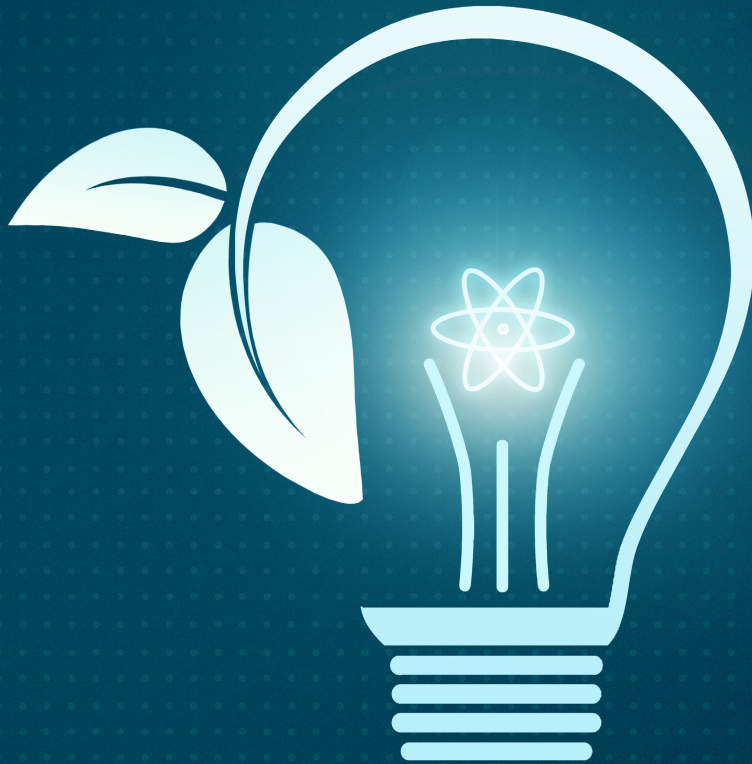


# БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Флагманская публикация МАГАТЭ | Сентябрь 2020 года | [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)



## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПЕРЕХОД К ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ



- Благодаря достижениям в области материаловедения и технологий, преимущества АЭС как поставщика экологически чистой энергии становятся еще весомее, стр. 8
- Сокращение объемов ядерных отходов и повышение эффективности как залог устойчивости энергетики в будущем, стр. 14
- Современные, стабильные, надежные: место умных сетей и ядерной энергетики в низкоуглеродных энергетических системах, стр. 22





## БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации  
коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

А/я 100, 1400 Вена, Австрия

Тел: (43-1) 2600-0

iaeabulletin@iaea.org

Ответственный редактор: Николь Яверт

Редактор: Миклош Гашпар

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по адресу:

[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

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

Взгляды, выраженные в любой подписанной статье, опубликованной в Бюллетене МАГАТЭ, необязательно отражают взгляды Международного агентства по атомной энергии, и МАГАТЭ не берет на себя ответственности за них.

Обложка: МАГАТЭ

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.

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

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

Нормы безопасности МАГАТЭ закладывают систему фундаментальных принципов безопасности и отражают международный консенсус в отношении того, что можно считать высоким уровнем безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности МАГАТЭ разрабатывались для всех типов ядерных установок и деятельности, преследующей 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.



# Создание экологически чистого энергетического будущего

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

Ядерной энергетике отведена ключевая роль в содействии преодолению глобального чрезвычайного положения в области климата.

На нее уже приходится треть мирового производства низкоуглеродной электроэнергии. Ядерная энергетика обеспечивает стабильное и надежное энергоснабжение, а ее использование может способствовать как сокращению выбросов парниковых газов, так и удовлетворению потребностей растущего мирового народонаселения, не в последнюю очередь в развивающихся странах.

Атомные электростанции практически не выбрасывают парниковых газов или загрязняющих атмосферу веществ во время эксплуатации. Количество производимых ими за весь жизненный цикл выбросов является очень небольшим. Ядерная энергетика обеспечивает жизненно важный дополнительный компонент для возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце, которые не являются постоянными.

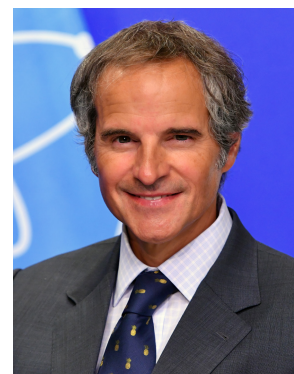
Следует больше рассказывать об уже внесенном ядерной энергетикой вкладе, например о том, что благодаря ей за последние 50 лет удалось избежать выбросов, эквивалентных 55 гигатоннам углекислого газа, а также об огромном потенциале инновационных технологий, которые находятся в процессе разработки.

Именно по этой причине я принял решение посвятить первый после моего назначения на должность Генерального директора Научный форум МАГАТЭ теме «Ядерная энергетика и переход к экологически чистой энергии». Ведущие ученые и эксперты со всего мира соберутся на два дня, чтобы обсудить, каким образом связанные с ядерной энергетикой научно обоснованные решения могут сыграть ключевую роль в том, чтобы открыть дорогу к устойчивому будущему.

В этом выпуске Бюллетеня МАГАТЭ мы подробно расскажем вам о переходе к экологически чистой энергии и о месте ядерной энергетики в этом процессе (стр. 4). Вы узнаете, как во время экстремальных событий, таких как пандемия или вызванные изменением климата опасные погодные явления, устойчивость ядерной энергетики может помочь обеспечивать непрерывное энергоснабжение (стр. 6).

Вы получите представление об инновациях, которые будут определять будущее ядерной энергетики. Например, достижения в области материаловедения позволяют гораздо дольше обеспечивать безопасную, устойчивую и экономически эффективную эксплуатацию атомных электростанций по сравнению с первоначальными планами (стр. 8). Отчасти благодаря новым концепциям, технологиям и материалам ожидается, что быстрые реакторы позволят

более эффективно производить электроэнергию с гораздо меньшим количеством отходов (стр. 14). Благодаря улучшенным конструкциям и характеристикам безопасности, крупные усовершенствованные ядерные реакторы (стр. 11), а также малые модульные реакторы и микрореакторы (стр. 16) предлагают странам более широкий выбор вариантов использования ядерной энергии для удовлетворения их потребностей в области энергоснабжения и борьбы с изменением климата.



