

IAEA BULLETIN

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Флагманская публикация МАГАТЭ | Декабрь 2023 года | www.iaea.org/ru/bulletin

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕАКТОРЫ

Нейтроны спасают жизни: использование исследовательских реакторов для производства медицинских изотопов и радиофармпрепаратов, стр. 6

Сети исследовательских реакторов оптимизируют работу с целью удовлетворить растущий спрос, стр. 14

Поддержание работы мирового парка устаревающих исследовательских реакторов, стр. 16



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: Джоанн Лю

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по

адресу:

www.iaea.org/ru/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:

Л. Гауна Перейра/НКАЭ

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 устанавливают основополагающие принципы, требования и рекомендации, касающиеся обеспечения ядерной 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 уровнях. 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 обеспечить максимальную универсальность, долговечность и результативность исследовательских реакторов

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

Исследовательские реакторы — это катализатор научно-технического прогресса. Они играют важнейшую роль в выполнении миссии МАГАТЭ по содействию использованию достижений ядерной науки и технологий в мирных целях, используются в сфере образования, а также исследований и разработок. Исследовательские реакторы обладают уникальным потенциалом, позволяющим нам углублять знания в области ядерной физики, материаловедения и медицины. Это, в свою очередь, дает человечеству дополнительные преимущества, позволяя производить, например, новые радиофармацевтические препараты.

В 54 странах эксплуатируется более 220 исследовательских реакторов, и еще 25 реакторов находятся в процессе проектирования или сооружения. Сегодня мировой парк реакторов стареет: большинство из них проработали уже более 50 лет. В ответ на это МАГАТЭ помогает странам разрабатывать и осуществлять планы по реконструкции и модернизации реакторов, чтобы они могли продолжать работать безопасно и эффективно.

При этом некоторые страны только приступают к развитию ядерной энергетики: они разрабатывают свои первые исследовательские реакторные установки, которые могут стать плацдармом для создания будущих ядерно-энергетических программ. В ядерной сфере первостепенное значение имеет ядерная и физическая безопасность установок — в том числе и исследовательских реакторов. МАГАТЭ готово оказывать поддержку странам в выполнении их национальных обязанностей по обеспечению ядерной и физической безопасности исследовательских реакторов и полной оптимизации их работы, начиная с момента создания проекта и заканчивая выводом из эксплуатации. Это достигается посредством проектов координированных исследований, миссий экспертов, независимых экспертиз, публикации руководящих материалов, инструментов планирования и подготовки кадров. В настоящее время МАГАТЭ содействует осуществлению более чем 30 проектов технического сотрудничества в области исследовательских реакторов, в которых участвуют

страны со всего мира. Эти проекты затрагивают многочисленные вопросы, и столь же многочисленны сферы применения исследовательских реакторов: от повышения ядерной безопасности, эффективности использования и эксплуатационных характеристик реакторов до разработки ядерной инфраструктуры для первого исследовательского реактора в стране.

В этом выпуске Бюллетеня МАГАТЭ рассказывается о различных областях применения исследовательских реакторов и о том, как сильно они влияют на нашу жизнь и экономическое положение. Исследовательские реакторы лежат в основе научного прогресса и социально-экономического развития в самых разных сферах, от методов лечения до разработки новейших материалов и видов топлива. В то время как страны борются с насущными проблемами изменения климата и энергетической безопасности, исследовательские реакторы позволяют разрабатывать и испытывать инновационные энергетические решения, в том числе основанные на реакции деления ядра и на энергии термоядерного синтеза. Они также регулярно используются для выявления источников загрязнения воздуха, помощи в управлении земельными ресурсами, производства радиоизотопов для жизненно важных методов лечения и оценки структурной целостности зданий.

Ядерные исследовательские реакторы являются весьма важным инструментом благодаря такому большому количеству применений. МАГАТЭ твердо убеждено, что их многочисленные преимущества должны быть доступны для всех стран, и активно помогает им извлекать максимальную выгоду от использования таких реакторов.





1 Как обеспечить максимальную универсальность, долговечность и результативность исследовательских реакторов



4 Что представляют собой исследовательские реакторы? Каким образом они содействуют устойчивому развитию?



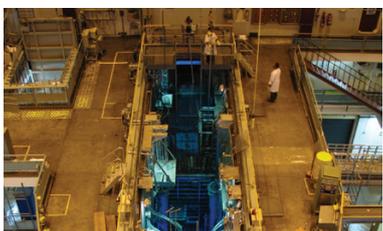
6 Нейтроны спасают жизни:
использование исследовательских реакторов для производства медицинских изотопов и радиофармпрепаратов



8 Достижения в области нейтронной визуализации открывают новые возможности применения исследовательских реакторов малой мощности



10 Новая услуга независимой экспертизы МАГАТЭ помогает странам в полной мере использовать потенциал исследовательских реакторов



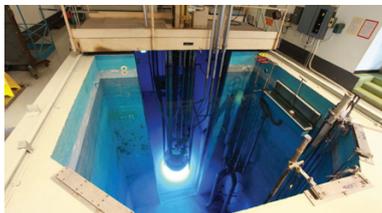
12 МАГАТЭ помогает африканским ученым реализовать потенциал исследовательских реакторов для целей социально-экономического развития



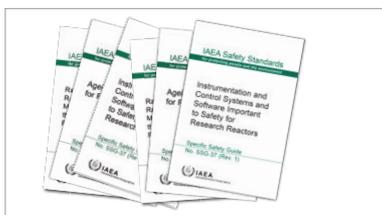
14 Сети исследовательских реакторов оптимизируют работу с целью удовлетворить растущий спрос



16 Поддержание работы мирового парка устаревающих исследовательских реакторов



20 Планирование людских ресурсов для программ создания исследовательских реакторов



22 Быстро и эффективно: новый подход к обновлению руководств по безопасности МАГАТЭ



24 Защита исследовательских реакторов Египта от угроз физической ядерной безопасности



26 Новые инструменты МАГАТЭ помогают странам решать вопросы обращения с отработавшим топливом исследовательских реакторов

МИРОВОЙ ОБЗОР

28 Опыт Бразилии: исследовательские реакторы на службе общества

СЕГОДНЯ В МАГАТЭ

30 Новости МАГАТЭ

32 Публикации

Что представляют собой исследовательские реакторы? Каким образом они содействуют устойчивому развитию?

Джоанн Лю и Тан Синьвэнь

Более трети эксплуатируемых в мире ядерных реакторов используются не для выработки электроэнергии, а для научных исследований, учебно-образовательных целей и производства радиоизотопов. В отличие от ядерных энергетических реакторов, предназначенных для выработки электроэнергии, исследовательские ядерные реакторы используются в основном для производства нейтронов. Нейтроны — это незаряженные субатомные частицы, используемые в различных областях, таких как изучение материалов на атомном уровне, производство радиоизотопов для нужд медицины, промышленности и научных исследований и визуализация внутреннего строения объектов.

В настоящее время в строю находятся около **220** исследовательских реакторов в **54** странах и еще примерно **25** сооружаются или проектируются.

В настоящее время в строю находятся около 220 исследовательских реакторов в 54 странах и еще примерно 25 сооружаются или проектируются. Они играют ключевую роль не только в развитии ядерных технологий, но и в улучшении многих сторон повседневной жизни, помогая странам достичь целей в области устойчивого развития. Исследовательские реакторы бывают самых разных размеров и конструкций. Во многих случаях находясь в стенах учебных и научно-исследовательских институтов, исследовательские реакторы меньше по размеру и работают при более низких температурах, чем обычные энергетические реакторы. Тепловая мощность большинства исследовательских реакторов составляет от 0 до 100 мегаватт (тепловых) (МВт (тепл.)), в отличие от 3000 МВт (тепл.) большого ядерного энергетического реактора. Таким образом, количество используемого ядерного топлива и объем образующихся радиоактивных отходов у исследовательских реакторов значительно меньше.

Как используются исследовательские реакторы?

Исследовательские реакторы проектируются и используются для проведения экспериментов, обучения и подготовки кадров, а также для производства радиоизотопов для медицинских и промышленных нужд. В них создается контролируемая среда для изучения и понимания особенностей поведения материалов, нейтронных взаимодействий и радиационных эффектов.

Являясь базой для научных исследований по целому ряду дисциплин, исследовательские реакторы также имеют ключевое значение для инноваций в ядерной энергетике. На них как на испытательных стендах для инновационных реакторных технологий создаются реалистичные условия для экспериментов с материалами и ядерным топливом. Исследовательские реакторы также открывают возможности для обучения и подготовки персонала ядерных установок, сотрудников служб радиационной защиты и регулирующих органов, а также студентов и исследователей.

Как исследовательские реакторы способствуют достижению целей Организация Объединенных Наций в области устойчивого развития?

Цели в области устойчивого развития (ЦУР) — это комплекс из 17 целей, поставленных в 2015 году Организацией Объединенных Наций для решения глобальных проблем в таких областях, как здравоохранение, образование и энергетика. Исследовательские реакторы способствуют достижению нескольких ЦУР, в том числе:



ЦУР 3: Исследовательские реакторы играют важнейшую роль в медицинской визуализации и лечении онкологических заболеваний. Они производят радиоизотопы, используемые в 85 процентах процедур ядерной медицины, и необходимы для создания новых радиофармацевтических препаратов, которые ежегодно приносят пользу миллионам людей благодаря улучшению методов диагностики и лечения различных типов онкологических заболеваний. Флагманская инициатива МАГАТЭ по борьбе с раком «Лучи надежды» помогает странам расширить доступ к подобным методам лечения, способным спасти жизнь.



ЦУР 4 и ЦУР 5: Как инструмент обучения и подготовки кадров исследовательские реакторы служат студентам любой гендерной принадлежности. Семинары-практикумы, тренинги и миссии, проводимые при поддержке МАГАТЭ, а также Программа стипендий МАГАТЭ имени Марии Склодовской-Кюри и Программа имени Лизе Майтнер позволяют сформировать инклюзивную рабочую силу, которая вносит свой вклад в глобальные научно-технические инновации и является их движущей силой.



6 ЧИСТАЯ ВОДА И САНИТАРИЯ



ЦУР 6: Исследовательские реакторы играют ключевую роль в разработке методов радиационной стерилизации для очистки воды. Радиационная обработка при очистке сточных вод — эффективный метод, который позволяет удалить из воды вредные микроорганизмы, патогены и другие загрязнители, сделав ее безопасной для потребления и других нужд.

7 НЕДОРОГОСТОЯЩАЯ И ЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ



ЦУР 7: Исследовательские реакторы позволяют разрабатывать и испытывать новые энергетические технологии. Исследователи могут оценивать новые концепции ядерных реакторов, новые виды топлива и материалов, чтобы

оптимизировать конструкции ядерных энергетических реакторов в интересах повышения их безопасности, эффективности и производительности, что поможет расширить будущие перспективы чистой энергетики. Atoms4NetZero — это инициатива МАГАТЭ, в рамках которой странам оказывается поддержка в их усилиях по использованию возможностей ядерной энергии при переходе к энергетике с нулевым уровнем выбросов. Исследовательские реакторы также используются с такими методами, как нейтронная визуализация, рассеяние нейтронов и нейтронное профилирование по глубине, для изучения неядерных энергетических концепций, таких как водородные топливные элементы и литий-ионные аккумуляторы.

8 ДОСТОЙНАЯ РАБОТА И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ



ЦУР 8: Студенты, исследователи и специалисты в ядерной сфере могут приобрести практический опыт и знания благодаря обучению, проводимому на исследовательских реакторах. Такое обучение может открыть для них

возможности работы в ядерной и смежных областях. Кроме того, исследовательские реакторы используются для производства продуктов и услуг, например для легирования кремния, при котором в кремний вносятся примеси для изменения электрических характеристик электронных устройств.

9 ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ, ИННОВАЦИИ И ИНФРАСТРУКТУРА



ЦУР 9: Исследовательские реакторы способствуют инновациям в различных сферах — от электроники и строительных материалов, используемых в экстремальных условиях, до медицины и других областей. Нейтроны, производимые исследовательскими реакторами, также находят применение как инструмент для неразрушающих испытаний в различных отраслях промышленности, обеспечивая качество и безопасность объектов.

17 ПАРТНЕРСТВО В ИНТЕРЕСАХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ



ЦУР 17: Обеспечение устойчивого развития — это общее дело, и многие институты и университеты, в которых имеются исследовательские реакторы, участвуют в совместных проектах и исследовательских мероприятиях, которые способствуют развитию регионального и международного сотрудничества в области науки, техники и инноваций и расширению доступа к ним.

Какую роль играет МАГАТЭ?

МАГАТЭ помогает странам эффективно и рационально использовать исследовательские реакторы, с тем чтобы страны могли ощутить все преимущества этих ядерных установок. МАГАТЭ организует учебные курсы и семинары-практикумы по исследовательским реакторам, а также издало руководящие материалы и нормы безопасности, а также разработало курсы электронного обучения. Проекты координированных исследований МАГАТЭ способствуют международному сотрудничеству и налаживанию контактов между экспертами, одновременно раздвигая горизонты науки, связанной с исследовательскими реакторами.

МАГАТЭ поддерживает новые проекты исследовательских реакторов своими миссиями по экспертной оценке исследовательских реакторов. В ходе этих миссий также оценивается национальная практика использования руководств и норм МАГАТЭ для улучшения эксплуатации, использования и технического обслуживания и повышения безопасности реакторных установок. Ряд проектов технического сотрудничества МАГАТЭ также посвящены укреплению существующей в странах технической базы эксплуатации и обслуживания в целях повышения безопасности, надежности и интенсивности использования исследовательских реакторов.

Вид сверху на активную зону исследовательского реактора Университета штата Миссури (MURR) в Соединенных Штатах Америки. MURR производит радиоизотопы, используемые в спасающих жизни методах лечения рака печени, поджелудочной железы, простаты и щитовидной железы.
(Фото: Университет штата Миссури)

Нейтроны спасают жизни:

использование исследовательских реакторов для производства медицинских изотопов и радиофармпрепаратов

Амирреза Джалилиан и Мэри Элбон

Эффективное производство медицинских радиоизотопов и разработка новых радиофармпрепаратов — это путь к совершенствованию диагностики и повышению эффективности лечения многих видов рака и других заболеваний. В результате спрос на радиоизотопы, которые в основном производятся с помощью исследовательских реакторов и ускорителей, продолжает расти, а число радиофармпрепаратов, используемых в клинической практике, стремительно увеличивается.

