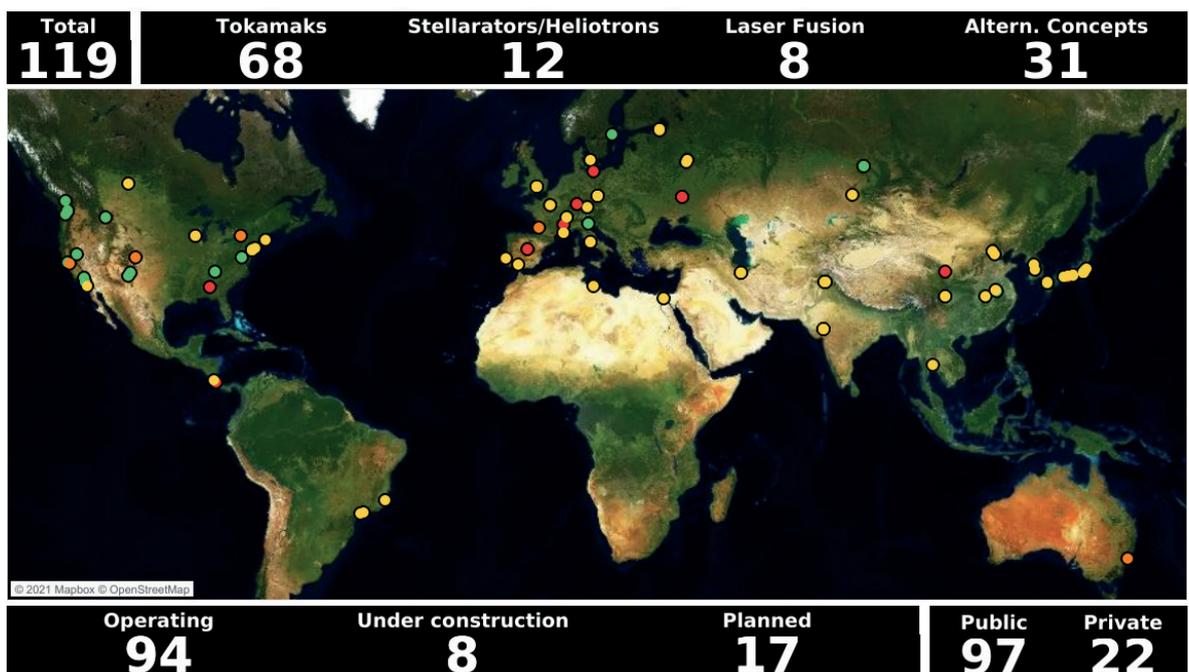
конференцию по энергии термоядерного синтеза. МАГАТЭ также организует семинары-практикумы по демонстрационным концепциям термоядерных электростанций и технические совещания по темам, касающимся науки и техники в области термоядерного синтеза, а также ведет деятельность в области координированных исследований, посредством которых оно объединяет организации и ученых для решения ключевых вопросов, представляющих общий интерес.

Посредством своих публикаций, посвященных термоядерному синтезу, таких как журнал «Ядерный синтез» и другие серии изданий, МАГАТЭ распространяет знания и информацию и содействует ознакомлению научного сообщества с передовыми идеями. В дополнение к ведению информационного портала о термоядерном синтезе и базы данных по термоядерным устройствам МАГАТЭ создало библиотеки числовых данных фундаментальных молекулярных и ядерных данных, которые крайне необходимы для исследований и разработки технологий в области термоядерного синтеза. В сотрудничестве с многочисленными партнерами МАГАТЭ также организует и поддерживает образовательные и учебные мероприятия по термоядерному синтезу, включая международные и региональные школы и семинары-практикумы.

МАГАТЭ оказывает поддержку Коста-Рике, которая является новичком на мировой арене термоядерного

На сегодняшний день более 100 термоядерных устройств (государственных и частных) находятся в эксплуатации, процессе строительства или планирования.

(Источник: Информационная система МАГАТЭ по термоядерным устройствам).





Токамак НТ-6М, переданный Таиланду в 2018 году, является одним из главных элементов «дорожной карты» этой страны в области термоядерного синтеза.

(Фото: ИФПАК, Китай)

синтеза, чтобы она могла сократить свое отставание от других стран посредством технического развития и создания потенциала. В ходе семинара-практикума, организованного в 2019 году Технологическим институтом Коста-Рики при поддержке МАГАТЭ, участники из стран Латинской Америки имели возможность принять участие в совместных экспериментах и пройти обучение эксплуатации на двух малых термоядерных устройствах, размещенных в институте.

Укрепление связей между лидерами в области термоядерного синтеза и другими вносящими вклад странами

Шесть стран и Европейский союз, который представляет ЕвРАТОМ, сотрудничают в рамках крупнейшего в мире эксперимента в области термоядерного синтеза — ИТЭР, экспериментального термоядерного реактора, сооружение которого ведется на территории Франции (см. статью на стр. 10).

«Для стран, которые не являются частью проекта ИТЭР, МАГАТЭ выполняет важную связующую функцию, передавая знания, полученные ИТЭР, более широкому сообществу и наоборот. Это делается посредством организации технических совещаний, семинаров-практикумов, школ и подготовки электронных учебных материалов с участием экспертов ИТЭР» — говорит Данас Ридикас, начальник Секции физики МАГАТЭ.