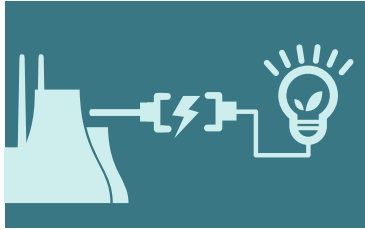
Сфера воздействия инноваций не ограничивается только производством ядерной энергии. Новаторские подходы к финансированию помогают преодолевать экономические барьеры на пути новых проектов в ядерной энергетике (стр. 24). Объединение «умных» технологий, таких как искусственный интеллект и «Интернет вещей», с ядерной энергетикой добавляет эффективности, стабильности и надежности электроэнергетическим сетям с высокой долей возобновляемых источников энергии (стр. 22). Неэлектрические применения с использованием ядерно-энергетических установок, такие как производство водорода, распространяют преимущества ядерной энергии, связанные с низкоуглеродным производством, на такие секторы, как промышленность и транспорт (стр. 18).

Прогресс в области ядерной энергетики должен сопровождаться прогрессом в области ядерной безопасности, физической безопасности и гарантий. Идет создание новой технологически нейтральной нормативной основы для того, чтобы обеспечить возможность внедрения инноваций в области ядерно-энергетических технологий без ущерба для безопасности (стр. 26). Одной из технологий, разрабатываемых для целей гарантий, являются нейронные сети, которые помогают аналитикам более эффективно и рационально использовать свое время при рассмотрении данных наблюдения, собранных в рамках деятельности по проверке, в целях предотвращения распространения ядерного оружия (стр. 28).

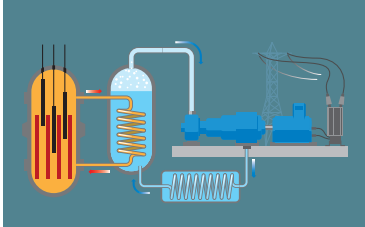
Достижение целей в области устойчивого развития и борьбы с изменением климата является колоссальной задачей. Ядерная энергия — это проверенная, зрелая технология, которая способна внести значительный вклад. МАГАТЭ будет и впредь делать все возможное для содействия переходу мира к экологически чистому энергетическому будущему за счет использования ядерных технологий.







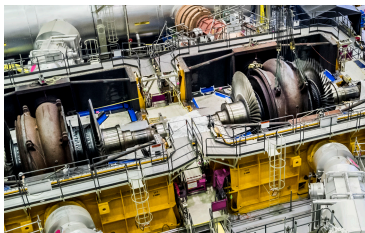
**1** Создание экологически чистого энергетического будущего



**4** Что означает переход к экологически чистой энергии и какая роль в нем отводится ядерной энергетике?



**6** Устойчивость и безопасность ядерной энергетике в условиях экстремальных ситуаций



**8** Благодаря достижениям в области материаловедения и технологий преимущества АЭС как поставщика экологически чистой энергии становятся еще весомее



**11** Усовершенствованные реакторы как путь к достижению целей в области борьбы с изменением климата в ядерной энергетике



**14** Сокращение объемов ядерных отходов и повышение эффективности как залог устойчивости энергетике в будущем



**16** Малые реакторы с большим потенциалом





## 18 Больше чем просто источник энергии

Производство водорода с помощью ядерной энергии во имя низкоуглеродного будущего



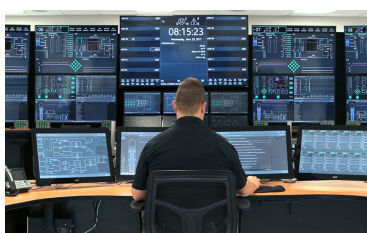
## 22 Современные, стабильные, надежные

Место умных сетей и ядерной энергетики в низкоуглеродных энергетических системах



## 24 Инвестиции в переход к экологически чистой энергии

Финансовая и экономическая поддержка ядерной энергетики



## 26 Безопасность и лицензирование малых модульных реакторов

Технологически нейтральный подход



## 28 Развитие во имя будущего

Гарантии и ядерная энергетика

Мировой обзор

## 30 Ядерная энергетика как двигатель более глубокой декарбонизации

— Кёрсти Гоген и Эрик Ингерсол

Сегодня в МАГАТЭ

## 32 Новости МАГАТЭ

## 36 Публикации



# Что означает переход к экологически чистой энергии и какая роль в нем отводится ядерной энергетике?

Николь Яверт

Чтобы поддерживать повседневную жизнь людей и способствовать гуманитарному и экономическому развитию, миру необходима энергия. В 2019 году во всем мире было выработано больше 26 000 тераватт-часов электроэнергии. Электроэнергия вырабатывается в результате использования различных источников энергии, в основном органического топлива, но также и ядерных реакций и возобновляемых источников, к которым относится, например, энергия солнца, воды и ветра.

Производство и использование энергии, в свою очередь, представляет собой крупнейший в мире источник выбросов парниковых газов. Так как парниковые газы являются одним из факторов, обуславливающих изменение климата, страны всего мира ведут активную деятельность в целях перехода к экологически чистой энергии, изменяя свой подход к производству энергии.

В этой статье мы постараемся более подробно рассмотреть, в чем заключается переход к экологически чистой энергии и какая роль при этом отводится ядерной энергетике.

## Что подразумевается под «переходом к экологически чистой энергии»?

Переход к экологически чистой энергии означает уменьшение в производстве энергии доли источников, при использовании которых выбрасываются большие объемы парниковых газов, например органического топлива, и увеличение доли таких источников, которые предполагают минимальные выбросы парниковых газов или вовсе их отсутствие. К числу таких экологически чистых источников относится ядерная энергия, энергия воды, ветра и солнца.

Направление глобального перехода к экологически чистой энергии было определено в Парижском соглашении — международной договоренности, которая была достигнута при участии более 180 стран, являющихся сторонами Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН). Главная цель этого соглашения состоит в том, чтобы удержать прирост глобальной средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней за счет содействия использованию источников энергии с низким содержанием углерода в целях уменьшения выбросов парниковых газов.