Исследовательские реакторы, способные производить радиоизотопы, есть в **40** странах, из которых около **25** активно производят радиоизотопы для применения в медицине.

«Медицинские радиоизотопы и радиофармпрепараты могут спасти жизнь, если они приготовлены и применяются надлежащим образом», — говорит директор Отдела физических и химических наук МАГАТЭ Мелисса Денекке.

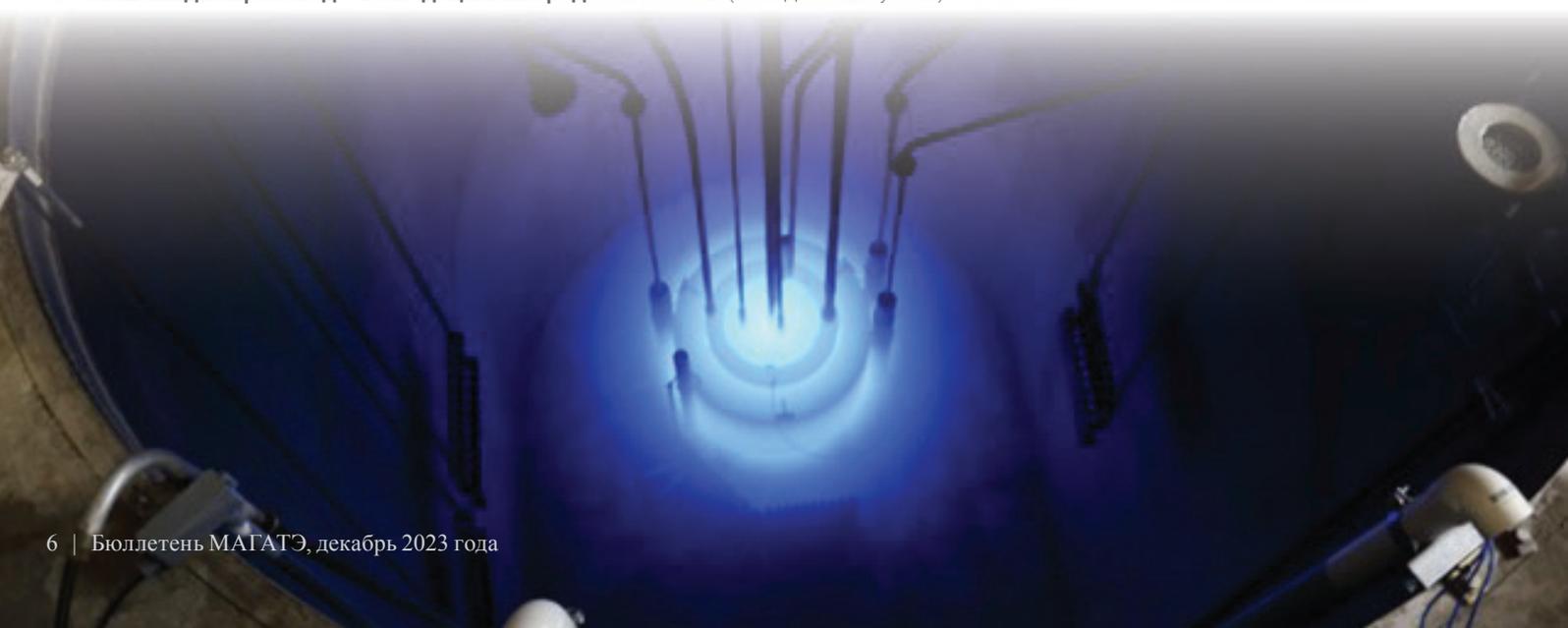
Медицинские радиоизотопы — это радиоактивные элементы, которые, прикрепляясь к определенным молекулам в фармацевтических препаратах, испускают излучение, легко отслеживаемое соответствующими приборами, что делает их полезными для целей

медицинской диагностики. Их можно также использовать в терапевтических целях, подвергая точечному облучению опухолевую ткань для лечения онкологических заболеваний, например рака простаты, молочной железы или кишечника.

Радиофармпрепараты — это лекарства, в которых медицинский радиоизотоп сочетается с биологически активной молекулой. Диагностические радиофармпрепараты содержат радиоизотопы, испускающие гамма-излучение, и могут использоваться для обследования конкретных органов, тканей или клеток. Они вводятся пациентам путем инъекций, ингаляций или перорально для неинвазивного получения изображений органов или тканей-мишеней с помощью внешней камеры, регистрирующей гамма-излучение. Терапевтические радиофармпрепараты содержат радиоизотопы, испускающие частицы, которые накапливаются в тканях-мишенях и убивают раковые клетки.

Исследовательские реакторы являются основным источником производства медицинских радиоизотопов, включая, среди прочих, молибден-99 (Mo-99), йод-131 (I-131) и гольмий-166 (Ho-166). I-131, который используется для диагностики и лечения рака щитовидной железы, был одним из самых первых радиоизотопов, произведенных в исследовательском реакторе в начале 1940-х годов. Всего производится около 35 медицинских радиоизотопов, однако основная доля производства приходится на Mo-99. Он является материнским изотопом технеция-99m (Tc-99m), который находит применение почти в 85 процентах проводимых по всему миру процедур ядерной медицины для диагностики онкологических заболеваний и

Активная зона исследовательского реактора в Рид-колледже (Соединенные Штаты Америки), в которой облучается мишень для производства медицинских радиоизотопов. (Фото: Д. Маккалоу/Flickr)



болезней сердца, мозга и костей: каждый год с его использованием проводится до 50 млн таких процедур.

Еще одним важным радиоизотопом, который нарабатывается в исследовательских реакторах, является лютеций-177 (Lu-177). «На основе Lu-177 производятся терапевтические радиофармпрепараты, используемые для лечения болей в костях и рака простаты, желудка и кишечника, — говорит научный сотрудник Центра радиоизотопов ПОЛАТОМ при Национальном центре ядерных исследований Польши Рената Миколайчак. — В стадии разработки в мире находится по меньшей мере 20 новых лекарств, в которых используется Lu-177».

В мае 2023 года МАГАТЭ приступило к осуществлению проекта координированных исследований по разработке новых радиофармпрепаратов для лечения рака с использованием Lu-177. «Последние разработки в области радиотерапии на основе Lu-177 изменили подход к лечению нейроэндокринных опухолей и рака предстательной железы, что привело к улучшению результатов лечения пациентов, — отмечает ученый-радиофармацевт из МАГАТЭ Аруна Корде. — Однако в нашем понимании биологического поведения терапевтических радиофармпрепаратов, меченных Lu-177, все еще остаются пробелы». Упомянутый проект координированных исследований направлен на выявление и устранение факторов, которые могут ограничивать эффективность такой радиотерапии. В рамках проекта будет вестись разработка и доклиническая оценка радиофармпрепаратов на основе Lu-177 для анализа их потенциала в области лечения некоторых распространенных онкологических заболеваний, а также будут подготовлены руководства по изотопному мечению и оценке качества, безопасности и эффективности радиофармпрепаратов на основе Lu-177.

Производство радиоизотопов

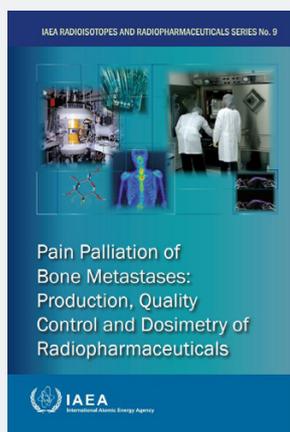
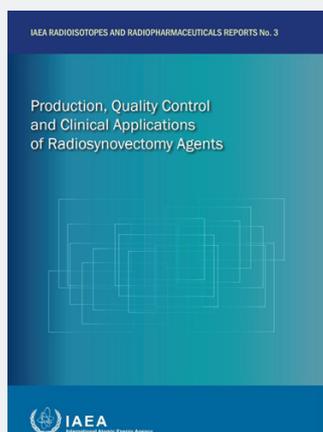
Исследовательские реакторы, пригодные для производства радиоизотопов, есть в 40 странах, при этом около 25 из них активно производят радиоизотопы для применения в медицине. В большинстве случаев радиоизотопы производятся для внутреннего рынка. Относительно небольшое число стран экспортирует радиоизотопы на региональный или мировой рынок, и только некоторые

страны экспортируют их в больших количествах. МАГАТЭ предоставляет странам информационно-консультационные услуги в области использования исследовательских реакторов для разработки и производства этих важнейших средств диагностики и лечения. Исследовательские реакторы являются безопасным и стабильным источником важных изотопов для медицинских применений, включая радиофармпрепараты; кроме того, на их основе производятся радиоизотопные источники, используемые в терапевтических целях, например в брахитерапии, и для стерилизации медицинских изделий.

Спрос на них продолжает расти. «Растущий спрос на радиоизотопы, получаемые с помощью исследовательских реакторов, будет удовлетворен еще не скоро», — говорит Бернар Понсар, руководитель проекта по радиоизотопам в Бельгийском центре ядерных исследований, известном также как SCK CEN.

МАГАТЭ содействует странам в производстве радиоизотопов на основе исследовательских реакторов не только в медицинских, но и в промышленных и научно-исследовательских целях. Агентство разрабатывает руководящие материалы, проводит технические совещания для обмена информацией и ноу-хау, организует проекты координированных исследований с участием исследовательских организаций в разных странах, а также способствует созданию потенциала посредством учебных мероприятий, научных командировок и стажировок. В рамках своей программы технического сотрудничества МАГАТЭ помогает также отдельным странам и содействует осуществлению региональных и межрегиональных проектов.

«МАГАТЭ создает и развивает международное сообщество специалистов, способных производить радиоизотопы и безопасные, высококачественные радиофармпрепараты, — говорит Мелисса Денекке. — Наша конечная цель — помочь увеличить мировое производство этих важнейших средств ядерной медицины и устранить имеющиеся в некоторых регионах проблемы с доступом, чтобы уязвимые группы (больные раком и другими опасными для жизни заболеваниями) могли получать необходимую им помощь».



Две недавние публикации МАГАТЭ посвящены производству и клиническому применению радиофармпрепаратов для лечения болей в суставах при ревматоидном артрите и гемофилии, а также для облегчения болей, обусловленных прогрессирующими костными метастазами. Эти методы лечения могут улучшить качество жизни больных данными заболеваниями.

Достижения в области нейтронной визуализации открывают новые возможности применения исследовательских реакторов малой мощности

Мэри Элбон

Нейтронная визуализация — это неинвазивный метод исследования внутренних структур, который осуществляется с помощью исследовательских реакторов или источников нейтронов на базе ускорителей. «Это удивительный инструмент, обладающий безграничными возможностями для научных и промышленных исследований и разработок, а также для проведения криминалистических экспертиз и изучения объектов культурного наследия», — говорит младший сотрудник по проектам в МАГАТЭ Молли-Кейт Гавелло. Нейтронная визуализация может использоваться для испытания двигателей, амортизаторов и лопаток турбин. С ее помощью можно увидеть, как вода движется внутри живого растения, или исследовать внутреннюю сторону окаменевшего черепа динозавра, заполненного железистой породой.



Благодаря системе нейтронной визуализации в Чешском техническом университете (ЧТУ) в Праге была обнаружена «ось мира» (символ связи между физическим и духовным мирами) внутри тибетской статуэтки бонского божества Чаммы. (Фото: Л. Склелка/ЧТУ)

Нейтронная визуализация используется с 1950-х годов, однако до 1990-х годов ее основным форматом были двухмерные (2D) изображения на пленке. С появлением цифровых технологий, в том числе усовершенствованных цифровых камер, в нейтронной визуализации начал применяться метод компьютерной томографии (КТ), при котором из сотен изображений, сделанных под разными углами, создается трехмерное (3D) изображение с высокой степенью детализации.

До недавнего времени по техническим и финансовым причинам нейтронную визуализацию с помощью

КТ, которую еще называют 3D-визуализацией, было невозможно применять в работе с низкопоточными источниками нейтронов, такими как исследовательские реакторы малой мощности.

Высококачественные изображения при низкой мощности

Ситуация изменилась в 2021 году, когда аспирант Чешского технического университета в Праге (ЧТУ) Яна Матоушкова и ее руководитель Любомир Склелка продемонстрировали возможность проведения нейтронной визуализации с помощью КТ при мощности исследовательского реактора 500 ватт (Вт).

Этому прорыву предшествовали два события. Во-первых, в предыдущее десятилетие стали доступны недорогие высококачественные камеры для астрофотографии. Во-вторых, работавшие на исследовательском источнике нейтронов им. Хайнца Майера-Лейбница (FRM II) в Мюнхенском техническом университете (Германия) исследователи воспользовались потенциалом этих новых камер и в 2016 году представили первую мини-установку для нейтронной томографии, в том числе для реакторов малой мощности. Коллектив исследователей под руководством Буркхарда Шиллингера разработал и создал недорогую систему высококачественной нейтронной визуализации, в которой использовался детектор с напечатанным на 3D-принтере корпусом и упрощенная версия профессионального управляющего программного обеспечения, используемого в экспериментальной системе усовершенствованной нейтронной томографии и радиографии (АНТАРЕС) для целей визуализации на исследовательском реакторе FRM II. Получаемые с помощью новых детекторов изображения не уступают по качеству изображениям, получаемым с помощью высокотехнологической системы, которая обычно используется в АНТАРЕС.

Яна Матоушкова хотела испытать нейтронную визуализацию на источниках нейтронов малой мощности, таких как расположенный в ЧТУ учебный реактор VR-1 мощностью 500 Вт — для сравнения, мощность реактора FRM II составляет 20 МВт, что в 40 000 раз больше, чем в реакторе ЧТУ, и это позволяет ему производить соответственно в 40 000 раз больше нейтронов. Это оказалось непростой задачей, поскольку Яна не могла получить доступ к установкам ЧТУ для проведения экспериментов из-за ограничений в связи с пандемией COVID-19.