Вдохновляя новое поколение в странах Юго-Восточной Азии

Организуемая с 2014 года Ассоциацией государств Юго-Восточной Азии (АСЕАН) школа по физике плазмы и термоядерному синтезу является одним из ключевых мероприятий, направленных на содействие началу реализации программы термоядерного синтеза в Таиланде и углублению исследований в области термоядерного синтеза в регионе. В январе 2020 года школа получила поддержку со стороны МАГАТЭ и ИТЭР, которые помогли наладить взаимодействие между молодыми учеными и ведущими международными исследователями. «МАГАТЭ пригласило экспертов, которые поделились своими знаниями и опытом и сильно вдохновили

молодое поколение», — рассказывает Канчалика Дечатес, начальник отдела международного сотрудничества Таиландского института ядерных технологий (ТИЯТ). В этой сессии школы приняли участие более 80 молодых исследователей из стран региона.

В целях укрепления программ обучения и сотрудничества между исследовательскими группами в развитых и развивающихся странах с 2004 года МАГАТЭ осуществляет проект координированных исследований по термоядерным устройствам малой и средней мощности, в котором принимают участие исследователи из 19 стран. «Этот проект дает таиландским исследователям возможность знакомиться и сотрудничать со многими экспертами по всему миру», — говорит Буньярит Чаттонг, доцент Университета им. Принца Сонгкла в Таиланде.

Такое долгосрочное партнерство позволяет проводить совместные и сравнительные эксперименты, готовить персонал из разных организаций и стран, а также обучать новое поколение ученых в области термоядерного синтеза передовым теориям и методам. «С появлением в ближайшем будущем в Таиланде первого в его истории термоядерного устройства этот проект позволит нам начать реализацию нашей собственной программы термоядерного синтеза», — добавляет Чаттонг.

Строительство экспериментального токамака (см. статью на стр. 6) в Таиланде является центральным мероприятием национальной программы создания термоядерной энергетики. Это будет первое термоядерное устройство на территории АСЕАН, которое станет важнейшей платформой для обучения исследователей из Таиланда и стран АСЕАН.

В 2018 году МАГАТЭ выделило таиландским ученым и инженерам гранты для участия в Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза, которая проходила в Индии. В том же году один исследователь из Таиланда принял участие в сессии совместного колледжа МЦТФ-МАГАТЭ по физике плазмы в Италии, где собрались около 70 аспирантов, докторантов и прочих молодых исследователей из 23 стран, что способствовало налаживанию международного сотрудничества.

Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству

Михаэль Амди Мадсен

Еще в 1920-х годах ученые самозабвенно рассказывали о потенциале термоядерной энергии, но до недавнего времени коммерческий термоядерный синтез оставался далекой мечтой. Чтобы лучше понять, почему после десятилетий исследований термоядерный синтез все еще не является частью мирового энергетического баланса и почему такое положение дел неизбежно изменится, мы поговорили с Мелани Уиндридж, директором отделения Ассоциации участников освоения термоядерного синтеза в Соединенном Королевстве, консультантом по коммуникациям в компании «Tokamak Energy» и основателем «Fusion Energy Insights».

Вопрос (В.): Есть старая шутка, что «термоядерный синтез — это такая технология, для которой всегда нужно еще 30 лет». Это так?

Ответ (О.): Эта классическая шутка о термоядерном синтезе немного печальная, потому что на самом деле определенные достижения уже есть. И сегодня уже налицо различные факторы, позволяющие ускорить прогресс в области термоядерного синтеза. Во-первых, наука продвинулась вперед — теперь у нас есть хорошее понимание физики плазмы, и с помощью таких концептуальных разработок, как токамаки, удалось запустить термоядерные реакции. Кроме того, появились новые технологии, такие как высокопроизводительные вычисления, позволившие усовершенствовать процессы имитации и моделирования плазмы, искусственный интеллект и машинное обучение, содействующие оптимизации и управлению операциями, и высокотемпературные сверхпроводники, которые могут создавать гораздо более сильные магнитные поля для более надежного удержания термоядерного топлива. Существующие сегодня гораздо более мощные и эффективные лазеры могли бы подстегнуть развитие инерционного термоядерного синтеза, а достижения в области промышленного производства могли бы помочь снизить стоимость экспериментов и будущих термоядерных электростанций.

Важно отметить, что в настоящее время общественность проявляет все больший интерес к техническим решениям, помогающим в борьбе с изменением климата, и правительства устанавливают целевые показатели по нулевым выбросам. Вопросами термоядерного синтеза занимается также частный сектор, который на сегодняшний день смог привлечь инвестиции на сумму примерно 2 млрд долл. США. В Ассоциацию участников освоения термоядерного синтеза в настоящее время входят примерно 25 членов, и даже нефтегазовые компании начинают проявлять интерес к термоядерному синтезу.

В.: Для решения проблемы изменения климата многие страны стремятся добиться крупномасштабной декарбонизации к 2030 году и углеродной нейтральности к 2050 году. Не слишком ли поздно



«Даже если термоядерная энергетика не появится к тому времени, чтобы внести свой вклад в достижение целей, поставленных на 2050 год, она будет востребована во второй половине века, когда спрос на энергию вырастет еще сильнее».

Мелани Уиндридж, директор отделения Ассоциации участников освоения термоядерного синтеза отделения в Соединенном Королевстве

появится термоядерная энергетика, чтобы что-то изменить?

О.: Русский физик Лев Арцимович однажды сказал: «Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству». Я думаю, что это так и есть. В идеале хорошо бы было решить проблему термоядерного синтеза 30 лет назад, тогда сегодня эта технология была бы готова к массовому внедрению. Но в прошлом еще не созрели условия для осуществления термоядерного синтеза, и не существовало надлежащих стимулов или возможностей.

Таким образом, даже если термоядерная энергетика не появится к тому времени, чтобы внести свой вклад в достижение целей, поставленных на 2050 год, она будет

востребована во второй половине века, когда спрос на энергию вырастет еще сильнее. Но нам нужно приложить максимальные усилия уже сейчас, чтобы полученная при помощи термоядерного синтеза электроэнергия поступила в распределительные сети раньше 2050 года.