С учетом того, что примерно две трети всей мировой электроэнергии вырабатывается на основе сжигания органического топлива, по расчетам Международного энергетического агентства (МЭА), для достижения к 2050 году поставленных целей в области борьбы с изменением климата потребуется перевести на низкоуглеродные источники не менее 80% всех генерирующих мощностей.

## Что представляют собой парниковые газы, глобальное потепление и изменение климата?

Парниковые газы — это присутствующие в земной атмосфере газы, способные улавливать и отдавать тепло. К их числу относится углекислый газ, метан, водяной пар, закись азота и озон. Из-за того, что они поглощают тепло и излучают его обратно в сторону Земли, средняя температура на планете возрастает.

Хотя происхождение некоторых парниковых газов связано с естественными источниками, по большей части они накапливаются в результате деятельности людей. Выбросы парниковых газов начали расти со времен промышленной революции в конце 19 века вследствие расширения масштабов человеческой деятельности, преимущественно в результате сжигания органического топлива, например при использовании автомобилей, заправляемых горючим, или сжигании угля для получения тепла. В процессе горения органического топлива высвобождается углекислый газ.

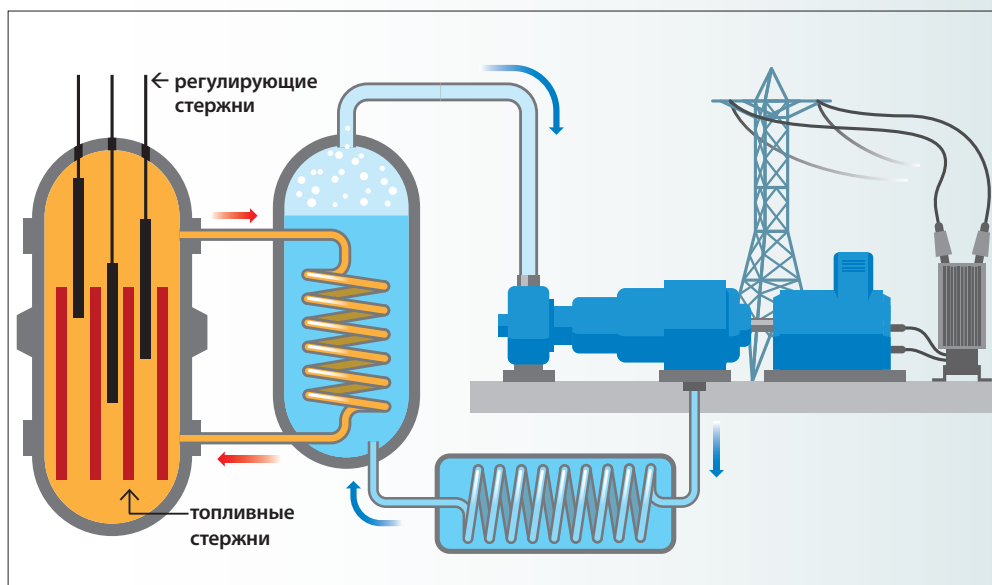
Уже более 100 лет накопление парниковых газов происходит гораздо быстрее, чем их рассеяние, что, согласно большинству признанных научных теорий, ускорит рост глобальной средней температуры. Это явление называется глобальным потеплением.

Глобальное потепление влечет за собой изменения в окружающей среде, например более экстремальные погодные условия, нерегулярное выпадение дождевых осадков, возникновение засухи и нарушение цикла смены времен года. Эти изменения и составляют суть понятия «изменение климата». С учетом наблюдаемых сегодня быстрых темпов глобального потепления предполагается, что изменение климата и его последствия приобретут еще более экстремальный характер и осложнят жизнь на нашей планете.

## Как в концепцию перехода к экологически чистой энергии вписывается ядерная энергетика?

Ядерная энергетика сегодня является вторым по своим масштабам, после гидроэнергетики, направлением, обеспечивающим получение низкоуглеродной энергии, которая используется для выработки электричества. В процессе эксплуатации АЭС выбросы парниковых газов практически отсутствуют. По данным МЭА, благодаря ядерной энергетике за последние 50 лет удалось избежать выбросов углекислого газа в объеме более чем 60 гигаатом, что соответствует объему общемировых выбросов в энергетическом секторе примерно за двухлетний период.

Ядерная энергетика обеспечивает порядка 10% всей вырабатываемой в мире электроэнергии, при этом на нее приходилось около трети всей низкоуглеродной электрогенерации в мире. В настоящее время в 30 странах мира находится в эксплуатации 440 ядерных энергоблоков. В 19 странах ведется строительство еще 54 энергоблоков, в том числе в 4 странах такие энергоблоки сооружаются впервые.



**Упрощенная схема реактора с водой под давлением.**

(Изображение: iStock.com/jack0m)

Учитывая, что АЭС способны работать на полную мощность практически без перерывов, они могут обеспечить постоянное и надежное снабжение энергией. В этом заключается их отличие от возобновляемых источников энергии с переменным характером генерации, например солнечных и ветряных электростанций, в случае которых требуются резервные источники энергии, подключаемые на время перерывов в выдаче мощности, например, когда заходит солнце или прекращает дуть ветер.

Кроме того, АЭС могут работать достаточно гибко с учетом колебаний в потреблении энергии и обеспечивать стабильность энергосистем, особенно в том случае, если значительная доля мощностей в их структуре представлена возобновляемыми источниками с переменным характером генерации (см. стр. 22). Некоторые АЭС в настоящее время проектируются также в целях обеспечения услуг, не связанных с генерацией электроэнергии, например для производства водорода. Эти услуги могут способствовать снижению углеродного следа в других секторах помимо производства электроэнергии (см. стр. 18).

Дальнейший прогресс в развитии ядерно-энергетических технологий приводит к появлению инновационных, усовершенствованных и относящихся к следующему поколению проектов реакторов, которые позволяют сделать ядерную энергетику более эффективным, доступным и привлекательным вариантом достижения целей по декарбонизации (см. стр. 11). Наступает новая эра ядерных установок, имеющих более компактную, гибкую и, в ряде случаев, допускающую возможность транспортировки конструкцию, и это, как ожидается, также будет способствовать тому, что ядерные энергетические технологии и варианты их неэлектрического применения станут более доступными и экономически эффективными, особенно в случае применения в удаленных и труднодоступных районах земного шара (см. стр. 16).