Любомир Склелка обратился к Буркхарду Шиллингеру за советом о том, как им воспроизвести у себя разработанную в FRM II недорогую систему, и тот консультировал Яну Матоушкову по видеосвязи и снабжал ее информацией об устройстве системы и о том, где можно приобрести необходимые компоненты. Шаг за шагом она построила систему нейтронной визуализации у себя дома и провела испытания на видимом свете.

После снятия ограничений, обусловленных пандемией COVID-19, Матоушкова установила свою систему на реакторе ЧТУ и впервые в истории университета было успешно получено цифровое 2D-изображение с использованием нейтронной визуализации, после чего была проведена нейтронная визуализация с помощью КТ с 12-часовой экспозицией при мощности 500 Вт. Это означает, что результаты могут быть получены в течение одного дня и при значительно меньшей мощности — мощность исследовательских реакторов, в которых также используется данная методика, варьируется от сотен киловатт до десятков мегаватт.

В настоящее время Матоушкова занимается усовершенствованием системы нейтронной визуализации ЧТУ в рамках своих аспирантских исследований. Система используется в основном для целей обучения, а также для проведения исследований, например для изучения объектов культурного наследия в сотрудничестве с Национальной галереей в Праге.

Передача технологий и обмен опытом

Опыт FRM II и ЧТУ свидетельствует о том, что мини-установка может работать с любым источником нейтронов, включая исследовательские реакторы сверхмалой мощности. Буркхард Шиллингер заявил, что его коллектив готов бесплатно предоставить другим странам проектные планы и программное обеспечение, а также помочь с установкой и настройкой.

Благодаря компонентам, напечатанным на 3D-принтере, программному обеспечению, адаптированному для работы на ноутбуке, и снижению цен на камеры для астрофотографии полный комплект, который несложно

перевозить, может быть собран менее чем за 5000 евро. В 2022 году Буркхард Шиллингер и научный сотрудник Айдахской национальной лаборатории (США) Аарон Крафт руководили миссией экспертов МАГАТЭ по установке системы цифровой нейтронной визуализации на исследовательском реакторе RECH-1 Чилийской комиссии по ядерной энергии. Шиллингер привез компоненты в чемодане, а на установку системы ушло меньше двух дней.

«МАГАТЭ играет ключевую роль в том, чтобы сделать эту технологию доступной для исследовательских реакторов малой мощности, — говорит он. — С новыми чувствительными детекторами открывается совершенно новая область применения тех реакторов, которые не дают достаточно нейтронов для проведения сложных экспериментов в области рассеяния нейтронов. Нейтронная визуализация делает их более пригодными для применения в целях образования, исследований и сотрудничества с музеями».



Любомир Склелка, Яна Матоушкова и Буркхард Шиллингер на исследовательской реакторной установке Чешского технического университета в Праге.

(Фото: Мюнхенский технический университет)

МАГАТЭ содействует техническому сотрудничеству с исследовательскими реакторами, в том числе путем проведения миссий экспертов и закупки оборудования. Агентство публикует также справочники по нейтронной визуализации, проводит региональные учебные мероприятия и расширяет возможности электронного обучения. Кроме того, в 2022 году благодаря МАГАТЭ Матоушкова смогла провести четыре месяца на исследовательском реакторе RA-6 в Аргентине, где она помогала установить и испытать недорогую систему нейтронной визуализации.

Аналогичная система двойной нейтронно-рентгеновской визуализации была установлена и введена в эксплуатацию на установке для нейтронных исследований МАГАТЭ в Зайберсдорфе (Австрия), где она используется в учебных целях.

Что такое нейтронная визуализация?

Нейтронная визуализация — это неинвазивный метод исследования внутренних структур и состава непрозрачных объектов. В ее основе лежат принципы, аналогичные принципам рентгеновской визуализации. Однако в отличие от рентгеновского излучения, которое поглощается плотными материалами, такими как металлы, пучки нейтронов проникают через большинство металлов и горных пород, а некоторые легкие элементы, такие как бор, углерод, водород и литий, ослабляют нейтронное излучение. Нейтроны могут также помочь получать изображения магнитных полей, а также деформации технологических и конструктивных материалов.

Новая услуга независимой экспертизы МАГАТЭ помогает странам в полной мере использовать потенциал исследовательских реакторов

Эмма Миджли

Исследовательские реакторы позволяют решать множество различных задач. Они не предназначены для производства электроэнергии, зато помогают разрабатывать инновационные решения в области экологически чистой энергии, а также производить жизненно важные радиоизотопы и открывать новые факты о культурном наследии. Многие исследовательские реакторы используются на полную мощность, но некоторые задействованы недостаточно. Чтобы помочь странам реализовать весь потенциал их исследовательских реакторов устойчивым и эффективным образом, МАГАТЭ оказывает услуги по комплексному обзору использования исследовательских реакторов (ИРРУР).

«Многие исследовательские реакторы соорудились в 1950-х и 1960-х годах для удовлетворения насущных потребностей того времени. Сегодня, когда потенциал исследовательских реакторов понимается лучше, появляются новые области применения как новых, так и старых реакторов», — говорит специалист по исследовательским реакторам в МАГАТЭ Нуну Пессоа Баррадаш.

Первая миссия ИРРУР состоялась в 2022 году одновременно с оказанием услуг по оценке эксплуатации и обслуживания исследовательских

реакторов (ОМАРР) на исследовательском реакторе бассейнового типа RECH-1 мощностью 5 мегаватт (МВт) в Ядерном исследовательском центре в Ла-Рейне в Сантьяго (Чили), опираясь на результаты проведенной в 2019 году в Италии пилотной миссии. Была сформирована группа международных экспертов ИРРУР, обладающих научными, управленческими и эксплуатационными знаниями, связанными с вопросами использования исследовательских реакторов и соответствующими прикладными технологиями.

«Ядерная наука и технологии способствуют достижению целей в области национального развития, в частности в области здравоохранения, охраны окружающей среды, водных и сельскохозяйственных ресурсов, энергетики, горного дела и промышленности, — говорит Исполнительный директор Чилийской комиссии по ядерной энергии Луис Уэрта. — Эти миссии МАГАТЭ, целью которых был всесторонний обзор чилийского ядерного реактора RECH-1, дали возможность проанализировать наши ресурсы и потенциал, чтобы повысить эффективность эксплуатации и обслуживания, а также расширить область использования нашей ядерной установки и набор решаемых с ее помощью прикладных задач, особенно для целей новых инициатив в области исследований и разработок».

В июне 2023 года группа специалистов МАГАТЭ и международных экспертов завершила миссию по комплексному обзору использования исследовательского реактора в Национальной лаборатории Айдахо. (Фото: АНЛ)



В этой миссии, длившейся пять дней, участвовали эксперты из Аргентины, Бельгии, Соединенных Штатов Америки и МАГАТЭ, а также наблюдатель из Перу. Коллектив экспертов определил направления для расширения области использования реактора, например для производства медицинских изотопов в партнерстве с заинтересованными сторонами, чтобы планировать соответствующие потребности в будущем. Эксперты рекомендовали также разработать стратегию информационно-разъяснительной работы, чтобы расширить круг пользователей установок.

После завершения миссии при содействии МАГАТЭ на чилийском реакторе была установлена система нейтронной визуализации, что открыло новые направления исследований на этом реакторе. Нейтронная визуализация — это неразрушающий способ получения изображений объектов, который схож с рентгенографией. Ее можно использовать для анализа ядерного топлива, электронных компонентов и лопаток турбин двигателей, а также для характеристики топливных элементов и геологических образцов.

Поддержка решений для развития экологически чистой энергетики

Важность исследовательских реакторов для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе для материаловедческих исследований в области физики реакторов, основанных на процессах деления атомных ядер и термоядерного синтеза, была отмечена в ходе двух последовательных миссий ИРРУР, проводившихся в 2023 году в Соединенных Штатах Америки. Международные группы экспертов посетили Айдахскую национальную лабораторию (АНЛ) и Лабораторию ядерных реакторов Массачусетского технологического института (МТИ).

Исследовательский реактор АНЛ используется в основном для исследований в области нейтронной радиографии и других неразрушающих методов, а также для нейтронного облучения, что позволяет изучать реакцию ядерного топлива и конструкционных материалов на нормальные и экстремальные условия. В реакторе МТИ ведется облучение образцов, что дополняет работу АНЛ и других ядерных исследовательских установок Соединенных Штатов; он используется также для исследований, связанных с разработкой материалов для реакторов деления и термоядерных реакторов.

По итогам миссии было установлено, что АНЛ может укрепить потенциал в области получения цифровых изображений на основе нейтронной визуализации, чтобы лаборатория могла эффективнее вести исследования в области инновационных ядерно-энергетических систем, а МТИ, возможно, следует более плодотворно

взаимодействовать с мировым научно-техническим сообществом в ядерной области. Кроме того, Лаборатории ядерных реакторов МТИ было рекомендовано обновить ее устаревающую инфраструктуру, чтобы повысить надежность использования реакторов и создать более привлекательные условия для внешних пользователей, студентов и персонала.

По мнению заместителя директора лаборатории комплекса материалов и топлива АНЛ и члена миссии ИРРУР в МТИ Рона Кроуна, Лаборатория ядерных реакторов МТИ потенциально может стать «ведущей в мире» установкой для индивидуального облучения ядерного топлива и материалов. «Я считаю, что дополнительные инвестиции в инфраструктуру и более активное внешнее участие позволят провести в следующие десятилетия важные исследования в области инновационных энергетических систем, основанных на процессах деления атомных ядер и термоядерного синтеза», — сказал он.

Миссии ИРРУР организуются по запросу и могут быть посвящены таким вопросам, как работа исследовательского реактора в целом или же направления работы, специфические для конкретной установки. Эти обзоры основаны на руководящих материалах МАГАТЭ по стратегическому планированию и оптимизации использования исследовательских реакторов, а также на передовой международной практике.

В 2023 году МАГАТЭ опубликовало документ «IRRUR Guidelines» («Руководящие принципы ИРРУР»), который содержит данные о подготовке к миссиям ИРРУР, их проведении и подготовке отчетов, а также информацию для проведения самооценки эксплуатирующими организациями исследовательских установок. В 2020 году МАГАТЭ опубликовало также электронный учебный курс по стратегическому планированию для повышения эффективности использования исследовательских реакторов.

Миссии ИРРУР

2019: Италия (пилотная)

2022: Перу, Чили, Южная Африка

2023: Исламская Республика Иран, США
(2 миссии)

2024: Канада (планируется)

МАГАТЭ помогает африканским ученым реализовать потенциал исследовательских реакторов для целей социально-экономического развития

Омар Юсуф

Первые урановые месторождения в Африке были открыты в 1915 году в деревне Шинколобве на юге современной Демократической Республики Конго. Примерно через четыре десятилетия с физического пуска в 1958 году в Демократической Республике Конго исследовательского реактора TRICO I в Университете Киншасы, первого сооруженного в регионе подобного реактора, началась история ядерной науки и технологии в Африке. Вскоре примеру Демократической Республики Конго последовали Египет и Южная Африка, которые ввели в эксплуатацию свои реакторы в 1958 и 1965 годах соответственно. С тех пор исследовательские реакторы играют важнейшую роль в социально-экономическом развитии континента.

В настоящее время в Африке действуют **11** исследовательских реакторов в **8** странах: Алжире, Гане, Демократической Республике Конго, Египте, Ливии, Марокко, Нигерии и Южной Африке.

В настоящее время в Африке действуют 11 исследовательских реакторов в 8 странах: Алжире, Гане, Демократической Республике Конго, Египте, Ливии, Марокко, Нигерии и Южной Африке. Тепловая мощность этих установок составляет до 22 мегаватт. Их регулярно используют в многочисленных применениях, в том числе в целях оказания содействия африканским фермерам в устойчивом управлении земельными ресурсами, производства радиоизотопов для жизненно важного лечения онкологических заболеваний, проведения анализа структурной целостности зданий и промышленного оборудования, а также выявления источников промышленного загрязнения воздуха.

Около десяти африканских стран в настоящее время рассматривают возможность производства электроэнергии на АЭС, при этом для многих других шагом на пути к будущим энергетическим программам станет внедрение исследовательских реакторов. Оно позволит сформировать штат квалифицированных сотрудников, у которых будет соответствующий потенциал.

Некоторые страны, у которых нет исследовательских реакторов, включая Замбию, Кению, Нигер, Объединенную Республику Танзанию, Руанду, Сенегал,

Уганду и Эфиопию, в настоящее время планируют сооружение исследовательских реакторов или рассматривают такую возможность и уже определили интересующие их конкретные применения и продукты или услуги.