В.: Какие препятствия, по вашему мнению, могут сдерживать развитие технологии и как их можно преодолеть?

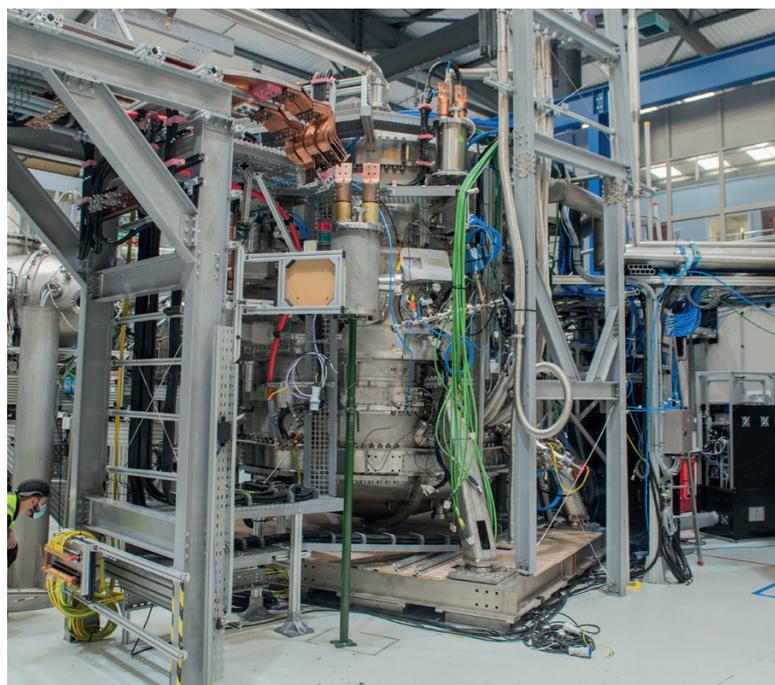
О.: Существует целый ряд трудностей, которые мы должны преодолеть, и они возникают на разных этапах. Первая задача — это получение в процессе термоядерной реакции большого количества энергии, чем мы в нее вкладываем. Мы называем этот рубеж «равновесие». После превышения точки равновесия нам нужно будет построить пилотную станцию, которая сможет вырабатывать электроэнергию. Как только это увенчается успехом, мы сможем планировать коммерческое развертывание.

Для перехода от «равновесия» к получению первого электричества необходимо решить существующие технические задачи, такие как способы извлечения энергии и «размножение» большого количества трития. Условия, в которых происходит термоядерный синтез, также представляют сложности с точки зрения выбора материалов. Для него требуются экстремальный нагрев и охлаждение, если вы используете сверхпроводящие магниты, а также сильные магнитные поля. Однако энергетические нейтроны представляют собой наибольшую проблему, поскольку они могут быть очень деструктивными для материалов. Таким образом, весьма вероятно, что нам придется время от времени заменять некоторые компоненты электростанций, поэтому нам нужно сконструировать такой агрегат, в котором это можно было бы делать быстро, легко и экономично.

Помимо физических и инженерных вопросов, сообщество термоядерного синтеза также должно решить с правительствами вопросы регулирования, чтобы, когда мы будем готовы к строительству, не возникало препятствий в процессе лицензирования. Наконец, существует такой аспект, как общественное признание и обеспечение того, чтобы люди тоже поддерживали развитие термоядерной энергетики. Нам нужно думать обо всех этих проблемах и начинать говорить о них уже сейчас. На самом деле именно этим мы и занимаемся.

В.: Сегодня почти 800 миллионов человек не имеют надежного доступа к электроэнергии. Является ли термоядерный синтез решением для этих людей и что делает отрасль для вовлечения развивающихся стран?

О.: Когда в 1985 году в Женеве в ходе знаменитой встречи у каминa Рейган и Горбачев задумали международный проект в области термоядерного синтеза, ИТЭР, они заявили, что хотели бы обеспечить энергией термоядерного синтеза все человечество, и эта цель все еще остается актуальной. В рамках ИТЭР планируется открытая для всех стран образовательная программа, направленная на подготовку перспективных кадров в области термоядерного синтеза. Это будет важной задачей, если мы планируем внедрить термоядерную энергетику по всему миру.



Токамак ST40, который построила и эксплуатирует частная компания «Tokamak Energy».

(Фото: Tokamak Energy)

В настоящее время начинает формироваться сотрудничество между государственным и частным секторами, призванное снизить затраты и разделить риски. В развивающихся странах это сотрудничество между государственным и частным секторами будет иметь особенно важное значение и, вероятно, потребует межправительственной помощи.

В.: Как правило, физикой и ядерными науками занимаются в основном мужчины. А как обстоят дела с обеспечением большей гендерной сбалансированности в этой отрасли?

О.: О гендерном дисбалансе в физике и в области термоядерного синтеза известно давно, и инициативы по изменению такого положения дел уже предпринимались, однако этот процесс будет идти медленно, на протяжении нескольких поколений.

Вот уже почти 20 лет я участвую в инициативах, направленных на изменение гендерных представлений. Некоторые крупные лаборатории активно занимаются решением гендерного вопроса с помощью программ, направленных на расширение разнообразия кадрового состава и создание сетей для обеспечения большей инклюзивности. Для частных компаний, в которых обычно работает очень мало сотрудников, это более сложная задача.

Этой работой должны заниматься не только лаборатории, но и каждый из нас по отдельности. Недавно я создала в сети Instagram профиль @womeninfusion, чтобы рассказывать о женщинах, работающих в этой области, и тем самым стимулировать интерес следующего поколения девочек к занятиям физикой.

Мечтатели и прагматики

Зачем термоядерной энергетике частные предприятия и стартапы?