### Как устроена атомная электростанция?

В основе выработки электроэнергии в ядерной энергетике лежит контролируемое высвобождение ядерной энергии, под которой понимаются ядерные силы, удерживающие вместе центральные части атомов. Эти центральные части называются атомными ядрами. Ядерная энергия высвобождается в конечном счете в форме тепла, в результате реакции ядерного

деления, которая представляет собой процесс расщепления ядер определенных материалов. Наиболее часто используемым для этого материалом является уран — слабо радиоактивный тяжелый металл, который естественным образом присутствует в земной коре.

Как правило, уран помещается внутрь тепловыделяющих элементов в форме стержней, обычно после того, как он был подвергнут обогащению для повышения его способности к делению. Эти стержни загружаются в ядерный реактор.

В случае реактора с водой под давлением, который является самым распространенным типом эксплуатируемых сейчас во всем мире ядерных энергетических реакторов, топливные стержни располагаются внутри заполненного водой корпуса реактора. Там топливные стержни бомбардируются частицами ядра, называемыми нейтронами, поток которых изначально генерируется специальным устройством (источником нейтронов) внутри реактора. Эти нейтроны вызывают деление ядер урана, находящегося в топливных стержнях, которое сопровождается выделением энергии и испусканием новых нейтронов. Воздействие этих новых нейтронов приводит к расщеплению других ядер урана, затем процесс повторяется, что порождает цепную реакцию деления ядер.

В реакторах с водой под давлением выделяющаяся в процессе ядерного деления энергия нагревает топливные стержни и окружающую их воду. Вода находится под давлением для предотвращения ее кипения, а ее тепло за счет циркуляции воды с помощью насосов отводится в расположенную рядом емкость для получения водяного пара. Получаемый в результате кипения воды пар, в свою очередь, приводит в движение гигантскую турбину, которая вращается с очень большой скоростью. Турбина соединена с генератором, который также приводится во вращательное движение и вырабатывает электрический ток. Электрический ток поступает в энергосистему, которая представляет собой объединенную сеть для доставки электроэнергии от производителей к потребителям.

Деление ядер в реакторе продолжается до тех пор, пока в набор топливных стержней не будут введены регулирующие стержни, которые изготавливаются из материала, способного поглощать нейтроны без возникновения дальнейших процессов деления, например кадмия. В этом случае цепная реакция деления ядер прекращается.



# Устойчивость и безопасность ядерной энергетики в условиях экстремальных ситуаций

Мэтт Фишер

Атомные электростанции строятся надолго. Тем не менее, когда перспективы экстремальных явлений глобального масштаба — от стихийных бедствий и ухудшающихся вследствие изменения климата погодных условий, которые могут сказываться на работе станции, до распространения инфекционных заболеваний, которые могут затрагивать ее персонал — становятся вполне реальными, важнейшим фактором поддержания устойчивости и обеспечения развития в направлении снижения выбросов углекислого газа является продуманный подход к проектированию и укомплектованию АЭС персоналом, способным быстро адаптироваться к изменениям.

«Для того чтобы предпринимаемые на мировом уровне усилия могли привести к смягчению последствий изменения климата в ближайшие 20–30 лет, энергетический сектор должен коренным образом трансформироваться и начать снабжать мир энергией, получаемой из низкоуглеродных источников, — говорит Лорета Станкявичюте, аналитик энергетических систем из МАГАТЭ. — Однако, чтобы прийти к этому, энергетическому сектору нужно быть готовым противостоять экстремальным явлениям и изменениям в окружающей среде и адаптироваться к ним. Помочь мировому сообществу в преодолении этих вызовов вполне способна ядерная энергетика, учитывая ее заслуги в плане обеспечения устойчивости и безопасности».

## Пандемии

В связи с беспрецедентными трудностями, вызванными пандемией COVID-19, недавно представилась возможность провести проверку на устойчивость.

В ситуации, когда в первой половине 2020 года вирус COVID-19 распространился по всему земному шару, общественные и экономические механизмы оказались выведены из равновесия. Для борьбы с распространением

вируса были введены многочисленные ограничения, в том числе режимы изоляции.

«Несмотря на эти ограничивающие факторы глобального масштаба, атомные электростанции по всему миру продолжали безопасно работать. Операторы последовательно вводили в действие планы чрезвычайных мер, в том числе различные противоаварийные мероприятия, направленные на то, чтобы станции могли эксплуатироваться и далее, а персонал мог работать в безопасных условиях, — говорит директор Отдела безопасности ядерных установок МАГАТЭ Грег Жентковский. — Таким образом, операторы приняли необходимые меры предосторожности и тщательно подошли к вопросу изменений эксплуатационного и организационного характера, продолжая обеспечивать ядерную и физическую безопасность на АЭС».

Хотя ни одной из стран не сообщалось о вынужденном останове ядерных энергетических реакторов из-за ситуации с COVID-19, по сообщениям операторов, после согласования с регулирующими органами они были вынуждены сократить или перенести некоторые плановые работы по техническому обслуживанию в связи с мерами по охране здоровья, которые потребовали временного сворачивания работ второстепенного характера. Кроме того, высказывается озабоченность по поводу того, что вызванные пандемией перебои в системе поставок, в том числе задержки в предоставлении услуг и временное закрытие некоторых предприятий, могут привести к задержкам в осуществлении проектов нового строительства или глубокой модернизации.

«Еще только предстоит оценить, какой масштаб будут иметь для всей отрасли последствия этих связанных с пандемией перебоев, — говорит директор Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ Хан То Хи. — К нам продолжает поступать информация, которая дает нам принципиальное понимание картины воздействия пандемии на ядерную отрасль и



благодаря которой как операторы, так и регулирующие органы могут опираться в своих решениях на опыт друг друга».

Во время пандемии ядерная энергетика не только доказала свою устойчивость, но и лишним раз продемонстрировала, что она безопасна и хорошо приспособлена для реагирования на меняющиеся энергетические потребности. С момента начала пандемии в некоторых странах, в том числе в Бразилии, Индии и Южной Корее, доля ядерной генерации возросла. В частности, в Соединенном Королевстве ядерная энергетика вносит существенный вклад в значительное снижение объемов сжигания угля для производства электроэнергии; обусловленное пандемией снижение спроса на электроэнергию дало Соединенному Королевству возможность временно закрыть угольные электростанции в угоду расширения доли ядерной энергетики. .