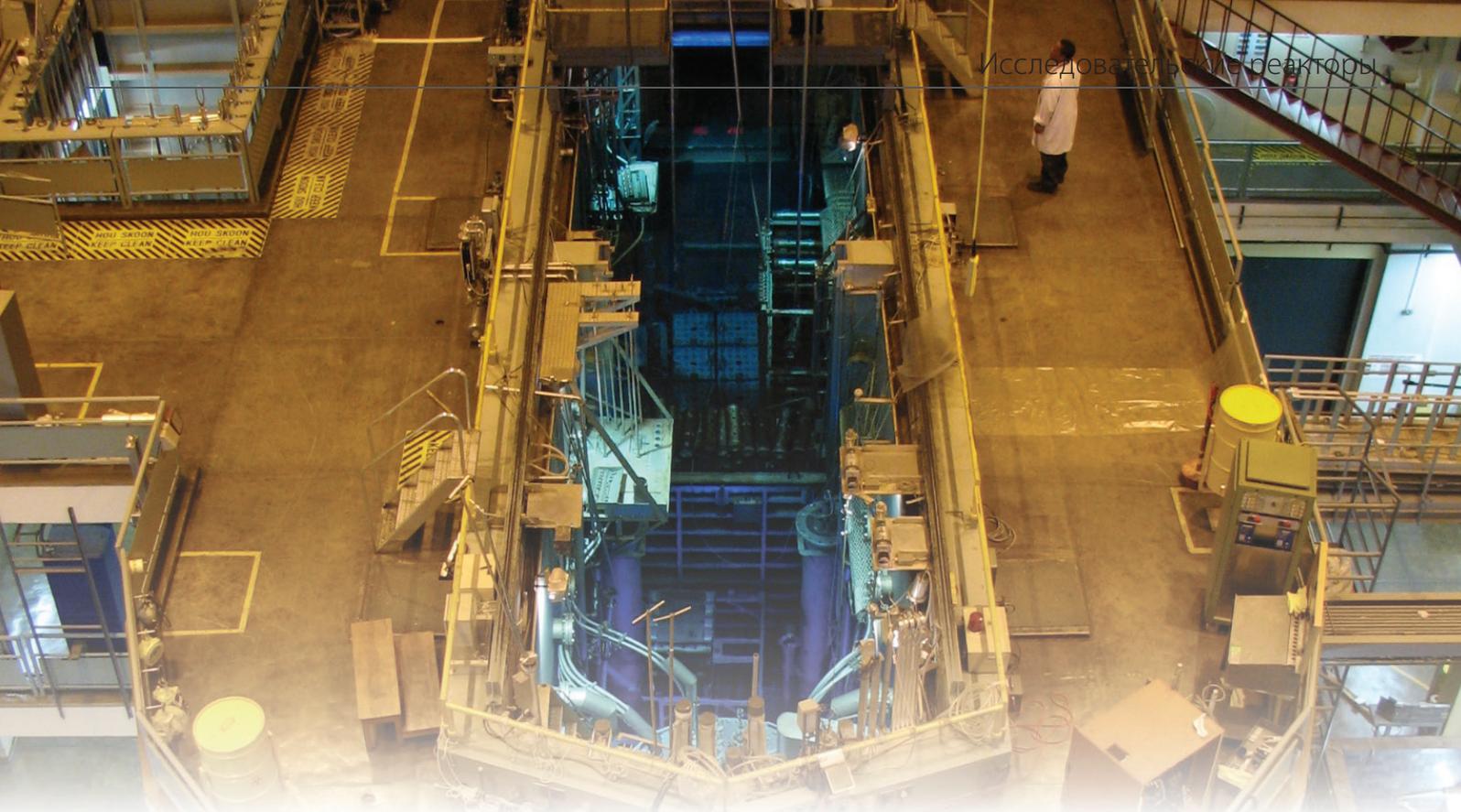
Подготовка следующего поколения специалистов по исследовательским реакторам

В последние годы усилилась потребность в радиационных услугах, которые предоставляют исследовательские реакторы, и, соответственно, в молодых специалистах, способных оказывать эти услуги. По этой причине МАГАТЭ содействует африканским странам в разработке стратегических планов по сооружению и использованию новых исследовательских реакторов.

Так, в июне 2023 года в рамках продолжающегося регионального проекта технического сотрудничества (ТС) эксперты из нескольких африканских стран приняли участие в семинаре-практикуме МАГАТЭ с целью научиться составлять стратегические планы сооружения новых исследовательских реакторов. Эти перспективные планы предусматривают как обоснование строительства установки, так и подробные рекомендации по использованию реактора, включая конкретные радиационные услуги или продукты для промышленного, медицинского и научного использования. Затем участвовавшим в проекте ученым было предложено разработать под руководством экспертов МАГАТЭ соответствующие финансовые планы и планы практической деятельности по обеспечению безопасности и устойчивости предлагаемого исследовательского реактора.

В ходе недельного учебного семинара-практикума специалисты МАГАТЭ проводили презентации и практические занятия для ученых из Замбии, Кении, Нигера, Объединенной Республики Танзания, Руанды, Сенегала, Уганды и Эфиопии.

Дополнительно с целью содействовать созданию потенциала в областях, наиболее тесно связанных с эксплуатацией исследовательских реакторов, МАГАТЭ запустило инициативу «Международные центры МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов» (ISERP) — систему, в рамках которой определяются установки, которые могут быть использованы для удовлетворения потребностей в организации обучения и проведении исследований тех стран, у которых нет регулярного доступа к исследовательским реакторам. В мае 2023



Южноафриканский исследовательский реактор SAFARI-1 находится в эксплуатации с 1965 года. Это один из пяти крупнейших в мире производителей медицинского радиоизотопа молибден-99.

(Фото: Южноафриканская ядерно-энергетическая корпорация)

года в Национальном центре ядерной энергии, науки и технологии Марокко (CNESTEN), эксплуатирующем исследовательский реактор MA-R1 и последнем на данном момент учреждения, которому был присвоен статус ИСЕРР, состоялась третья сессия Школы МАГАТЭ по исследовательским реакторам для региона Африки.

В рамках третьей сессии Школы МАГАТЭ по исследовательским реакторам для региона Африки было организовано интенсивное обучение по вопросам физики реакторов, безопасной эксплуатации и использования исследовательских реакторов, а 13 слушателям Школы, инженерам и физикам, была предоставлена возможность в режиме реального времени наблюдать за работой исследовательского реактора. В частности, слушатели смогли узнать, как специалисты CNESTEN производят медицинские радиоизотопы и проводят нейтронно-активационный анализ. «Сессия Школы была весьма познавательной, информативной, увлекательной и дала нам ценные знания, — отметил Яхайя Муса, специалист в области медицинской физики Центра энергетических исследований и подготовки кадров в Зарии, Нигерия. — Благодаря программе я расширил свои знания и развил навыки в области эксплуатации исследовательских реакторов и экспериментов».

Содействие обеспечению безопасности, эксплуатации и использованию реакторов

Пока страны-новички приступают к разработке новых исследовательских реакторных установок, пользу существующим реакторам на африканском континенте может принести совершенствование норм эксплуатационной безопасности, более эффективное оперативное планирование, а также установление

более тесной связи между услугами исследовательских реакторов и насущными национальными задачами в области развития.

Именно такую цель ставит перед собой еще один текущий проект ТС МАГАТЭ, который направлен на совершенствование аспектов безопасности и стратегической эксплуатации парка исследовательских реакторов в Африке и реализуется по линии Африканского регионального соглашения о сотрудничестве при проведении исследований, разработок и при подготовке кадров в связанных с ядерной наукой и техникой областях (АФРА). От подготовки документов по безопасности до проведения периодических экспертиз безопасности и реализации механизмов аварийной готовности — благодаря научным командировкам участвующим в проекте странам, каждая из которых в настоящее время эксплуатирует исследовательские реакторы, удалось выявить оптимальные способы обеспечения наиболее полного выполнения положений соответствующих норм безопасности МАГАТЭ и руководящих материалов.

Ведущие африканские ученые посетили также исследовательские реакторные установки в Германии, Малайзии, Нидерландах, Таиланде, Франции, Чешской Республике и на Ямайке, чтобы увидеть и изучить, как их зарубежные коллеги применяют нормы безопасности МАГАТЭ и рекомендации по управлению старением, а также реализуют на своих установках программы по использованию. Такие посещения площадок и обмен знаниями призваны укрепить региональный потенциал, повысить эффективность использования исследовательских реакторов в интересах социально-экономического развития и обеспечить их эксплуатационную безопасность.

Сети исследовательских реакторов оптимизируют работу с целью удовлетворить растущий спрос

Мелисса Эванс

Для ядерного сообщества исследовательские ядерные реакторы представляют собой важные научные центры, на базе которых проводят учебные занятия и эксперименты, а также изготавливают ценные продукты и оказывают услуги, в частности производят радиоизотопы для медицинских, сельскохозяйственных и промышленных применений. В настоящее время наблюдается рост спроса на услуги более 200 находящихся в эксплуатации по всему миру исследовательских реакторов, и МАГАТЭ помогает персоналу исследовательских реакторов удовлетворить этот спрос за счет создания сетей, которые способствуют развитию сотрудничества, в целях оптимизации работы.

В 2023 году при поддержке МАГАТЭ была учреждена Региональная сеть исследовательских реакторов и профильных учреждений в Латинской Америке и Карибском бассейне (РИАЛК). РИАЛК была создана на региональном уровне для решения общих региональных задач и объединяет 9 стран, которые эксплуатируют 16 исследовательских реакторов. Благодаря объединению усилий каждая страна пользуется преимуществами знаний широкого круга экспертов и возможностями других исследовательских реакторов — участников Сети. Это позволяет сосредоточить усилия в ходе работы каждой исследовательской реакторной установки на той области, в которой установка имеет конкурентные преимущества, и обеспечить при этом более полное удовлетворение региональных потребностей и повышение эффективности предоставляемых услуг. Сеть провела оценку своего парка исследовательских реакторов с целью определить национальные и региональные приоритеты, а также области специализации каждого реактора. Кроме того, ведутся сравнительные испытания, которые призваны помочь стандартизировать дальнейшую работу.

Марио Мальяупома, координатор РИАЛК и президент Перуанского института ядерной энергии, объясняет: «В интересах развития ядерных технологий все страны согласились работать согласованным и скоординированным образом, как единый блок. Уровень развития той или иной страны весьма неодинаков, однако именно в этом и заключается дополнительная ценность РИАЛК — указать те направления, которые уже освоены в регионе, и дать странам возможность продемонстрировать свою инфраструктуру и ресурсы. РИАЛК была основана не только из-за желания стран региона поддерживать друг друга, но и из-за стремления лиц, ответственных за принятие решений, взять на себя подлинные обязательства по выполнению задач в области устойчивого развития в регионе и повышению качества жизни людей».

РИАЛК работает по пяти тематическим направлениям: обучение и подготовка кадров, эксплуатация и управление старением, применения реакторов, например, в геохронологии, нейтронная визуализация и нейтронно-активационный анализ, а также производство радиоизотопов.

После запуска РИАЛК в феврале 2023 года Чилийская комиссия по ядерной энергии (ЧКЯЭ) приняла у себя в стране технических экспертов из Перу, чтобы обсудить нейтронно-активационный анализ — применение в сфере неразрушающих испытаний, которое служит для выявления микроэлементов и часто осуществляется на исследовательских реакторах благодаря их возможностям получения нейтронного потока. Мальяупома отмечает, что «у Перу есть исследовательский реактор мощностью 10 мегаватт — самый мощный в регионе и способный производить самый большой поток нейтронов. Перу будет развивать и поощрять более широкое использование своего исследовательского реактора в интересах развития научно-исследовательской деятельности, а также производства товаров и услуг совместно с другими странами региона Латинской Америки и Карибского бассейна».

В сентябре 2023 года в ходе 67-й сессии Генеральной конференции МАГАТЭ был выпущен новый электронный учебный курс «Стратегическое планирование для национальных ядерных учреждений» на испанском языке, который дополнил англоязычный курс на ту же тему. Курс был адаптирован к специфике региона Латинской Америки и Карибского бассейна и учитывает, в частности, результаты двух подробных ситуационных исследований, проведенных представителями РИАЛК из Аргентины и Чили. Курс основан на публикации МАГАТЭ 2017 года «Strategic Planning for Research Reactors» («Стратегическое планирование в отношении исследовательских реакторов») (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.16) и посвящен оперативному управлению исследовательскими реакторами. Слушатели курса учатся устанавливать приоритетность потребностей в различных видах услуг для обеспечения эффективности и устойчивости исследовательских реакторов. Курс опирается на опыт МАГАТЭ в области содействия стратегическому планированию в отношении исследовательских реакторов. С 2014 года МАГАТЭ в ответ на запросы стран предоставило экспертные консультации по 95 стратегическим планам в отношении 63 реакторов.



В рамках Инициативы в области исследовательских реакторов в Восточной Европе организованы учебные курсы на базе исследовательских реакторных установок Венского технического университета с целью помочь студентам приобрести практические навыки работы. (Фото: МАГАТЭ)

Сеть РИАЛК идет по стопам сетей исследовательских реакторов, как региональных, так и технических, которые ранее были созданы при поддержке МАГАТЭ. Инициатива в области исследовательских реакторов в Восточной Европе (EERRI) была учреждена в 2008 году. Подобно РИАЛК, EERRI ставит целью поддержку региональных усилий по подготовке кадров, а также оптимизацию услуг. В эту сеть входят семь стран (Австрия, Венгрия, Польша, Румыния, Сербия, Словения и Чешская Республика), а мероприятия проводятся на базе участвующих учреждений. При поддержке МАГАТЭ в рамках EERRI были проведены 18 сессий шестинедельного учебного курса для молодых специалистов ядерной отрасли. Программа курса, рассчитанного на подготовку следующего поколения сотрудников исследовательских реакторов, включает технические лекции, посещение площадок и практические занятия на исследовательских реакторных установках участников EERRI.

Обмен техническим опытом лежит в основе другой сети исследовательских реакторов при поддержке МАГАТЭ, Глобальной сети исследовательских реакторов TRIGA (ГСИРТ). В настоящее время в мире эксплуатируется более 30 реакторов TRIGA (аббревиатура, состоящая из первых букв английских слов «Training, Research, Isotopes, General Atomics» — «подготовка, исследования, изотопы, «Дженерал атомикс»»), которые

сконструированы и функционируют схожим образом. ГСИРТ была запущена в ноябре 2013 года с целью помочь операторам исследовательских реакторов TRIGA из 15 стран в решении общих проблем, в том числе связанных с низкообогащенным урановым топливом для реакторов TRIGA, приобретение которого и захоронение после использования становятся все более сложными. «ГСИРТ — это ведущий ресурс по исследовательским реакторам TRIGA, и участники сети используют ее для обмена информацией и помощи друг другу, например, при поиске необходимых для проведения экспериментов запасных частей, поскольку найти потенциальных поставщиков иногда оказывается весьма непросто», — говорит Нуну Песоа Баррадаш, специалист МАГАТЭ по исследовательским реакторам.

МАГАТЭ помогает странам совершенствовать услуги исследовательских реакторов. Исследовательские реакторы — это единственные в своем роде научные учреждения, и созданные при поддержке МАГАТЭ специализированные сети представляют собой платформу, благодаря которой специалисты по исследовательским реакторам со всего мира могут работать над решением общих задач и путем взаимодействия в полной мере реализовывать потенциал своих учреждений.

Поддержание работы мирового парка устаревающих исследовательских реакторов

Эмма Миджли

Сейчас в эксплуатации находится более 220 исследовательских реакторов, которые позволяют оказывать такие важные услуги, как производство медицинских радиоизотопов, и проводить научные исследования в области сельского хозяйства и промышленности. Однако эти установки стареют: большая часть мирового парка исследовательских реакторов работает уже более 50 лет. При поддержке МАГАТЭ операторы и регулирующие органы осуществляют реконструкцию и модернизацию этих реакторов, чтобы они могли и далее использоваться для обеспечения соответствующей продукции и услуг и отвечать требованиям ядерной и физической безопасности.