Саймон Вудраф



Саймон Вудраф — основатель и президент американской компании «Woodruff Scientific», которая по контракту с частными и государственными учреждениями занимается исследованиями и разработками в области технологий термоядерного синтеза для ускорения создания экономически эффективной

термоядерной энергетике. Будучи активным участником сообщества термоядерной отрасли, Вудраф проводит ежегодные учебные сессии по научным вычислениям для студентов старших курсов. Ранее он также занимался организацией национальных семинаров-практикумов по научным исследованиям в области энергии термоядерного синтеза. В настоящее время является участником двух инициатив МАГАТЭ по компактным термоядерным источникам нейтронов и развитию частного сектора в области термоядерного синтеза.

Основная предпосылка для развития частного предпринимательства в области термоядерного синтеза заключается в существовании множества возможностей извлечения прибыли из этого процесса и в том, что частные инициативы могут дополнять государственные программы. Достаточно посмотреть на

индустрию космических запусков, чтобы понять, о чем идет речь. Сочетание нескольких продуманных программ государственно-частного партнерства под руководством правительства США способствовало общему сокращению стоимости космических запусков. На примерах «SpaceX», «Blue Origin» и других компаний видно, как этого можно добиться.

Частные «термоядерщики» думают в том же направлении и пытаются ответить на следующие вопросы: как удешевить процесс? Как можно использовать последние инновации в областях материаловедения, технологий и искусственного интеллекта для достижения экономической эффективности? Как снизить общие капитальные затраты и стоимость электроэнергии, чтобы системы на основе термоядерного синтеза могли конкурировать со станциями комбинированного цикла, работающими на природном газе?

Я очень внимательно слежу за историей частных предприятий в области термоядерного синтеза еще со времени своих постдокторских исследований в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в 1999 году. Министерство энергетики США вело небольшую программу под названием «Инновационные концепции удержания» (ИКУ), в рамках которой шла работа над вариантами более простых и легко реализуемых с инженерной точки зрения концепций в области термоядерного синтеза. Я помог организовать серию семинаров-практикумов в рамках ИКУ, которая довольно удачно пересеклась с термоядерными концепциями, разработкой которых занимался частный сектор. Недалеко от Ливермора как раз создавалась и начинала свою работу компания «TAE Technologies», которая тогда называлась «Tri Alpha Energy»; чуть дальше,

в Ванкувере, Канада, только приступала к деятельности компания «General Fusion», а в Соединенном Королевстве в то же время создавалась компания «Tokamak Energy», тогда называвшаяся «Tokamak Solutions».

В 2004 году я ушел из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, чтобы последовать их примеру и посмотреть, сможем ли мы действительно ускорить внедрение термоядерных энергетических систем на коммерческом рынке. За прошедшие с тех пор 22 года эти термоядерные «мечтатели» смогли совокупно привлечь более 1,5 млрд долл. США на реализацию своих концепций, и вокруг этих усилий по исследованию термоядерного синтеза возникла целая растущая отрасль.

Частные термоядерные предприятия настроены оптимистично, часто даже чересчур. Именно из-за работы на стыке предпринимательства и передовых технологий они имеют репутацию своего рода секты у технических директоров и генеральных директоров компаний, работающих в других отраслях. Но следует отметить, что большие надежды все же имеют широкое распространение. Многие «термоядерщики» из частного сектора начинали работать в государственных программах, имевших горизонт развития продолжительностью более 20 лет, однако теперь они обсуждают «безубыточность» и «раскрутку» в условиях неоднородной экосистемы стартапов. Отчасти им помогает Агентство передовых исследований в области энергетики, которое работает над переносом результатов обычной работы в лабораториях в промышленный сектор посредством серии небольших программ, таких как «ALPHA», «BETA», «GAMOW» и «OPEN», которых, как я полагаю, будет становиться все больше.

Программа вывода технологий на рынок (T2M) теперь также является актуальной для термоядерной отрасли. Регулярно обсуждаются стратегии «выхода»: купят ли стартап, выйдет ли он на рынок, будет ли он продавать интеллектуальную собственность?

Сможем ли мы это сделать до того, как нужно будет вернуть средства инвестиционному фонду?

С тех пор как я ушел из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, мне посчастливилось

построить свою карьеру, работая с частными предприятиями в области термоядерного синтеза — от занимавшегося ультразвуковым термоядом стартапа в Грасс-Вэлли, Калифорния, до созданной под эгидой МТИ спин-аут компании, для которых мне удалось привлечь ошеломляющие 200 млн долл. США в виде инвестиций категории А. Очевидно, что в мире снова растет интерес как к углеродной нейтральности, так и к безубыточности. Каждый предприниматель и предприятие имеют собственный технический подход (однако, как правило, он основывается на принципе «чем меньше, тем лучше») и немного разные представления о плане коммерциализации — некоторые стремятся быть «мечтателями», где все усилия направлены на то, чтобы первыми выйти на рынок с какой-то новой технологией производства электроэнергии. Но «мечтатели» (которых, возможно, 20 в общей сложности по всему миру) составляют лишь крошечную часть экосистемы малого бизнеса, предлагающего продукты и услуги для термоядерного синтеза.

В США существует программа грантов малым предприятиям на проведение инновационных исследований, через которую оказывается поддержка сотням компаний, занимающимся вопросами термоядерного синтеза, будь то производство игнитронов или конденсаторов, имитационное моделирование, разработка новых материалов для технологии послойного синтеза или изучение новых методов диагностики. Малые предприятия имеют более низкие накладные расходы, чем крупные лаборатории. Они являются гибкими и подвижными — могут один год продавать одну линейку продуктов, а на следующий год предлагать уже совсем другой набор решений. Кроме того, они являются новаторами, которые никогда не забывают о самых важных проблемах и всегда ищут решения, а также концентрируются на том, что в конечном итоге сможет позволить энергии термоядерного синтеза выйти на рынок.