### Изменение климата

Точно так же, как для беспрепятственного функционирования станции в условиях продолжающейся пандемии, необходимо, чтобы ее персонал демонстрировал устойчивость и выдержку, для противостояния экстремальным погодным явлениям, в том числе вызванным изменением климата, помимо этого настолько же важной является тщательная проработка проекта АЭС.

Изменение климата, в основе которого лежит повышение глобальной средней температуры, влечет за собой изменение тяжести и частоты погодных явлений, в том числе экстремальных температур, выпадения обильных осадков, возникновения сильных ветров и значительного повышения уровня моря. Ожидается, что как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе эти изменения будут только нарастать.

«В то время как подъем уровня воды и температуры воздуха может создавать проблемы с точки зрения непрерывности работы станции, так как ограничивает производительность ее систем охлаждения, сильные наводнения и ветра могут повлиять как раз на безопасность реакторной установки, так как они создают угрозу повреждения элементов конструкции, — объясняет г-н Жентковский. — Одна из опасностей изменения климата кроется в том, что по мере дальнейшего развития этого процесса и формирования более экстремальных условий данные

прошлых наблюдений и расчетные модели становятся менее надежными. Поэтому нам следует просчитывать эти явления заранее и периодически проводить переоценку соответствующих рисков для обеспечения того, чтобы меры по предотвращению и смягчению последствий аварий сохраняли свою актуальность».

### Природные явления

Атомные электростанции могут также подвергаться воздействию экстремальных природных явлений, к числу которых относятся землетрясения, торнадо, проявления вулканической активности, снежные бури и наводнения. При редком стечении обстоятельств эти явления могут приобретать настолько экстремальный характер, что будут превышать пределы проектной устойчивости АЭС.

Примером тому служит авария на АЭС «Фукусима-дайити» в Японии, которая произошла 11 марта 2011 года и была спровоцирована цунами вслед за мощным землетрясением. Хотя в результате этих событий и обусловленных ими взрывов водорода станция получила повреждения, эта авария не привела к гибели людей.

После аварии на АЭС «Фукусима-дайити» были предприняты конкретные шаги для того, чтобы еще больше укрепить ядерную безопасность на существующих АЭС и усовершенствовать проекты новых станций с учетом защиты от экстремальных явлений. Такого рода меры включают, например, проработку альтернативных вариантов охлаждения, установку резервных генераторов, выполненных с учетом соответствия условиям окружающей среды, ветрозащитных экранов и уплотнений, устройство дамб и других берегоукрепительных сооружений для защиты площадок от наводнений.

Кроме того, все типы внешних событий, которые могут затрагивать площадку АЭС или влиять на безопасность ядерных установок, рассмотрены в нормах безопасности МАГАТЭ, в том числе касающихся оценки и проектирования площадки и анализа безопасности. Эти нормы отражают текущие практические достижения и используются для обеспечения безопасности на протяжении всего срока эксплуатации станции. Соответствующие руководящие указания МАГАТЭ также содержатся в его серии изданий по ядерной энергии и в других технических публикациях, в частности «Adapting the Energy Sector to Climate Change» («Адаптация энергетического сектора к изменению климата»).



# Благодаря достижениям в области материаловедения и технологий преимущества АЭС как поставщика экологически чистой энергии становятся еще весомее

Карли Уиллис

Последние достижения в области материаловедения и технологий помогают продлить срок службы атомных электростанций, благодаря чему страны могут и далее пользоваться их преимуществами в плане получения экологически чистой энергии.

«Стоимость модернизации АЭС для обеспечения ее долгосрочной эксплуатации намного ниже, чем стоимость строительства новой станции, — говорит Эд Брэдли, руководитель группы по вопросам эксплуатации и инженерно-технической поддержки АЭС в МАГАТЭ. — Долгосрочная эксплуатация АЭС — это отличный вариант повышения устойчивости существующего парка ядерных генерирующих мощностей, который является одним из наиболее экономически выгодных источников низкоуглеродной электроэнергии. По сравнению с тем, что мы имели в прошлом, благодаря современным материалам и технологиям этот вариант становится более привлекательным

и конкурентоспособным для многих стран, которые стремятся ограничить выбросы углекислого газа».

Большинство ядерных энергетических реакторов изначально создавались в расчете на срок эксплуатации порядка 30–40 лет. Продление срока службы АЭС предполагает оценку текущего состояния станции и вынесение заключения по поводу того, может ли ее работа быть продолжена безопасным, надежным и экономичным образом сверх ее предполагаемого срока вывода из эксплуатации. Когда срок службы станции продлен, ее эксплуатация, как правило, может продолжаться еще в течение 20–40 лет.

«Учитывая, какая масштабная и тщательная работа проводится на этапах выбора и начальной подготовки площадки, проектирования и сооружения АЭС, а также в процессе управления старением на протяжении всего срока эксплуатации, когда предпринимаются определенные шаги по

Так выглядят сверху две турбины второго энергоблока АЭС «Дарлингтон», где осуществляется проект глубокой модернизации.

(Фото: Р. Раделл/«Онтарио пауэр дженерейшн»)





модернизации и переоборудованию, многие АЭС способны безопасно функционировать еще долгое время после того, как закончится изначально установленный для них срок эксплуатации», — поясняет старший сотрудник МАГАТЭ по вопросам ядерной безопасности Роберт Кршиванек. Тем не менее, по его словам, на некоторых АЭС присутствуют определенные элементы и проектные решения, которые не могут быть модернизированы достаточно легко или без лишних затрат, что подразумевает их непригодность для долгосрочной эксплуатации.

Одной из основных проблем, связанных со старением ядерного энергетического реактора, является ухудшение характеристик. В процессе эксплуатации станции ее конструкции и элементы должны выдерживать воздействие высоких температур, неблагоприятных условий и непрерывного режима работы, что со временем может приводить к их износу.