«Во многих странах замены этим старым исследовательским реакторам нет, а строительство новых не планируется, — говорит технический руководитель по эксплуатации и техническому обслуживанию исследовательских реакторов МАГАТЭ Рубен Масси. — Мы помогаем странам принимать меры для поддержания этих реакторов в рабочем состоянии. Каждый реактор индивидуален и стареет по-своему. Важную роль в управлении старением играют предоставляемые МАГАТЭ

ресурсы и услуги, призванные поддержать эксплуатацию мирового парка реакторов».

Предвидя старение все большего числа исследовательских реакторов, в 2001 году МАГАТЭ приступило к осуществлению Плана повышения безопасности исследовательских реакторов. Этот план призван помочь странам обеспечить высокий уровень безопасности исследовательских реакторов. Он включает в себя Кодекс поведения по безопасности исследовательских реакторов, который служит для стран руководством при разработке и согласовании мер политики и правил, касающихся безопасности исследовательских реакторов. В рамках этого плана страны при содействии МАГАТЭ работают над внедрением программ управления старением на систематической основе.

МАГАТЭ предоставляет различные дополнительные услуги, чтобы помочь странам управлять их стареющими исследовательскими реакторами. Оно разрабатывает и продолжает обновлять нормы безопасности и технические руководства, а также проводит независимые экспертизы и оказывает консультационные услуги, организует технические совещания, семинары-практикумы и учебные курсы.

Во время миссии по оценке эксплуатации и обслуживания исследовательских реакторов на исследовательском реакторе «Мария» в Польше в 2022 году эксперты обсудили системы обеспечения качества и управления, практику эксплуатации и обслуживания, а также программу управления старением.

(Фото: Национальный центр ядерных исследований, Польша)





Визуальный осмотр и неразрушающий контроль используются для оценки безопасности и эксплуатационных условий конструкций, систем и элементов реакторной установки, включая опору и решетку активной зоны реактора.

(Фото: Р. Мацци/МАГАТЭ)

МАГАТЭ адаптировало методологию миссий по аспектам безопасности долгосрочной эксплуатации (САЛТО) для атомных электростанций, чтобы сделать ее применимой к исследовательским реакторам, и завершило первую миссию САЛТО для исследовательского реактора в 2017 году на исследовательском реакторе BR2 в Бельгии. В ходе миссий САЛТО проводится оценка действующих на установке процедур и сложившейся практики на предмет соответствия нормам безопасности МАГАТЭ и предоставляются рекомендации по дальнейшему повышению безопасности и эффективности проектов модернизации и реконструкции таких установок. «Реконструкция и модернизация касаются не только систем и компонентов, но и повышения безопасности, чтобы реакторная установка соответствовала актуальным нормам безопасности МАГАТЭ», — говорит начальник Секции безопасности исследовательских реакторов МАГАТЭ Амгад Шокр.

Чтобы оценить влияние старения на безопасность и эксплуатацию или избежать дорогостоящего ремонта, необходимо регулярно обследовать конструкции, системы и элементы (КСЭ) реакторной установки на предмет их потенциальной деградации. Чтобы удостовериться в неизменной способности КСЭ выполнять предусмотренные функции и убедиться, что реактор работает в рамках соответствующих эксплуатационных пределов и условий, эксплуатирующие организации осуществляют программы планового технического обслуживания и периодических испытаний. В некоторых случаях для проведения таких проверок требуются специальные методики и дополнительные ресурсы, которые могут быть доступны не всем эксплуатирующим организациям.



Подводные радиационно-устойчивые камеры высоко разрешения используются для проверки и контроля сварных швов баков исследовательских реакторов.

(Фото: Р. Мацци/МАГАТЭ)



МАГАТЭ по запросу предоставляет странам необходимое оборудование или консультации экспертов, чтобы операторы могли проводить ту или иную инспекционную деятельность в рамках инспекций в процессе эксплуатации (ИПЭ). В ходе ИПЭ оценивается состояние элементов, важных для безопасности и работы реакторов. Структурные дефекты и повреждения физической инфраструктуры реактора можно отслеживать с помощью специального оборудования. Такие обследования, проводимые с помощью подводных радиационно-стойких камер и других специальных инструментов, позволяют заблаговременно выявлять трещины, другие дефекты или слабые места в конструктивных элементах бетонных и металлических частей реактора и контролировать изменения в их состоянии. В 2024 году МАГАТЭ планирует выпустить новую публикацию с рабочим названием «Руководство по программе неразрушающего контроля, инспекций в процессе эксплуатации и мониторинга исследовательских реакторов в реальном времени».

Обеспечение большей устойчивости

Еще одно направление помощи странам в управлении старением реакторов — это миссии по независимой экспертизе в рамках оценки эксплуатации и обслуживания исследовательских реакторов (ОМАРР). В ходе миссий ОМАРР оцениваются прежде всего аспекты эксплуатации и обслуживания, которые необходимо учитывать на протяжении всего срока службы исследовательского реактора, начиная с ввода в эксплуатацию и заканчивая выводом из эксплуатации. Благодаря миссиям ОМАРР

страны могут повысить устойчивость и надежность того или иного исследовательского реактора и оптимизировать использование людских и финансовых ресурсов с учетом норм МАГАТЭ, надлежащей международной практики и национальных правил.

В ходе этих миссий выявляются области, в которых необходимы улучшения, решаются конкретные эксплуатационные проблемы и создается платформа для обмена опытом и положительной практикой между международными экспертами и местными сотрудниками. С 2012 года миссии ОМАРР и пред-ОМАРР проводились или проводятся в Бангладеш, Демократической Республике Конго, Индонезии, Исламской Республике Иран, Италии, Польше, Португалии, Соединенных Штатах Америки, Таиланде, Узбекистане и Чили.

Исполнительный директор по эксплуатации реакторов Южноафриканской ядерно-энергетической корпорации Сэмми Малака принимал участие в качестве эксперта в миссии пред-ОМАРР в 2018 году и в ИПЭ в 2023 году на исследовательском реакторе TRICO II в Демократической Республике Конго. С 2004 года реактор TRICO II находится в состоянии длительного останова, и теперь планируется осуществить его перезапуск и возобновить работу для проведения научных исследований, подготовки кадров, производства радиоизотопов и характеристики материалов.

«Успешное выполнение обеих миссий позволит определить минимальный перечень КСЭ установки TRICO II для обоснования программы перезапуска реактора и его долгосрочной эксплуатации, — говорит

Что подразумевается под старением исследовательского реактора?

Применительно к исследовательским реакторам выделяются два вида старения.

Физическое старение — это ухудшение физического состояния систем и элементов реактора. Со временем воздействие агрессивных сред и условий эксплуатации, таких как облучение, наличие коррозионных веществ и вибрации, приводит к деградации некоторых материалов и компонентов.

Устаревание — это другой вид старения, в процессе которого теряют свою актуальность технологии, используемые в компьютерах, контрольно-измерительных приборах и системах управления, или же меняются и устаревают применимые нормы безопасности.

Сэмми Малака. — В частности, мы подчеркнули важность реализации соответствующей программы для управления старением КСЭ, а также для контроля и мониторинга проектов по усовершенствованию, модернизации или замене, поскольку это может иметь положительный эффект для установки в долгосрочной перспективе после успешного осуществления программы перезапуска».

В мае 2023 года при поддержке экспертов из Австралии и Чехии была проведена миссия ОМАРР на Тайском исследовательском реакторе-1/модификации 1 (TRR-1/M1) в Таиланде, который используется для производства радиоизотопов, проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а

также для обучения и подготовки кадров. «Предложения, вынесенные по итогам миссии ОМАРР, были полезны для разработки и внедрения программ систематического и эффективного технического обслуживания и управления старением реактора TRR-1/M1, призванных улучшить эксплуатационные показатели и повысить эффективность его использования, — говорит менеджер по реакторам Таиландского института ядерных технологий Канократ Тияпун. — Это имеет ключевое значение для устойчивого развития ядерного потенциала — экспертных знаний в области техники и людских ресурсов — и инфраструктуры, необходимых для осуществления в будущем ядерных программ в Таиланде».

Миссии по экспертной оценке и консультационные услуги

МАГАТЭ оказывает более 30 видов экспертных и консультационных услуг, чтобы помочь странам укреплять и усовершенствовать их подходы в ядерной области. Независимые экспертизы, которые организуются по запросу, проводятся под руководством МАГАТЭ при поддержке групп международных экспертов. В ходе таких экспертиз оценивается национальная инфраструктура страны и сложившаяся практика работы с учетом рекомендаций МАГАТЭ, норм безопасности и надлежащей международной практики. В рамках этих услуг, которые часто называют миссиями, особое внимание уделяется целому ряду специальных областей, начиная от ядерной безопасности и заканчивая аспектами здравоохранения.

МАГАТЭ предлагает несколько видов миссий по независимой экспертизе, призванных помочь странам обеспечить безопасное, надежное, бесперебойное и устойчивое использование их исследовательских реакторов. Исследовательским реакторам посвящены следующие экспертные услуги МАГАТЭ: комплексная оценка ядерной инфраструктуры для исследовательских реакторов (ИНИР-РР), комплексный обзор использования исследовательских реакторов (ИРРУР), комплексная оценка безопасности исследовательских реакторов (ИНСАРР) и услуги по оценке эксплуатации и обслуживания исследовательских реакторов (ОМАРР). К исследовательским реакторам, а также к атомным электростанциям применима и деятельность Международной консультативной службы по физической защите (ИППАС), которая занимается вопросами физической ядерной безопасности, и независимая экспертиза аспектов безопасности долгосрочной эксплуатации (САЛТО).

Эксперты миссии МАГАТЭ и сотрудники Исследовательского центра «Ржеж» (ИЦР) обсуждают рекомендации по результатам рассмотрения в рамках комплексной оценки безопасности исследовательского реактора LVR-15 в Ржеже, Чешская Республика, в 2023 году.

(Фото: ИЦР)



Планирование людских ресурсов для программ создания исследовательских реакторов

Сара Кучебаг

Для стран, планирующих начать или расширить программу создания исследовательских реакторов, одним из этапов, который необходимо пройти, прежде чем приступить к инвестированию значительных средств в эту программу, является разработка стратегии управления людскими ресурсами (УЛР). МАГАТЭ оказывает помощь странам в области УЛР при помощи инструментов моделирования, учебно-образовательных ресурсов, публикаций и услуг по экспертной оценке.

Ядерная отрасль требует высокого уровня качества при планировании людских ресурсов, в том числе для программ создания исследовательских реакторов, и обеспечить ее безопасность и устойчивость невозможно без хорошо подготовленной рабочей силы. В связи с этой рабочей силой возникает ряд проблем, включая выход в отставку квалифицированного персонала и проблемы удержания талантливых специалистов. Страны и организации должны признать важность разработки и реализации стратегии УЛР для увеличения числа квалифицированных работников в долгосрочной перспективе, равно как и для их удержания.

«Управление людскими ресурсами — это необходимый фундамент для успешной разработки проектов, — говорит Шейх Ниане, технический координатор проекта первого исследовательского реактора в Сенегале и генеральный секретарь министерства нефтяной промышленности и энергетики. — Мы должны определить, в каком состоянии находится наша рабочая сила, в которой нуждается ядерная программа страны, и каким должен быть наш кадровый резерв».

Сенегал относится к числу стран, в планах у которых — создание первого исследовательского реактора. В декабре 2022 года в Сенегале был организован пилотный тренинг МАГАТЭ, посвященный инструменту МАГАТЭ по моделированию людских ресурсов для программ создания новых исследовательских реакторов, который был разработан на основе инструмента моделирования «Людские ресурсы в ядерно-энергетической отрасли» (ЛРЯЭО), предоставленного МАГАТЭ Соединенными Штатами Америки в 2011 году. ЛРЯЭО помогает странам понять их потребности в рабочей силе и динамику людских ресурсов, когда они планируют начать программу развития ядерной энергетики.

Новый инструмент для программ создания исследовательских реакторов помогает странам лучше понять потребности в людских ресурсах и осознать необходимость планомерного формирования национальной рабочей силы в этой области.