Это значит, что сегодня стартапы и малые предприятия уже являются частью термоядерной отрасли. Будущее за малым бизнесом!

Визуализация потока высокоэнергетических частиц внутри реактора типа токамак.

(Изображение: Shutterstock)

Безопасная вода: сделать воду из водоносных горизонтов в Иордании пригодной для питья позволит разработанная при поддержке МАГАТЭ водоочистная установка



Введенная в эксплуатацию в декабре 2020 года водоочистная установка дает возможность использовать более древние подземные водоносные горизонты в песчанике.

(Фото: А. Аль-Сайахин/ВАИ)

В Иордании, где нехватка воды вызывает растущее беспокойство, новая установка очистки подземных вод, разработанная при поддержке МАГАТЭ, вскоре начнет подавать высококачественную питьевую воду в тысячи домов в мухафазе Акаба на самом юге страны. Принцип работы пилотной системы очистки, впервые применяемой в Иордании, заключается в удалении из подземных вод природных радионуклидов, что позволяет Водохозяйственной администрации Иордании (ВАИ) задействовать ранее не использовавшиеся водоносные горизонты и снизить нагрузку на существующие источники воды. Иордания входит в десятку стран с самой низкой обеспеченностью пресной водой на душу населения в мире в связи с расположением в зоне полусухого климата, характеризующегося низким уровнем осадков, и ростом населения. Ожидается, что ситуация будет ухудшаться, и, по данным Регионального бюро Всемирной организации здравоохранения для стран Восточного Средиземноморья (ЭМРО), если не принять действенных мер, то к 2025 году в Иордании сложится ситуация «крайнего дефицита водных ресурсов».

Одной из таких мер является использование расположенных на большей глубине ресурсов более древних подземных вод, таких как водоносный горизонт Рам, который окружен песчаником и содержит огромное количество высококачественной пресной воды, которая скорее всего не имеет каких-либо антропогенных примесей. Однако песчаник, как правило, содержит повышенные концентрации природных радионуклидов, главным образом радия, которые могут представлять опасность для потребителей воды.

При поддержке программы технического сотрудничества МАГАТЭ специалисты в области изотопного анализа и обращения с отходами оказали помощь иорданским экспертам в измерении и мониторинге концентрации радия в подземных водах, отобранных из водоносного горизонта Рам, и в изучении различных вариантов очистки воды.

По результатам анализа воды рядом с водозаборной скважиной были начаты работы по строительству и монтажу водоочистной установки. На очистной установке происходит фильтрация путем добавления гидратированного оксида марганца в воду, которая затем пропускается через

несколько керамических фильтров, в результате чего концентрация радионуклидов снижается до уровней, соответствующих установленным Иорданской нормам.

В феврале 2020 года после прибытия первых основных компонентов, таких как насосы и измерительные приборы, стартовала сборка оборудования для очистки воды, а месяц спустя начались строительные работы. К декабрю 2020 года очистная установка была смонтирована и готова к использованию местной организацией водоснабжения Акабы. Новая установка способна очищать 40 кубических метров воды в час, или 12,5 литров в секунду, что позволяет обеспечить достаточным количеством воды примерно 2000 человек.

«Мы планируем соорудить дополнительные установки для очистки водных ресурсов в городе Акаба, а также у новых скважин в южной части мухафазы Амман, в районе под названием Хан-Альзабид», — говорит Амаль Аль-Сайахин, директор по исследованиям и техническим услугам ВАИ.

Все материалы в земной коре содержат природные радионуклиды. Они есть во всех породах и почвах и, как правило, имеют низкую активность. При этом они могут попадать в подземные воды и, как следствие, в питьевую воду, извлекаемую из подземных резервуаров и источников. «Присутствие радионуклидов может обусловить необходимость проведения тщательного анализа для понимания радиологических рисков, связанных с потреблением такой воды», — говорит Хорст Монкен-Фернандес, специалист МАГАТЭ по вопросам экологической реабилитации, отвечающий за помощь Иордании в рамках этого проекта.

Радиоактивность питьевой воды является проблемой во многих странах мира. Недавно в рамках международной конференции по вопросам обращения с радиоактивными материалами природного происхождения (РМПП) в промышленности МАГАТЭ организовало семинар-практикум под названием «Подземные воды на

360», на котором были рассмотрены различные аспекты, связанные с присутствием в подземных водах природных радионуклидов.

НАУКА

Подземные воды из песчаных бассейнов на Ближнем Востоке в основном имеют высокое качество. Однако из-за своего состава песчаник, как правило, содержит

повышенные концентрации природных радионуклидов. В случае Иордании уровни содержания в этих бассейнах радия природного происхождения, учитывая канцерогенные свойства подобных радионуклидов, могут ухудшать качество имеющихся в стране подземных вод.

Однако радий можно удалить из воды с помощью фильтра, состоящего из мембраны из карбида

кремния, на которую нанесен слой гидратированного оксида марганца (ГОМ).

При прохождении воды через фильтр ГОМ поглощает радий. Через определенное время проводится «обратная промывка» керамического фильтра, и содержащий поглощенный радий ГОМ утилизируется в качестве отходов.

Усовершенствованные практические методы использования почв и питательных веществ способствуют повышению урожайности риса в Лаосе



Опытные посевы риса на полях местного фермера.