«Частично устранить последствия ухудшения характеристик помогает регулярная оценка состояния и замена деталей, однако со временем этот подход может оказаться экономически нецелесообразным, особенно в случае долгосрочной эксплуатации», — говорит г-н Брэдли.

## Новые методы и материалы

Развитие новых методов, таких как лазерная сварка и сварка трением с перемешиванием, а также применение таких материалов, как дуплексная нержавеющая сталь, которая обладает большей устойчивостью к коррозии, допускает возможность безопасного использования некоторых

элементов в течение более долгого времени, тем самым повышается экономическая целесообразность продления срока эксплуатации АЭС.

Кроме того, у исследователей появляется более полное представление о том, как разные условия эксплуатации на АЭС могут влиять на состояние тех или иных элементов и конструкций. Например, в случае расположенных в Онтарио, Канада, реакторов CANDU, которые вводились в строй в период с 1970 по 1993 год, благодаря материаловедческим исследованиям и обследованию элементов станции удалось обеспечить безопасную эксплуатацию некоторых из них в течение еще 10 лет после окончания их расчетного срока службы в 30 лет. Реализация программы восстановительного ремонта с бюджетом 18,5 млрд долларов США позволит дополнительно продлить срок эксплуатации еще на один цикл продолжительностью до 40 лет. Это значит, что некоторые станции, которые были сооружены еще в 1980-х годах, будут безопасно эксплуатироваться вплоть до 2060-х годов.

«Наши реакторные установки создавались в то время, когда у нас еще не было большого опыта работы с АЭС, и изначально закладываемый в наши проекты срок службы был рассчитан исходя из консервативных оценок и составлял 30 лет, — рассказывает Фред Дермаркар, президент и генеральный директор Группы владельцев реакторов CANDU, отраслевого объединения операторов АЭС из семи стран, где используются реакторы CANDU. — По мере нашей работы с этими установками мы получали представление об их особенностях и понимали, как идет их процесс старения, и теперь мы можем в полной мере оценить выгоду от продолжения их эксплуатации в долгосрочной перспективе».







Г-н Дермаркар также объяснил, как благодаря последним достижениям в области материаловедения можно предсказывать изменение свойств материалов через много лет в будущем. «В реакторах CANDU для охлаждения топлива используются технологические каналы, представляющие собой трубы высокого давления. С учетом условий, которые формируются внутри реактора, под воздействием сильного нейтронного потока, высокой температуры и давления свойства труб высокого давления со временем меняются. Для предсказания изменений, например вызываемых коррозией, мы начали изучать облученные трубы высокого давления, которые были извлечены из действующих реакторов. Мы применили способы для искусственного ускорения коррозионных процессов и провели всесторонние испытания для определения свойств материалов, из которых эти искусственно состаренные элементы были изготовлены. Таким образом, мы можем установить, насколько большим ресурсом обладают эти элементы. Выполняя исследования в лаборатории с прицелом на перспективу, мы обеспечиваем себе уверенность в том, что эти элементы продолжают безопасно и надежно работать вплоть до момента их планового ремонта», — добавил он.

## Ядерная энергетика и анализ больших данных

Сегодня исследователи изучают также варианты использования технологий «больших данных» для того, чтобы оценить и обосновать целесообразность долгосрочной эксплуатации АЭС. Термин «большие данные» используется сегодня для обозначения анализа чрезвычайно сложных и обширных массивов данных, накапливаемых с большой скоростью, а часто и в режиме реального времени, в целях выявления определенных тенденций и закономерностей и прогнозирования тех или иных результатов и характера изменений.

В течение длительного срока эксплуатации АЭС собираются миллионы элементов данных по измеряемым параметрам эксплуатации станции, в числе которых данные журналов эксплуатации, реакторных измерений и отчетов о событиях. Выполняя глубинный анализ этих данных с помощью программного обеспечения для работы с ядерными большими данными, исследователи могут предсказывать, используя инструменты моделирования, как именно будет происходить старение конструкций, систем и элементов при различных

условиях, и определять, какие именно из них нуждаются в замене и когда эта замена должна быть произведена..

«Большие данные — это не какие-то технологии будущего, это применяется уже сегодня и получает все большее распространение, — говорит г-н Дермаркар. — Наши станции проходят модернизацию и оснащаются все большим количеством измерительных приборов, которые имеют портативное исполнение и могут легко быть установлены, где необходимо, позволяя нам собирать данные и заранее просчитывать возможные проблемы, чтобы заблаговременно предпринять корректирующие меры. Мы уже видим ощутимые выгоды: сегодня показатели работы наших станций лучше, чем когда-либо за всю их историю».

Одно из направлений деятельности МАГАТЭ — это ориентирование стран в вопросах долгосрочной эксплуатации АЭС. МАГАТЭ разрабатывает признаваемые на международном уровне нормы безопасности, выпускает руководящие указания в форме своих технических публикаций, таких как «Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL)» («Управление старением атомных электростанций: Международная программа по общим урокам, связанным со старением (ИГАЛЛ)») и поддерживает обмен опытом в рамках независимых экспертных миссий по рассмотрению аспектов безопасности долгосрочной эксплуатации (САЛТО). Кроме того, МАГАТЭ координирует деятельность рабочей группы, состоящей из представителей операторов, регулирующих и директивных органов со всего мира, которые обсуждают примеры из своего опыта и обмениваются положительной практикой.

«Главная сложность в связи с долгосрочной эксплуатацией заключается в том, что нужно поддерживать соответствие самым строгим нормам безопасности и причем делать это экономно, — считает Гарри Г. Янг, руководитель службы продления лицензий в компании «Энтерджи Ньюклар» и председатель рабочей группы МАГАТЭ по вопросам долгосрочной эксплуатации. — Наша рабочая группа постоянно изучает возможности, касающиеся обеспечения эффективности и безопасности, а также распространения информации о результатах и достижениях в этой области. Это делается для того, чтобы соответствующие исследования и разработки могли принести всем сторонам наибольшую выгоду».