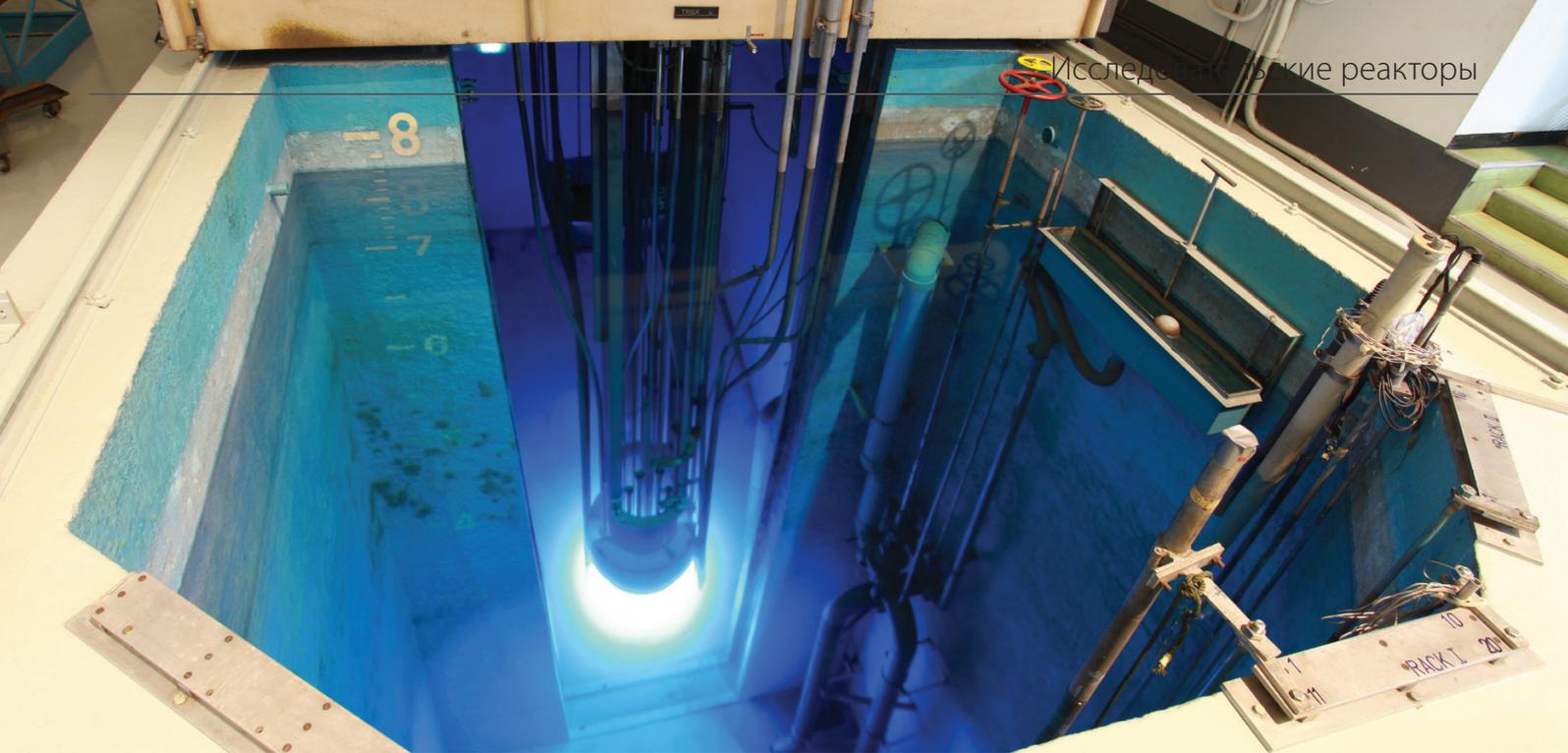
Семинар-практикум, проведенный в Сенегале, включал демонстрацию модели людских ресурсов, установку и настройку инструмента на компьютерах участников, а также обучение базовым навыкам использования динамического моделирования и выполнение упражнений. На нем также рассматривались передовые методы планирования рабочей силы, обеспечения безопасности и управления данными о людских ресурсах.

В апреле 2023 года аналогичный тренинг был организован в Таиланде, где работает один и проектируются два исследовательских реактора, чтобы ознакомить персонал с использованием инструмента моделирования и поделиться замечаниями относительно плана формирования рабочей силы в Таиланде. Кроме того, на этом тренинге была предоставлена информация о руководящих материалах МАГАТЭ и оказано содействие в решении вопроса о том, как наилучшим образом адаптировать инструмент моделирования ЛРЯЭО к будущим исследовательским реакторам.

«Как указывается в вековом подходе МАГАТЭ, развитие людских ресурсов — это одна из важных составляющих создания инфраструктуры для нового исследовательского реактора, — говорит менеджер по реакторам Таиландского института ядерных технологий Канократ Тияпун. — Результаты, полученные при помощи этой модели, будут использоваться как вспомогательный документ на переговорах с лицами, принимающими решения, по поводу потребностей в людских ресурсах, компетентности и способности страны выполнить требования программы создания нового исследовательского реактора».

Больше ресурсов для удовлетворения потребностей в рабочей силе

МАГАТЭ также предоставляет бесплатные онлайн-учебные материалы по развитию людских ресурсов, включая онлайн-модули и публикации. Недавно вышедшая публикация «Managing Human Resources in the Field of Nuclear Energy» («Управление людскими ресурсами в области ядерной энергии») (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-2.1 (Rev. 1)) содержит руководящие указания для лиц, принимающих решения, и старших руководителей, ответственных за формирование компетентной и устойчивой рабочей силы. В ней освещаются ключевые элементы УЛР — такие как планирование, обучение и повышение квалификации рабочей силы и организация служебной деятельности, — которые должны быть интегрированы в стратегию управления людскими ресурсами страны. В публикации описаны четкие признаки эффективного УЛР, которые



TRR-1/M1 — это исследовательский реактор TRIGA Mark III, эксплуатируемый Таиландским институтом ядерных технологий (ТИЯТ) в Бангкоке, Таиланд. (Фото: ТИЯТ)

могут идеально подойти для старших руководителей, специалистов по управлению кадрами и менеджеров среднего звена. Эта публикация также полезна для стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, а также для стран, которые стремятся оптимизировать свою нынешнюю ядерную программу.

Помимо легкодоступных материалов, веховый подход МАГАТЭ содействует странам, делающим первые шаги в ядерной энергетике, в разработке ядерно-энергетических программ при помощи поэтапного подхода, который применим и к программам создания исследовательских реакторов. Когда страна решает заняться созданием исследовательского реактора на основе вехового подхода, она начинает с обоснования необходимости сооружения исследовательского реактора, что в итоге завершается строительством и пуском в эксплуатацию нового реактора — при условии, что на этом пути будут выполнены все требования.

Развитие людских ресурсов — это один из 19 инфраструктурных элементов, наряду с развитием регулирующего органа и правовой базы, а также обеспечением ядерной и физической безопасности, которые являются частью вехового подхода. Он может быть рассмотрен миссией по комплексной оценке ядерной инфраструктуры для исследовательских реакторов (ИНИР-РР), помогающей странам определить состояние их национальной ядерной инфраструктуры и выявить потребности в ее дальнейшем развитии для нужд проекта — начиная с планирования и заканчивая выводом из эксплуатации.

«Наличие адекватных людских ресурсов является залогом успеха любого проекта, — говорит руководитель Секции исследовательских реакторов МАГАТЭ Петр Чакров. — Развитие этих ресурсов — сложный, динамичный процесс, и наш новый инструмент моделирования помогает странам более комплексно и реалистично планировать людские ресурсы для программ создания исследовательских реакторов».

Поддержка женщин в ядерной сфере

В 2020 году МАГАТЭ начало реализацию Программы стипендий имени Марии Склодовской-Кюри (ПСМСК) в целях оказания поддержки следующему поколению женщин, работающих в ядерной области, за счет предоставления стипендий для получения степени магистра по специальностям в ядерной области. Запущенная в марте 2023 года новая инициатива МАГАТЭ — Программа имени Лизе Майтнер — дает женщинам-специалистам на начальных и средних должностях возможность принять участие в многонедельных учебных поездках на ядерные установки.

The IAEA

Marie Skłodowska-Curie
FELLOWSHIP PROGRAMME

The IAEA

Lise Meitner
PROGRAMME

Быстро и эффективно:

новый подход к обновлению руководств по безопасности МАГАТЭ

Вольфганг Пикот

Для развития ядерной науки, проведения экспериментов и производства жизненно важных изотопов для медицинских и других целей необходимы исследовательские реакторы. Незаменимую роль в обеспечении безопасности этих установок играют руководства по безопасности исследовательских реакторов МАГАТЭ. Руководства по безопасности — это один из трех сводов публикаций, составляющих Серию норм безопасности МАГАТЭ. Серия включает в себя следующие своды публикаций

1. **«Основы безопасности»**, в которых изложены основополагающие цели безопасности и принципы обеспечения защиты и безопасности на языке, понятном неспециалистам.
2. **«Общие требования безопасности» (GSR) и «Конкретные требования безопасности» (SSR)**, в которых установлены требования, которые необходимо выполнять для обеспечения защиты людей и окружающей среды как в настоящее время, так и в будущем; они также призваны помочь странам в создании национальной системы нормативного регулирования.
3. **«Общее руководство по безопасности» (GSG) и «Специальное руководство по безопасности» (SSG)**, в которых представлена надлежащая международная практика и все в большей степени отражены примеры

передового опыта, а также содержатся рекомендации и руководства по выполнению требований SSR.

Учитывая крайне технический характер руководств по безопасности, их обновление представляет собой сложный процесс. Информация, которая собирается и добавляется в руководства, основана на разнообразном опыте использования ядерных технологий по всему миру. Подготавливаемые МАГАТЭ проекты руководств, которые готовит МАГАТЭ, рассматриваются многочисленными комитетами по нормам безопасности. Эти проекты передаются также странам-участницам, которые предоставляют свои замечания и дальнейшие предложения, а затем проекты утверждает Комиссия по нормам безопасности.

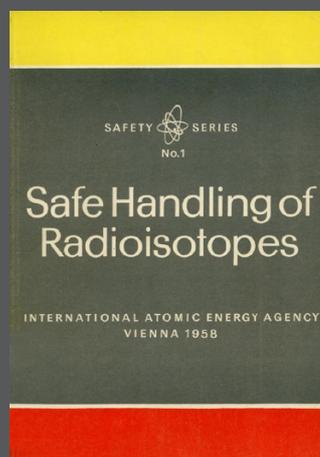
Процесс пересмотра проектов обычно длится несколько лет ввиду их сложности и необходимости тщательно учитывать достижения в области ядерных и радиологических исследований, разработок и практики обеспечения безопасности.

Однако в ходе последнего обновления 11 руководств по безопасности исследовательских реакторов МАГАТЭ применило новый подход. Агентство обновляло руководства одновременно, что ускорило процесс и позволило завершить цикл публикации за 12 месяцев, с 2022 по 2023 год.

НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ ПУБЛИКУЮТСЯ УЖЕ 65 ЛЕТ

МАГАТЭ занимается нормами безопасности уже много лет: первая публикация *«Безопасное обращение с радиоизотопами»* (Серия изданий МАГАТЭ по безопасности, № 1) была выпущена в 1958 году, всего через год после создания МАГАТЭ. Она стала также *первой публикацией МАГАТЭ*.

Сегодня пользователи в основном обращаются к публикациям Серии норм безопасности на сайте МАГАТЭ, где их можно получить бесплатно.



«Благодаря тому, что все руководства по безопасности исследовательских реакторов пересматривались одновременно в рамках отдельного процесса, странам-участницам было значительно проще подводить рассмотрение содержания норм безопасности под единую основу и своевременно предоставлять свои замечания», — отметил старший сотрудник МАГАТЭ по ядерной безопасности Дэвид Сирс, руководивший этим проектом.

Завершение такого сложного проекта в столь короткий срок представляет собой значительное достижение. «Учитывая сжатые сроки, этот проект потребовал тесного сотрудничества внутри МАГАТЭ, пристального внимания и сосредоточенных усилий экспертов, представителей стран и технических редакторов МАГАТЭ, — сказал Дэвид Сирс. — Без приверженности и преданности делу всех участников ничего бы не получилось».

В 2017 году была обновлена публикация серии SSR для исследовательских реакторов «Безопасность исследовательских реакторов» (Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-3). Она охватывает все требования к безопасной эксплуатации исследовательских реакторов, начиная с управления и регулирующего надзора и заканчивая оценкой площадки, проектированием, строительством, эксплуатацией, использованием, модификацией и выводом из эксплуатации. Кроме того, в нее включены соответствующие уроки, извлеченные по итогам ядерной аварии на АЭС «Фукусима-дайти», и выводы, сделанные на основе опыта и отзывов стран.

Последнее обновление коснулось 11 публикаций серии SSG, в которых содержатся рекомендации и представлены примеры передового опыта в части выполнения требований публикации № SSR-3, в которой дается сводный обзор всех соответствующих

вопросов. А в публикациях серии SSG рассматриваются конкретные технические вопросы, такие как техническое обслуживание, периодическое испытание и инспекции, управление активной зоной и обращение с топливом, эксплуатационные пределы и условия, контрольно-измерительные приборы и автоматика и управление старением.

«Обновлять нормы безопасности для исследовательских реакторов весьма сложно, так как последних насчитывается великое множество, — говорит менеджер по высокопоточным реакторам (HFR) Онне Ваутерс, которая работает в Группе по ядерным исследованиям и консультациям (NRG) в Нидерландах. — Руководства по безопасности МАГАТЭ актуальны для всех установок, от самых маленьких критических сборок до больших исследовательских реакторов, таких как HFR».

Многие исследовательские реакторы прошли модернизацию с установкой электронного оборудования, а другие реакторы модифицируются под новые задачи, за счет чего сфера их применения расширяется. Поскольку возраст многих исследовательских реакторов составляет несколько десятилетий, все большую важность приобретает также управление старением. «Учитывая появление новых электронных технологий и старение реакторов, мы должны постоянно задумываться над их совершенствованием и адаптацией, — говорит Онне Ваутерс. — Очень важно, чтобы эти изменения неизменно отражались в руководствах по безопасности».

Нормы безопасности МАГАТЭ не являются юридически обязательными для стран, и они могут применять их по своему усмотрению. Многие страны, использующие нормы безопасности МАГАТЭ, принимают их в рамках своих национальных нормативных актов.



Недавно МАГАТЭ
обновило 11 руководств
по безопасности
исследовательских
реакторов.

Защита исследовательских реакторов Египта от угроз физической ядерной безопасности

Василики Тафили

Применение мер физической ядерной безопасности на всех типах ядерных установок, включая исследовательские реакторы, позволяет обеспечить защиту от злоумышленных действий и других преступных или преднамеренных несанкционированных действий, которые могут иметь радиологические последствия или иной неблагоприятный исход. Международные консультационные услуги МАГАТЭ по физической защите (ИППАС) — это предоставляемые по запросу экспертные консультации по физической защите ядерного и другого радиоактивного материала и соответствующих установок и деятельности, включая исследовательские ядерные реакторы.

Когда в 2005 году Египет принимал миссию ИППАС, а в 2014 году — дополнительную миссию экспертов, независимая оценка режима физической ядерной безопасности выявила необходимость модернизации систем физической защиты на исследовательских ядерных реакторах страны.

С учетом рекомендаций миссии ИППАС и с целью повышения физической ядерной безопасности своих исследовательских реакторов, известных как ETRR-1 и ETRR-2, Египет разработал Комплексный план обеспечения устойчивости физической ядерной безопасности (КПУФЯБ) — механизм МАГАТЭ, специально предназначенный

для выявления и установления приоритетности национальных потребностей стран в области физической ядерной безопасности.