(Фото: М. Заман/МАГАТЭ)

Рис, который является для Лаосской Народно-Демократической Республики (Лаоса) основной сельскохозяйственной культурой, играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и занятости в стране. Более 80 процентов фермеров в стране занимаются выращиванием риса, под посадку которого занято около 60 процентов всех обрабатываемых земель. Однако урожайность риса ограничена в силу горного рельефа страны, тропического климата с частыми муссонами, эрозии почв, отсутствия подходящих сортов риса и недостаточного использования удобрений, что создает угрозу для благосостояния людей, живущих в этом аграрном обществе. Учитывая, что 72 процента используемых для выращивания риса в стране площадей зависят от естественных осадков, прогнозируется, что обусловленная изменением климата все более изменчивая структура осадков будет приводить к разрушительным

последствиям для производства риса. МАГАТЭ в сотрудничестве с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) оказывает помощь фермерам в Лаосе в целях того, чтобы увеличить урожайность риса на 60 процентов за счет совершенствования практических методов использования почв и питательных веществ, что может быть достигнуто с использованием ядерных методов (см. вставку «Наука»). Проведившиеся на полях местных фермеров испытания продемонстрировали, что благодаря оптимальному внесению химических удобрений и навоза урожайность риса увеличилась с 3,16 до 5,1 тонны с гектара.

«Я применяю эти методы уже три года, — рассказывает Сомфет Сифандон, фермер из района Санакарм, провинция Вьентьян, который участвует в пилотном проекте по практическому применению

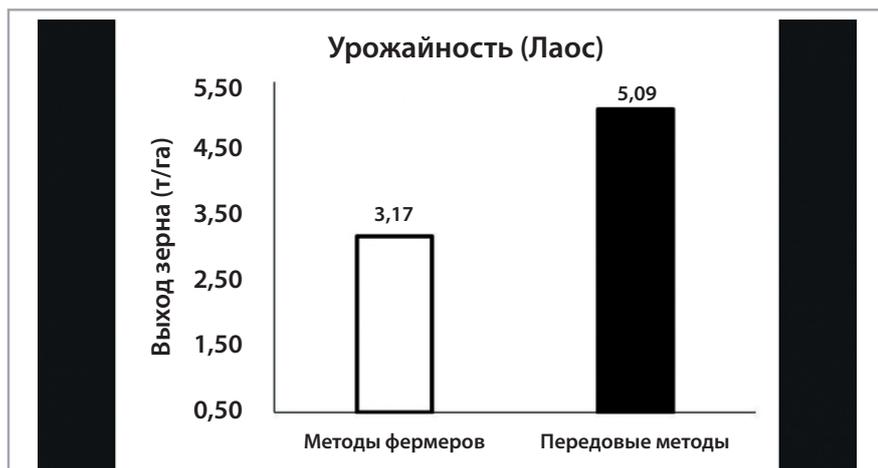
этих разработок. — По сравнению с нашими традиционными техниками урожайность у меня выше на 60 процентов. В ходе обучения мы были ознакомлены с эффективными и экономичными сельскохозяйственными методами, и они хорошо зарекомендовали себя в наших условиях. Благодаря этой программе мы меньше зависим от меняющегося климата и собираем больше урожая».

В рамках своей программы технического сотрудничества МАГАТЭ организует подготовку исследователей в области применения азота-15 — стабильного изотопа азота — для определения количества азота, которое растения способны усваивать из удобрений, а затем для определения точного количества удобрений, которое фермерам необходимо вносить на разных этапах роста сельскохозяйственных культур. Кроме того, изучаются оптимальные варианты включения в качестве источника питательных веществ в состав удобрения рисовой соломы и навоза, которые свободно доступны местным фермерам.

На основе полученных результатов эксперты МАГАТЭ и ФАО помогли местным специалистам разработать свод рекомендаций по производству риса для сведения фермеров и сотрудничающих с ними должностных лиц сельскохозяйственной отрасли.

Эти рекомендации включают информацию о наилучшей практике в области рационального использования почв и питательных веществ и опираются на результаты, полученные с использованием изотопных методов.

Для того чтобы охватить большее число фермеров и распространять



График, показывающий увеличение урожайности риса за счет применения улучшенных методов использования почв и питательных веществ.

эти передовые наработки, МАГАТЭ в сотрудничестве с экспертами из Национального научно-исследовательского института сельского и лесного хозяйства (НАФРИ) разработало простую в использовании брошюру для фермеров на лаосском языке, в которой используется информация, изложенная в рекомендациях по производству риса. К настоящему времени в рамках пилотного этапа программы подготовку прошли 57 фермеров

из четырех населенных пунктов в провинции Вьентьян. «Эта брошюра — как полный комплект технических инструкций, где фермерам четко объясняется, что нужно делать: от подготовки земель к посеву и внесения удобрений до борьбы с сорняками и вредными насекомыми и организации своевременного сбора урожая», — говорит Мохаммад Заман, почвовед и специалист по питанию растений, который работает по линии Совместной программы ФАО/МАГАТЭ по ядерным

методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях.

НАУКА

Методы, основанные на применении стабильных изотопов

Изотопами называются атомы одного и того же элемента с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов, вследствие чего они обладают разной атомной массой. К примеру, с химической точки зрения азот-15 ведет себя точно так же, как и азот-14, но в нем на один нейтрон больше, поэтому этот изотоп тяжелее. Ученые могут использовать маркированные этим изотопом удобрения для того, чтобы понять, как содержащийся в них азот влияет на почву, растения и водные системы. Они отслеживают его путь и определяют, насколько эффективно азот поглощается сельскохозяйственными культурами и сколько его остается в почве.

Кроме того, с помощью изотопов ученые могут контролировать динамику и происхождение различных выбросов в сельском хозяйстве: азот-15 применяется для отслеживания закиси азота, а углерод-13 — для отслеживания метана и диоксида углерода.