# Усовершенствованные реакторы как путь к достижению целей в области борьбы с изменением климата в ядерной энергетике

Мэтт Фишер

Сделать ядерную энергетiku более доступным, устойчивым и экономичным вариантом производства электроэнергии с малым объемом выбросов углекислого газа помогут усовершенствованные реакторы. Благодаря улучшенным характеристикам безопасности и оптимизации проектных решений с учетом минимизации издержек, эти реакторы, как ожидается, откроют возможности для большей экономии, ускорения процессов лицензирования и получения одобрения общественности — что в конечном итоге позволит странам обратиться к ядерной энергетике как к средству достижения своих целей в области борьбы с изменением климата.

«Усовершенствованные реакторы, которые проектируются с расчетом на эксплуатацию в течение шести или более десятков лет и предполагают ускоренный процесс лицензирования, отвечают всем требованиям повестки дня в области смягчения последствий изменения климата, которая ставит во главу угла быструю осуществимость и долгосрочную устойчивость проектов, — говорит начальник Секции развития ядерно-энергетических технологий МАГАТЭ Стефано Монти. — Ключевое значение для будущего ядерной энергетики имеет привлечение внимания общественности и получение одобрения с ее стороны, и с учетом того, что в проекты реакторов продолжают вноситься улучшения как в плане безопасности, так и в экономическом плане, отношение мирового сообщества к этому важному направлению низкоуглеродной энергогенерации также будет улучшаться».

Усовершенствованные реакторы и связанные с ними виды топлива и топливные циклы — это передовой рубеж ядерно-энергетических технологий. В основе этих проектов лежит более шестидесяти лет исследований, разработок и обобщения практического опыта в сфере ядерной энергетики.

В сотрудничестве со странами МАГАТЭ помогает выявлять и решать проблемы, связанные с разработкой проектов усовершенствованных реакторов, в том числе касающиеся обоснования новых технологических решений и соответствия проекта требованиям безопасности. Эта помощь охватывает организацию совместных исследовательских проектов и различных мероприятий, в том числе семинаров-практикумов с участием международных экспертов, а также сотрудничество по линии международного форума «Поколение IV» (МФП) — международной инициативы в области сотрудничества, к которой присоединились уже 13 стран. МФП, который был учрежден в 2000 году, занимается научными исследованиями и разработками в обоснование ядерных энергетических систем следующего поколения.

Среди отличительных особенностей усовершенствованных реакторов можно выделить повышенный тепловой КПД,

минимизацию отходов, оптимальное использование природных ресурсов и возможность решения задач как в области производства электроэнергии, так и неэлектрических применений ядерной энергии, например производства водорода (см. стр. 18). Эти особенности расширяют спектр возможностей применения и существенно улучшают экономические показатели АЭС.

## Тщательно продуманные проектные решения

Усовершенствованные реакторы подразделяются на два основных типа — «эволюционные» и «инновационные». Эволюционные реакторы уже сейчас предлагают немедленный и основанный на надежных решениях переход к производству электроэнергии с малым объемом выбросов углекислого газа, в то время как инновационные реакторы завтрашнего дня помогут странам в их дальнейшем движении по пути сокращения выбросов углекислого газа, при значительном снижении объемов высокоактивных радиоактивных отходов и расширении спектра неэлектрических применений ядерной энергии.

В настоящее время в эксплуатации находятся 15 эволюционных реакторов, и еще один проект будет реализован в ближайшем будущем. Южнокорейский реактор APR1400 и российский ВВЭР-1200 представляют собой проекты реакторов с водой под давлением с улучшенными характеристиками эффективности и безопасности. Помимо реакторов APR1400, внедряемых в эксплуатацию в Южной Корее, в настоящее время в Объединенных Арабских Эмиратах сооружается еще одна АЭС с реакторами этого типа, пуск первого энергоблока которой планируется в 2020 году.

В России в настоящее время находятся в эксплуатации три энергоблока с реакторами ВВЭР-1200; при этом в Бангладеш, Беларуси, России и Турции ведется сооружение ряда аналогичных энергоблоков, и ожидается, что в Беларуси очередные энергоблоки будут введены в эксплуатацию в конце 2020 года. Разработанный по французскому проекту реактор EPR, который используется в двух уже действующих энергоблоках в Китае и сооружаемых в настоящее время энергоблоках в Соединенном Королевстве, Финляндии и Франции, спроектирован в целях упрощения процесса эксплуатации станции и повышения ее электрической мощности.

На нескольких площадках в Китае ведется сооружение энергоблоков с китайским реактором HPR1000 мощностью 1090 МВт (эл.), также известным под названием «Хуалун 1», при этом планируется поставлять этот реактор на экспорт в другие страны, в том числе Аргентину и Соединенное Королевство.



Ввод первых энергоблоков в эксплуатацию ожидается в конце 2020 года. Этот проект предусматривает развитие пассивные и активные системы безопасности, в том числе возможность опускания поглощающих стержней только за счет силы тяжести в случае потери энергоснабжения и контайнмент новой конструкции, способный выдерживать более высокое давление для уменьшения вероятности утечек в случае ядерной аварии.

Кроме того, в эксплуатации на двух АЭС в Китае находятся реакторы с водой под давлением типа AP1000, которые имеют мощность 1157 МВт (эл.). Эти реакторы имеют сравнительно простую конструкцию с меньшим количеством запорной арматуры и ряд особенностей, связанных с использованием естественных процессов, в том числе энергии сжатых газов, гидростатического напора, естественной циркуляции и конвекции, которые служат целям обеспечения безопасности. В Соединенных Штатах идет строительство еще нескольких энергоблоков с реакторами AP1000, выработку электроэнергии на них планируется начать к 2022 году.

### Инновации для обеспечения устойчивости

Инновационные реакторы все еще находятся в разработке, при этом строительные работы по ряду проектов потенциально могут быть начаты ближе к 2030 году. Общими чертами этих проектов являются высокие значения рабочих температур, которые необходимы как для процессов выработки электроэнергии, так и других неэлектрических применений, в том числе производства водорода, а также высокие внутренне присущие характеристики безопасности, повышенная устойчивость за счет минимизации объемов отходов и оптимального использования природных ресурсов и специальные меры по укреплению физической защиты и устойчивости с точки зрения распространения.

В ряде проектов предполагается также использование новых типов теплоносителя, таких как жидкие металлы или расплавы солей, благодаря чему реакторы смогут работать при атмосферном давлении и намного более высоких температурах, что обеспечит большую эффективность. Кроме того, в некоторых проектах в целях сокращения объемов, токсичности и времени жизни радиоактивных отходов может быть использован замкнутый ядерный топливный цикл.