Модернизация систем физической защиты

В египетский КПУФЯБ включен проект модернизации систем физической защиты, в котором первоочередное внимание уделено системам физической ядерной безопасности, обеспечивающим защиту двух исследовательских реакторов от саботажа (диверсии), хищения или любого другого незаконного изъятия ядерного материала, а также смягчение или минимизацию радиологических последствий таких злоумышленных действий. Первые два этапа осуществления этого проекта были выполнены в 2015–2020 годах, а последний этап продолжается в настоящее время.

«Взаимодополняемость разных инструментов помощи, входящих в программу МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, хорошо видна на примере реализации конкретного проекта в Египте, — говорит директор Отдела физической ядерной безопасности МАГАТЭ Елена Буглова. — Отправной точкой сотрудничества с Египтом была миссия ИППАС; однако реализация проекта потребовала широкой технической и финансовой поддержки для разработки новых правил, создания

технического потенциала и, конечно же, модернизации систем физической защиты комплекса исследовательских реакторов».

В то время как ETRR-1 находится в состоянии длительного останова, комплекс ETRR-2 служит установкой для национальных ядерно-энергетических исследований. Он также используется в учебных целях и, что особенно важно, для производства радиоизотопов, находящих применение в медицине, сельском хозяйстве и промышленности. ETRR-2 имеет максимальную мощность 22 мегаватта и находится в Центре ядерных исследований Управления по атомной энергии Египта в Иншасе, примерно в 60 километрах от Каира. Это реактор с открытым бассейном, предназначенный для использования в ряде областей, включая нейтронную физику, материаловедение и бор-нейтронозахватную терапию для лечения онкологических заболеваний.

На ETRR-2 работают модернизированные и интегрированные системы физической защиты. «Сегодня на объекте установлены современные и разноплановые системы физической ядерной безопасности, а персонал обладает необходимыми знаниями для управления ими», — говорит руководитель отдела физической ядерной безопасности Управления ядерного и радиологического регулирования Египта Махмуд Гад. «Проект модернизации важен для национальной физической ядерной безопасности и полезен с точки зрения усиления систем физической защиты на комплексе ETRR-2», — добавляет он.

В течение всего периода реализации проекта в Египте был организован ряд национальных учебных курсов, в которых приняли участие более 80 человек. На этих

курсах освещался ряд технических вопросов, связанных с физической ядерной безопасностью, таких как получение разрешения регулирующего органа на эксплуатацию реакторов, составление нормативных документов, проверка состояния компьютерной безопасности, а также меры по предупреждению инсайдерских угроз и защите от них.

«Несмотря на такие трудности, как пандемия COVID-19, и благодаря усилиям всех заинтересованных сторон нам удалось успешно выйти на важные рубежи в намеченные сроки», — отмечает Гад. Проекту оказывалась финансовая поддержка по линии Фонда физической ядерной безопасности МАГАТЭ.

Устойчивость результатов проекта — благодаря продуманной структуре и реализации, регулярной оценке угроз, надлежащему управлению знаниями и эффективному обслуживанию — была ключевой составляющей усилий по наращиванию потенциала Египта в области физической защиты на разных этапах осуществления проекта. «Устойчивость лежит в основе проектов помощи МАГАТЭ в области физической ядерной безопасности, осуществляемых по всему миру, гарантируя, что усилия стран по укреплению режимов физической ядерной безопасности будут поддерживаться в течение длительного времени», — говорит Буглова.

МАГАТЭ работает над аналогичными проектами с другими странами, которые сочли необходимым провести техническую модернизацию систем физической ядерной безопасности своих исследовательских реакторов.

Системы физической защиты чрезвычайно важны для обеспечения физической ядерной безопасности атомных электростанций и исследовательских реакторов.
(Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)

Новые инструменты МАГАТЭ помогают странам решать вопросы обращения с отработавшим топливом исследовательских реакторов

Сара Кучебаг

Производство медицинских изотопов, образование, научные исследования, обучение, испытание материалов — области применения и преимущества исследовательских реакторов многочисленны и многообразны. Однако перед странами, использующими эти мощные инструменты или планирующими делать это, остро встает проблема обращения с отработавшим топливом, особенно в том, что касается соответствующей инфраструктуры и затрат.

Эта задача облегчается благодаря новым инструментам МАГАТЭ, и МАГАТЭ запланировало проведение семинаров-практикумов с использованием этих инструментов для того, чтобы помочь странам в процессе принятия решений.

Инструмент «Комплексная оценка принятия решений по конечной стадии топливного цикла исследовательских реакторов» (BRIDE), основанный на специально приспособленной для этого таблице формата Excel, позволяет странам провести количественное сравнение имеющихся технологий и определить наилучшую стратегию для своей ситуации. Затем инструмент «Оценка затрат на топливный цикл исследовательских реакторов в Excel» (FERREX) может выдать им детальную смету расходов на выбранную стратегию. Оба инструмента свободно предоставляются по запросу.

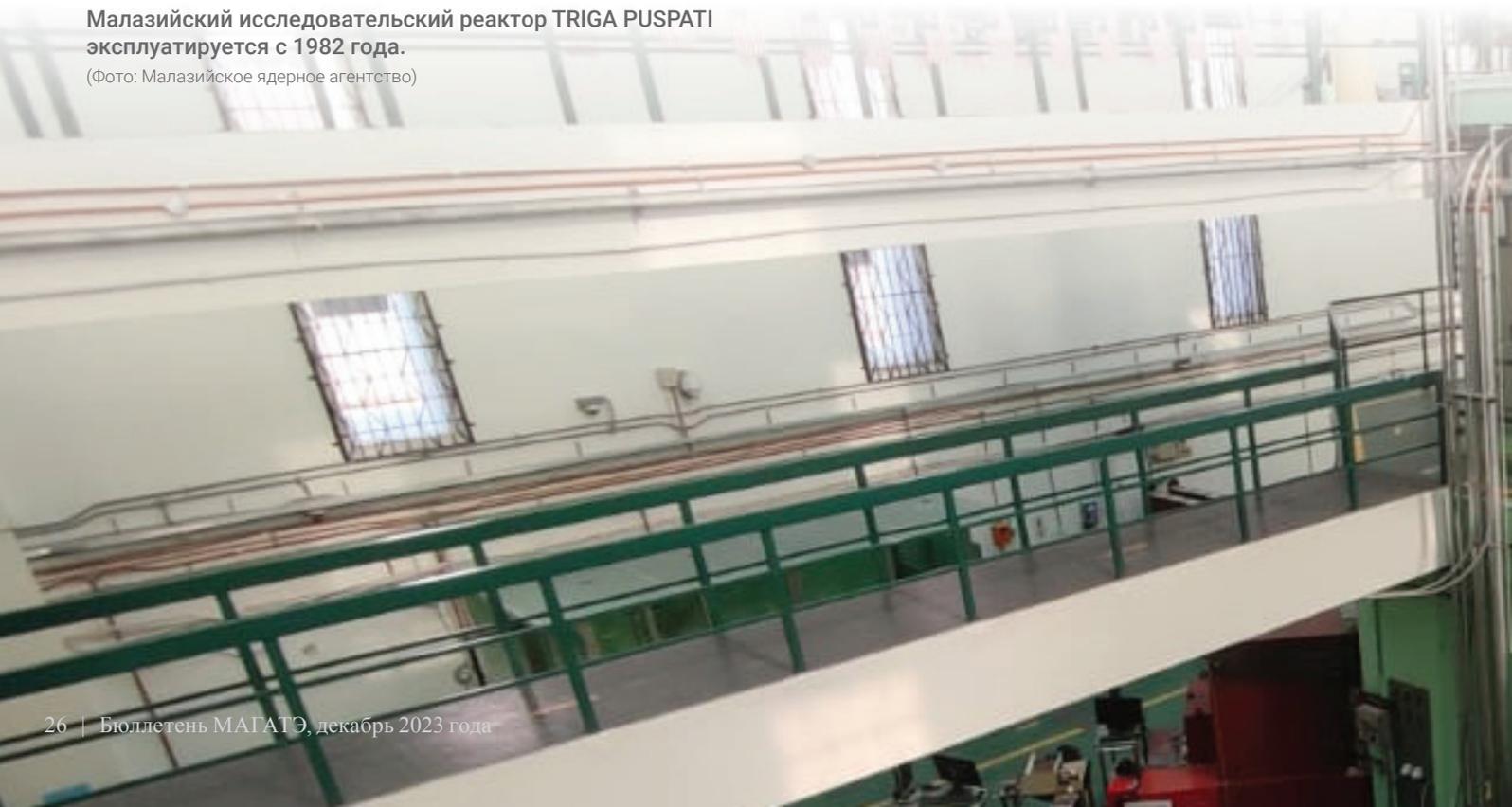
МАГАТЭ разработало учебные пособия с примерами применения этих инструментов и провело пилотный семинар-практикум по BRIDE в Малайзии в 2022 году. FERREX обсуждался на встрече по окончании семинара-практикума.

«Правильная утилизация отработавшего ядерного топлива имеет решающее значение для обеспечения безопасности, и BRIDE дал ценные подсказки для принятия обоснованных решений о месте окончательного захоронения, — говорит Джулия Абдул Карим из Малайзийского ядерного агентства (МЯА), которое эксплуатирует исследовательский реактор TRIGA PUSPATI, единственный ядерный реактор в стране. — С моей точки зрения, инструмент BRIDE особенно полезен таким странам, как Малайзия, как подспорье в стратегическом планировании будущего обращения с отработавшим ядерным топливом».

По прошествии 40 лет с начала эксплуатации TRIGA PUSPATI Малайзия начинает реализацию стратегии управления старением и строит планы обращения с отработавшим топливом. На семинаре-практикуме в ноябре 2022 года МЯА представило на рассмотрение участников семь сценариев. Затем участники в тестовом режиме применили инструмент BRIDE, сравнив затраты на каждый вид деятельности, чтобы помочь выбрать

Малайзийский исследовательский реактор TRIGA PUSPATI эксплуатируется с 1982 года.

(Фото: Малайзийское ядерное агентство)



предпочтительный вариант. Следующим шагом для Малайзии будет разработка, на основе результатов этого семинара-практикума, стратегического плана утилизации отработавшего топлива, который будет изучен правительством Малайзии и техническими специалистами.

«Этот семинар-практикум дал нам возможность помочь Малайзии разобраться во многих вариантах утилизации остатков ядерных материалов, — говорит Джон Дьюс, ведущий семинара-практикума и инженер-ядерщик МАГАТЭ. — Мы не только тщательно проанализировали затраты на каждый вариант в течение всего жизненного цикла, но и учли неэкономические аспекты, такие как воздействие на окружающую среду, доступность людских ресурсов, готовность законодательной и нормативной базы, а также политическая и общественная поддержка. Одновременно помнить обо всех этих факторах очень сложно, но инструмент BRIDE позволяет методично оценить каждый аспект, а затем обобщить результаты».

Топливный цикл исследовательского реактора

По состоянию на октябрь 2023 года в 54 странах действовало 224 исследовательских реактора, а еще 25 проектировались или находились в стадии сооружения. Топливный цикл исследовательского реактора похож на топливный цикл большинства ядерных энергетических реакторов — начиная с изготовления топлива и заканчивая обращением с отработавшим топливом и его захоронением. Как и в случае с энергетическим реактором, топливный цикл исследовательского реактора включает в себя временное хранение, а также переработку или захоронение отработавшего топлива, отнесенного к отходам. В конечном счете решение о

наилучшем методе обращения с отработавшим топливом принимается каждой страной самостоятельно.

МАГАТЭ предлагает индивидуализированные сценарии для удовлетворения потребностей той или иной страны, разработанные исходя из ее обстоятельств. В недавней публикации «Research Reactor Spent Fuel Management: Options and Support to Decision Making» («Обращение с отработавшим топливом исследовательских реакторов: возможные варианты и помощь в принятии решений») (IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.9), являющейся прямым результатом ряда проектов координированных исследований, приводится дополнительная информация о существующих стратегиях обращения с отработавшим топливом исследовательских реакторов и описывается методология принятия решений в помощь тем, кто делает выбор между несколькими вариантами.

Эта публикация помогает выбрать предпочтительный подход в зависимости от конкретной ситуации в стране, а также представляет базовые инструменты МАГАТЭ для поддержки принятия решений, которые заслуживают рассмотрения. Кроме того, в ней приводятся примеры технологий, которые используются некоторыми странами в настоящее время. В публикации также содержится информация о BRIDE и FERREX, а также разбор конкретных ситуаций и сведения об учебных пособиях в помощь пользователям.

«Эти инструменты и семинары-практикумы МАГАТЭ призваны облегчить учебный процесс, который позволяет стране сделать собственное заключение, что для нее лучше, — говорит Дьюс. — Такие страны, как Малайзия, могут затем сами выбрать наилучшее решение, воспользовавшись при этом ценнейшей поддержкой всех соответствующих заинтересованных сторон».



Опыт Бразилии

исследовательские реакторы на службе общества

Жозе Аугусту Перротта



Жозе Аугусту Перротта работает в сфере, связанной с технологиями ядерных реакторов, с 1978 года. Перротта поступил на работу в Институт ядерных и энергетических исследований (ИПЕН) Национальной комиссии по ядерной энергии Бразилии в 1983 году и вышел на пенсию из ИПЕН в июне

2022 года. Он имеет звание почетного исследователя в ИПЕН. Во время своей работы в ИПЕН он выполнял ряд технических, управленческих и координационных функций, включая работу на должностях руководителя отдела проектирования активной зоны ядерных реакторов, руководителя Центра ядерной техники, координатора программы по топливным элементам и водороду и технического координатора предприятия по строительству Бразильского многоцелевого реактора.

Значение исследовательских реакторов для всего мира можно продемонстрировать, взяв за основу идею о том, что наука, технологии, инновации и общество неразрывно связаны между собой. Научные исследования и открытия ведут к появлению новых технологий, тем самым создавая почву для инноваций, которые в конечном итоге приносят пользу обществу в таких сферах, как здравоохранение, энергетика, сельское хозяйство, промышленность и экономическое развитие. Это особенно справедливо по отношению к исследовательским реакторам.