— Лу Хань

Для радиологического мониторинга в чрезвычайных ситуациях теперь доступна новая технология с использованием дронов



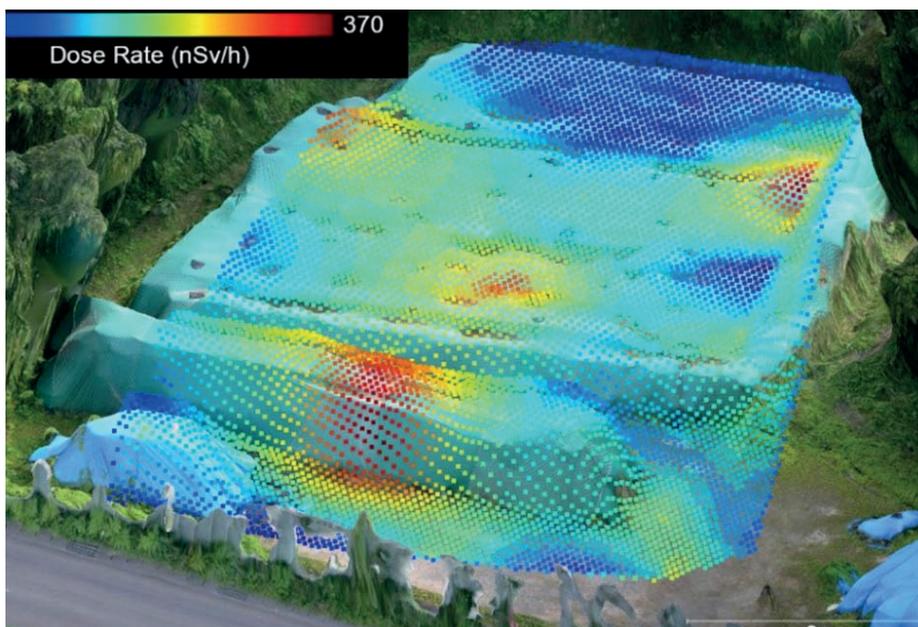
Проведение радиационных измерений на загрязненных территориях с помощью разработанной Агентством для префектуры Фукусима, Япония, новой технологии, в основе которой лежит использование дронов.

(Фото: префектура Фукусима)

После ядерной аварии, наподобие той, которая произошла в 2011 году на АЭС «Фукусима-дайти», радиоактивное загрязнение территории вокруг энергоблока может быть слишком опасным для того, чтобы туда могли заходить люди для контроля уровня излучения. Упростить эту задачу поможет новая технология, предусматривающая использование дронов, которая была разработана Агентством для властей префектуры Фукусима, Япония.

Разработанная МАГАТЭ методология и измерительные приборы для беспилотных летательных аппаратов (дронов), оснащаемых детекторами излучения, камерами и GPS-приемниками, прошли испытания и проверку в реальных условиях в префектуре Фукусима и в настоящее время доступны для практического применения в обычных или чрезвычайных ситуациях. Опираясь на полученный опыт, МАГАТЭ готово оказывать помощь заинтересованным государствам-членам в разработке и внедрении этой технологии для целей радиологического картирования после ядерной или радиологической аварийной ситуации.

Двумя существенными преимуществами этой технологии являются низкая стоимость дронов и возможность исключить облучение людей.



Полная модель на основе 3D-аэрофотограмметрии, наложенной на радиологическую карту, которая была получена с помощью одного БПЛА в ходе двух последовательных полетов.

(Изображение: МАГАТЭ и префектура Фукусима)

МАГАТЭ и префектура Фукусима впервые начали сотрудничество в области разработки и использования дронов для радиологического мониторинга в 2012 году. Агентство, в рамках Плана действий МАГАТЭ по ядерной безопасности, оказывало префектуре Фукусима помощь в ходе двух последовательно осуществлявшихся с 2012 по 2020 год проектов:

- развертывание полнокомпонентной системы измерительных приборов для радиометрического контроля на базе дрона — а именно, системы детектирования излучения с возможностью обработки и хранения данных, которая была разработана и сконструирована в Лаборатории ядерной науки и приборов МАГАТЭ (ЛЯНП);
- предоставление методологии последующего анализа и интерпретации результатов измерений, а также обучение персонала как в префектуре Фукусима, так и на базе ЛЯНП в Зайберсдорфе, Австрия, по вопросам применения дронов и измерительных систем, и в том числе использования программного обеспечения для получения и интерпретации данных.

В последнее время технология дронов развивается стремительными темпами, в связи с чем в ближайшем будущем ожидаются существенные изменения и доработки, включая увеличение

полезной нагрузки, интеграцию детекторов и датчиков, улучшение возможностей самонавигации и способности аппаратов работать в связке с другими дронами, а также наземными системами. В настоящее время МАГАТЭ работает над интеграцией и испытанием новых усовершенствованных измерительных приборов, включая их адаптацию для дронов следующего поколения.

«Эти передовые разработки позволят одновременно как увеличить продолжительность полета дрона, так и обеспечить возможность определения мощности эквивалентной дозы и спектра гамма-излучения лишь за одно измерение, — комментирует начальник Секции физики МАГАТЭ Данас Ридикас. — Если добавить к этой новой системе возможности камеры высокого разрешения, в распоряжении пользователей окажется полная модель на основе 3D аэрофотограмметрии, совмещенной с радиологическими картами и данными по идентификации радионуклидов».

Как поясняет начальник Секции радиационной безопасности и дозиметрического контроля МАГАТЭ Мирослав Пинак, технологии на базе дронов будут иметь решающее значение для дальнейшего развития методов радиационного контроля, в частности, речь идет о более эффективном применении экологического картирования и

совершенствовании возможностей по долгосрочному мониторингу загрязненных районов.

Данные, которые были собраны с помощью разработанных в МАГАТЭ и проверенных в префектуре Фукусима систем на базе дронов, могут использоваться для оценки потенциальных радиационных рисков и обоснования соответствующих планов и стратегий в области восстановления территорий, дезактивации стоков и обращения с ядерными отходами в Японии.

Для сведения общественности будет представлен технический документ МАГАТЭ о результатах этого проекта, предусматривающего калибровку измерительных приборов, валидацию методологии, измерение мощности дозы на местах и составление карт радиационной обстановки в местах временного хранения радиоактивных отходов в префектуре Фукусима.

Соответствующие технологии, методология и программы обучения могут быть предоставлены государствам — членам МАГАТЭ по запросу и при поддержке Агентства уже нашли применение в некоторых странах.

Как работает эта технология?

Дроны оснащаются детекторами излучения, камерами и GPS-приемниками. После начала полета дрона замеры излучения и другие соответствующие данные синхронизируются с его точным местоположением по координатам GPS и в режиме реального времени передаются оператору на наземной станции, а также сохраняются в бортовой системе. После приземления можно извлечь все подробные данные, а также воссоздать картину радиационной обстановки на основе фотографической и географической информации в сочетании с откорректированными радиометрическими данными. Результаты фотографической съемки, похожие на спутниковые изображения, и проанализированные радиометрические данные затем предоставляются директивным органам для принятия дальнейших решений.

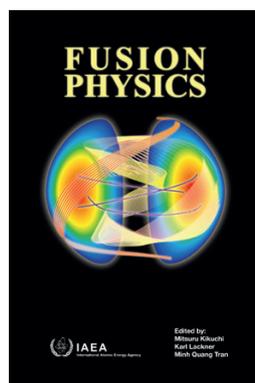
— Александра Пеева



«Термоядерный синтез»

— это пользующийся широким признанием ведущий в мире журнал, который посвящен вопросам термоядерного синтеза. В нем рассматриваются все аспекты теоретических и практических исследований, имеющих отношение к контролируемому термоядерному синтезу. Это издание, которое было учреждено в 1960 году, ежегодно используется для публикации порядка 400 новых статей и служит качественной и беспристрастной дискуссионной площадкой для обмена знаниями в сообществе специалистов, занимающихся исследованиями в области ядерного синтеза. МАГАТЭ организует процесс экспертного рецензирования и координирует работу с авторами и рецензентами, а также с научным редактором журнала, его издательским советом и соиздателем — «ИОП паблишинг». В последние годы содержание журнала все чаще отражает растущий интерес к материалам, используемым в термоядерных устройствах. Ежегодно из электронной версии журнала загружается порядка полмиллиона полных текстов, а его рейтинг цитируемости среди всех сопоставимых журналов неизменно остается на высочайшем уровне.

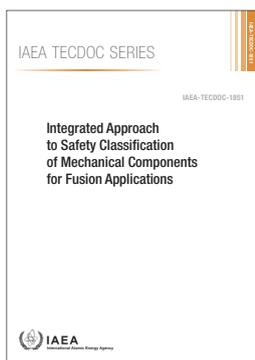
Journal; doi:10.1088/issn.0029-5515; Online ISSN: 1741-4326; Print ISSN: 0029-5515



«Физика ядерного синтеза»

— это исчерпывающее справочное издание для аспирантов и полезное руководство для более опытных исследователей. В нем представлена ознакомительная информация о ядерном синтезе, состоянии и перспективах исследований в этой области, а также специализированные главы за авторством ведущих профильных специалистов, в которых рассматриваются основные аспекты исследований и разработок в области физики ядерного синтеза. В начале публикации приводятся общие доводы в пользу разработки технологий синтеза для получения энергии. Рассматриваются вопросы магнитного и инерционного удержания плазмы. Отдельные главы посвящены физике удержания плазмы, вопросам равновесных и стабильных конфигураций плазмы в токамаках, диагностики, нагрева плазмы и возбуждения в ней тока с использованием пучков нейтральных частиц и радиочастотных волн, а также взаимодействию плазмы со стенкой реактора. Хотя ведущей концепцией для реализации ядерного синтеза являются системы класса токамак, в книге также рассматриваются и другие концепции (удержание плазмы в винтовом поле и, в более широком смысле, другие магнитные и инерционные конфигурации). Насчитывающая более 1100 страниц, эта книга является не имеющим аналогов источником информации для физиков и инженеров, занимающихся проблемой ядерного синтеза.

Non-serial Publications; ISBN: 978-92-0-130410-0; English Edition; 90.00 euro; 2012



«Комплексный подход к классификации безопасности механических элементов для применений в области термоядерного синтеза»

— первая публикация МАГАТЭ по вопросам классификации безопасности элементов для применений в области термоядерного синтеза. Особое внимание в ней уделяется существующим различиям между реакторами, работающими на делении и на синтезе ядер, с точки зрения идентификации и классификации важных для безопасности конструкций, систем и элементов, а также приводятся практические сведения о применениях в области термоядерного синтеза. В публикации содержится также информация о включении новых запроектных режимов, которые были добавлены после пересмотра соответствующих руководств МАГАТЭ по безопасности после аварии на АЭС «Фукусима-дайти».

IAEA-TECDOC-1851; 978-92-0-105518-7; English Edition; 18.00 euro; 2018

За дополнительной информацией и для заказа книг просьба обращаться в

Группу маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр,
а/я 100, А-1400 Вена, Австрия
Эл. почта: sales.publications@iaea.org

Читайте этот и другие выпуски *Бюллетеня МАГАТЭ* в интернете по адресу
www.iaea.org/es/bulletin

С более подробной информацией о МАГАТЭ и его работе можно ознакомиться
на сайте www.iaea.org,

или на наших страницах



IAEA

Международное агентство по атомной энергии
Атом для мира и развития