В частности, люди ощутили преимущества исследовательских реакторов самым непосредственным образом, получив доступ к ядерной медицине, которая применяется для лечения и диагностики онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний. В Бразилии ежегодно проводится два миллиона процедур ядерной медицины, которые были бы невозможны без производства радиоизотопов на исследовательских реакторах. Это стало очевидным в 2009 году, когда прекратил работу крупнейший в мире производитель медицинских изотопов — национальный исследовательский универсальный реактор в Канаде. Бразилия, как и многие другие страны, серьезно пострадала от возникшего в результате этого глобального дефицита молибдена-99 (Mo-99), используемого для диагностической визуализации. Бразильская ядерная медицина потребляет пять процентов мировых поставок Mo-99. Вместе с тем сложившаяся ситуация вынудила Бразилию закупать этот изотоп в других странах.

После этой кризисной ситуации с поставками было принято решение начать строительство нового бразильского многоцелевого исследовательского реактора в городе Иперо, примерно в 120 километрах от Сан-Паулу. Это один из примерно 25 новых исследовательских реакторов, которые сегодня проектируются или сооружаются по всему миру. Новый реактор предназначен для производства радиоизотопов, применяемых в медицине и промышленности; кроме того, он будет использоваться для испытания топлива и материалов под облучением для нужд бразильской ядерно-энергетической программы, а также как источник нейтронных пучков для научных и прикладных исследований и инноваций.

Многие люди в Бразилии — и за ее пределами — получают пользу от исследовательских реакторов либо в силу того, что они нуждаются в радиофармацевтических препаратах, либо благодаря расширению знаний и технологических

навыков, приобретаемых ради повышения благосостояния людей и прогресса нашего общества.

Удельный вес ядерной энергетики в энергобалансе Бразилии не слишком велик: главными источниками электричества в стране являются гидроэнергетика, энергия ветра и биогаза. Тем не менее начиная с 1950-х годов Бразилия находится на переднем крае исследований в области ядерных технологий. Бразилия стала первой страной в Южном полушарии, запустившей исследовательский ядерный реактор — IEA-R1, реактор бассейнового типа мощностью 2 мегаватта. Он начал работать в 1957 году на базе учреждения, которое сегодня известно как Институт ядерных и энергетических исследований (ИПЕН) в Сан-Паулу, и используется до сих пор, производя радиоизотопы, применяемые в медицине и научных исследованиях. В 1960 году был пущен в эксплуатацию исследовательский реактор IPR-1 TRIGA мощностью 200 киловатт в Белу-Оризонти; в 1965 году — исследовательский реактор Argonauta мощностью 500 ватт в Институте ядерной техники в Рио-де-Жанейро; в 1988 году — критическая сборка IPEN/MB-01 в Сан-Паулу.

Эти исследовательские реакторы дали толчок развитию бразильских центров изучения ядерных технологий благодаря их применению в широком спектре областей — от здравоохранения до инженерно-конструкторских работ. Поскольку эти исследовательские реакторы работают на базе образовательных учреждений, студенты университетов и исследователи могут пользоваться ими для проведения научных исследований и специального обучения. За последние десятилетия бразильские исследовательские реакторы дали возможность ученым и инженерам этой страны провести научные и технологические исследования во многих областях, включая изучение материалов на предмет использования в ядерных энергетических реакторах и применение нейтронов в промышленности, сельском хозяйстве и охране окружающей среды. Среди других направлений исследовательской работы — возможности ядерного топливного цикла как для урана и тория, так и для различных соединений этих элементов; разработка ядерного топлива; исследования в области обработки и хранения радиоактивных отходов; ядерная метрология; проектирование ядерных реакторов и других ядерных и радиационных установок.

Благодаря исследовательским реакторам, которые служат фундаментом для ядерной деятельности страны, Бразилия участвует во многих новых интересных разработках в ядерном секторе. Ведутся исследования в таких областях, как термоядерный синтез, использование лазеров с высокой интенсивностью излучения, микрореакторы для космических аппаратов и малые модульные реакторы (ММР). Бразилия разработала низкообогащенное урановое топливо для использования в ММР и исследовательских реакторах. Были разработаны также водородные топливные элементы для изучения технических решений в сфере чистой энергетики.

Бразилия соблюдает Кодекс поведения по безопасности исследовательских реакторов МАГАТЭ и имеет хорошо отлаженную систему ядерной безопасности на национальном уровне, включая новый независимый орган ядерного регулирования и вовлеченные в эту работу эксплуатирующие организации. МАГАТЭ играет весьма важную роль в этой связи, поскольку предоставляемые им услуги, включая публикацию норм безопасности и технических документов МАГАТЭ, организацию семинаров, учебных курсов и симпозиумов, техническое сотрудничество и проведение миссий по экспертной оценке, дают возможность Бразилии создать на своих ядерных установках рабочую атмосферу с высокой культурой ядерной и физической безопасности.

ИПЕН не только продолжает играть роль крупного центра исследований и разработок; его программа последиplomной подготовки в области ядерных технологий в Университете Сан-Паулу имеет ключевое значение для воспитания следующего поколения бразильских специалистов по ядерным технологиям. К настоящему времени выпускниками программ магистратуры и докторантуры в Университете стали более 3300 студентов, и в ИПЕН ежегодно обучается около 1000 студентов, претендующих на получение ученых степеней разного уровня. Программа по ядерным технологиям пользуется популярностью как у мужчин, так и у женщин: в 2022 году женщины составили 46 процентов учащихся. Однако, несмотря на эти достижения, одной из самых серьезных проблем для Бразилии, омрачающих будущие перспективы исследовательских реакторов и ядерной области в целом, остаются людские ресурсы, поскольку спрос на специалистов превышает предложение. Нам следует активнее привлекать молодежь в ядерную отрасль. Без людей нам ничего не добиться.

МАГАТЭ и ФАО запускают программу «Atoms4Food» с целью расширить использование ядерных методов для обеспечения глобальной продовольственной безопасности



Запущенная МАГАТЭ и ФАО инициатива «Atoms4Food» будет содействовать странам в использовании инновационных ядерных методов различными способами для укрепления продовольственной безопасности. (Фото: К. Лаффан/МАГАТЭ)

18 октября 2023 года на Всемирном продовольственном форуме в Риме МАГАТЭ и Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) объявили о начале реализации инициативы «Atoms4Food», которая призвана помочь повысить продовольственную безопасность во всем мире и решить обостряющуюся проблему голода.

По линии «Atoms4Food» странам будет оказываться содействие в использовании инновационных ядерных методов, чтобы повысить производительность сельского хозяйства, сократить потери продовольствия, обеспечить безопасность пищевых продуктов, повысить качество питания и помочь в адаптации к последствиям изменения климата.

«Мы живем в беспрецедентное время, когда проблемы голода и неполноценного питания усугубляются и представляют угрозу для человечества, — говорится в совместном заявлении Генерального директора МАГАТЭ Рафаэля Мариано Гросси и Генерального директора ФАО Цюй Дунъюя. — Цель инициативы «Atoms4Food» заключается

в предоставлении странам принципиально новых решений с учетом их конкретных потребностей и обстоятельств при использовании преимуществ ядерных методов и других передовых технологий».

Мир стоит перед лицом многочисленных проблем в области продовольственной безопасности и питания. В 2022 году от 691 до 783 миллионов человек испытывали голод, а 3,1 миллиарда человек не могли позволить себе здоровое питание, что составляет более 40 процентов населения планеты. В то же время во всех регионах мира все более распространенной проблемой становится ожирение.

«Увеличение числа экстремальных климатических явлений приведет к тому, что все большее количество сельскохозяйственных культур не смогут давать урожай, а мировой спрос на продовольствие будет расти. Мы должны использовать все имеющиеся у нас инструменты, чтобы производить больше продовольствия, — заявил Генеральный директор Гросси. — Ядерная наука предлагает невероятные инновационные инструменты для выращивания более

сильных, здоровых и безопасных сельскохозяйственных культур и защиты пищевых продуктов, необходимых нам для жизни».

«Atoms4Food» опирается на совместный опыт МАГАТЭ и ФАО, накопленный за почти 60 лет оказания поддержки странам в использовании решений на основе ядерных и изотопных технологий для повышения продовольственной безопасности, качества питания и безопасности пищевых продуктов.

Для повышения продовольственной безопасности ядерные методы могут использоваться различными способами. Их применяют для ускорения естественного процесса мутации растений в целях выведения культур, способных лучше противостоять болезням и изменению климата. Ядерные и изотопные методы могут использоваться также для оценки потребления питательных веществ и влаги в почве, диагностики и характеристики болезнетворных патогенов у животных, выявления источников загрязнения воды и изучения различных форм неполноценного питания. Ядерный метод стерильных

насекомых воздействует на популяции насекомых и позволяет сократить применение инсектицидов при выращивании как сельскохозяйственных культур, так и домашнего скота. Облучение пищевых продуктов позволяет

гарантировать отсутствие патогенов в продуктах питания и увеличить их срок хранения, способствуя обеспечению продовольственной безопасности.

Основу этой инициативы составят специально проводимые

исследования, которые ориентированы на удовлетворение особых потребностей стран посредством применения конкретных инновационных подходов и решений.

— Шинейд Харви

В учебном центре МАГАТЭ по физической ядерной безопасности обучат противодействию ядерному терроризму

С целью содействовать все более активным усилиям по борьбе с глобальным ядерным терроризмом МАГАТЭ открыло единственный в своем роде учебный центр по физической ядерной безопасности — первый международный объект такого типа.

3 октября 2023 года Учебно-демонстрационный центр МАГАТЭ по физической ядерной безопасности (УДЦФЯБ) был официально открыт Генеральным директором МАГАТЭ Рафаэлем Мариано Гросси на церемонии в лабораториях МАГАТЭ в Зайберсдорфе, Австрия, с участием представителей 45 стран и территорий.

Центр площадью более 2000 квадратных метров предоставит слушателям курсов специализированную техническую инфраструктуру и оборудование для изучения проблем физической защиты ядерного и другого радиоактивного материала, а также обнаружения преступных действий, совершаемых в отношении ядерного материала и установок, и реагирования на них.

«Физическая ядерная безопасность — одно из важнейших направлений нашей работы по обеспечению того, что ядерный материал никогда не попадет в чужие руки, — заявил г-н Гросси. — В международном центре передового опыта в области физической ядерной безопасности будут проходить подготовку и совершенствовать свои навыки специалисты по физической ядерной безопасности и физической защите ядерного материала со всего мира».

В последние годы по мере того, как все больше стран приступают к реализации ядерно-энергетических программ, а также со вступлением в силу в 2016 году поправки к Конвенции о физической защите ядерного материала (КФЗЯМ) — единственного юридически обязывающего международно-правового документа в области физической защиты ядерного материала, МАГАТЭ получает все



В октябре 2023 года состоялось открытие Учебно-демонстрационного центра МАГАТЭ по физической ядерной безопасности. (Фото: К. Лаффан/МАГАТЭ)

больше запросов на организацию подготовки в области физической ядерной безопасности.

Новый двухэтажный центр оснащен оборудованием для имитации тех или иных условий, инструментами виртуальной реальности и передовым программным обеспечением. В нем будут проходить практические занятия по использованию систем физической ядерной безопасности для физической защиты ядерных установок, обеспечения информационной и компьютерной безопасности, в ядерной криминалистике, на крупных общественных мероприятиях и в других сферах деятельности, связанных с физической ядерной безопасностью.

«Мы предоставляем странам инструменты для эффективного использования ядерных технологий с соблюдением всех требований ядерной и физической безопасности», — добавил Генеральный директор Гросси.

В октябре центр принял первых обучающихся — слушателей курса по управлению физической безопасностью радиоактивного

материала. Это один из 23 учебных курсов и семинаров-практикумов, которые предлагаются в центре.

«Благодаря строительству этого нового центра МАГАТЭ может предложить единственные в своем роде учебные мероприятия и восполнить существующие пробелы, используя специализированное современное оборудование, инструменты компьютерного моделирования и передовые методы обучения», — говорит Елена Буглова, директор Отдела физической ядерной безопасности МАГАТЭ.

Центр является частью многофункционального здания, которое было построено за счет предоставленного 15 донорами внебюджетного финансирования на сумму более 18 млн евро, а также взносов в натуральной форме. Этот проект расширяет возможности МАГАТЭ по удовлетворению потребностей стран в создании потенциала в области физической ядерной безопасности.

— Шинейд Харви

Публикации МАГАТЭ



Читайте
бесплатно



скачать по ссылке



<https://www.iaea.org/ru/publikacii>



Для заказа книги просьба обращаться по адресу:
sales.publications@iaea.org

ЗАГРУЗИТЬ

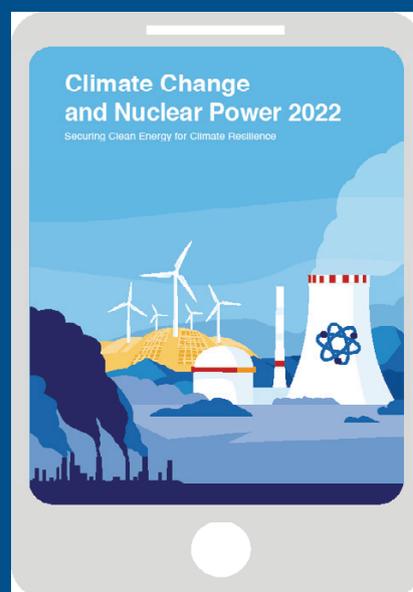
«Безопасность исследовательских реакторов»

и другие публикации МАГАТЭ, касающиеся исследовательских реакторов:

«Feasibility Study Preparation for New Research Reactor Programmes» («Подготовка технико-экономических обоснований для программ новых исследовательских реакторов»)

«Commissioning of Research Reactors» («Ввод в эксплуатацию исследовательских реакторов»)

«Post-irradiation Examination Techniques for Research Reactor Fuel» («Методы послереакторных исследований топлива для исследовательских реакторов»)



www.iaea.org/ru/bulletin/64-4

Сотрудничайте с нами

для создания энергетических систем
с нулевым уровнем выбросов

ATOMS4
NETZERO

МАГАТЭ призывает к партнерству государства-члены, предприятия отрасли, финансовые учреждения и другие заинтересованные стороны, от взаимодействия с которыми оно только выиграет за счет привлечения с их стороны экспертизы, инструментов моделирования, отраслевых знаний, публичной поддержки и финансовых ресурсов.

www.iaea.org/ru/Atoms4NetZero



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

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

или на наших страницах