Некоторое представление о будущем инновационных реакторов может дать проект реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-800, который является одним из трех находящихся сегодня в коммерческой эксплуатации типов быстрых реакторов, наряду с его более ранним вариантом БН-600 и китайским экспериментальным быстрым реактором. Реактор БН-800, который эксплуатируется в России с октября 2016 года, работает на смешанном оксидном топливе, представляющем собой сочетание соединений плутония и урана. Предполагается, что на аналогичных физических принципах будут работать многие другие проекты инновационных реакторов, способные вывести ядерно-энергетические технологии на новый уровень. Подробнее о реакторах на быстрых нейтронах рассказывается на стр. 14.

«Хотя до начала коммерческой эксплуатации следующего поколения ядерных энергетических реакторов может пройти еще немало лет, продолжающийся прогресс в области соответствующих исследований и разработок весьма обнадеживает, — говорит директор Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ Хан То Хи. — Учитывая, что мы стремимся к будущему, где будет преобладать экологически чистая энергия, совершенно понятно, что немаловажную роль в достижении этой цели будет играть ядерная энергетика».

АЭС «Тайшань» в Китае, основой которой являются реакторы типа EPR. (Фото: Taishan Nuclear Power Joint Venture Co. Ltd)





## Новые виды топлива позволят получить больше энергии и меньше отходов

Предметом многих исследований являются новые подходы к загрузке ядерных реакторов топливом. Они ставят своей целью минимизировать последствия образования ядерных отходов и сократить затраты на эксплуатацию и обслуживание, параллельно с этим увеличивая КПД атомных электростанций и еще больше укрепляя ядерную безопасность.

Один из таких подходов заключается в многократном рециклировании остатков урана и плутония, содержащихся в отработавшем топливе — то есть ядерном топливе, подвергнутом облучению в реакторе. Такое рециклированное топливо может использоваться в ядерных реакторах следующего поколения, что позволит более эффективно распоряжаться ресурсами и сократить объемы и радиотоксичность ядерных отходов. В случае многократного рециклирования потенциально можно обеспечить работу реакторов практически только на рециклированном отработавшем топливе, без необходимости в свежем топливе на основе вновь добываемого природного урана.

Еще одним новым и многообещающим типом топлива, которое разрабатывается как для существующих, так и перспективных проектов реакторов, является так называемое устойчивое к авариям топливо (АТФ). За счет того, что для

изготовления самого топлива и его оболочки (наружной трубки, в которой заключено топливо) используются новые и усовершенствованные материалы, АТФ-топливо лучше переносит перепады температур и экстремальные условия внутри реактора. При этом предполагается, например, что оно сможет гораздо дольше, чем используемые в настоящее время виды топлива, сохранять целостность в случае потери функции принудительного охлаждения активной зоны.

В случае усовершенствованных реакторов новые виды топлива разрабатываются исходя из требований их более длительного нахождения в активной зоне, что в итоге позволит получать больше энергии и меньше отходов. В целях улучшения показателей работы реактора для изготовления такого топлива используется смесь урана и плутония с большей атомной массой и покрытием из различных композитов на основе керамики, а также из металлов и их сплавов. Таким образом, подобное топливо оказывается лучше приспособлено для воспроизводства или получения нового топлива в реакторах на быстрых нейтронах в процессе их эксплуатации. Учитывая, что применяемые в таком топливе виды материалов способны также более эффективно проводить тепло, общая температура топлива снижается и становится более равномерной, что способствует повышению безопасности.





# Сокращение объемов ядерных отходов и повышение эффективности как залог устойчивости энергетики в будущем

Джеффри Донован

Повысить эффективность использования ядерной энергии и сократить воздействие радиоактивных отходов на окружающую среду способны реакторы на быстрых нейтронах. Перспективы внедрения этих инновационных реакторов для обеспечения устойчивости ядерной энергетики в будущем изучаются сейчас в нескольких странах.

В быстрых реакторах для поддержания цепной реакции деления используются быстрые нейтроны, энергия которых не уменьшается с помощью замедлителя, в роли которого выступает, например, вода. В то время как в существующих сегодня разновидностях реакторов на тепловых нейтронах обрабатывается только малая часть природного урана, загружаемого в них в качестве топлива, реакторы на быстрых нейтронах могут потреблять практически весь содержащийся в топливе уран, производя до 70 раз больше энергии, что снижает потребность в новом урановом сырье.

Кроме того, быстрые реакторы работают на основе так называемого замкнутого ядерного топливного цикла. Замкнутый ядерный топливный цикл предполагает переработку и повторное использование отработавшего топлива, то есть ядерного топлива, которое подверглось облучению в реакторе. Потенциально такая энергетическая система может быть устойчивой на протяжении тысяч лет. Напротив, открытый ядерный топливный цикл предполагает однократное использование ядерного топлива, после чего отработавшее топливо переходит в категорию отходов, в конечном итоге подлежащих подземному захоронению в геологических хранилищах.

Быстрые реакторы могут также нарабатывать или «размножать» больше топлива, чем они потребляют сами, и сжигать часть содержащихся в отработавшем топливе отходов,

например младших актинидов, чего не могут с достаточной эффективностью обеспечить реакторы на тепловых нейтронах. Выжигание таких соединений способствует значительному снижению объемов, токсичности и времени существования наиболее долгоживущих радиоактивных отходов.

«Насущным вопросом для многих стран, которые ведут поиск устойчивых технологий получения экологически чистой энергии, является воздействие тех или иных источников энергии на окружающую среду, проявляющееся, в том числе, в виде отходов, — поясняет Ампаро Эспартеро Гонсалес, технический руководитель МАГАТЭ по обращению с отработавшим топливом. — Возможность сократить это воздействие, а также получить максимальную отдачу от ядерного топлива в значительной степени определяет растущую привлекательность быстрых реакторов для многих стран и служит главным стимулом развития этой технологии».

## Возвращение в новом качестве

Быстрые реакторы были в числе первых технологий, внедренных на заре ядерной энергетики, когда запасы урана считались недостаточными. Однако ввиду того, что на пути разработки этой технологии возникали сложности, связанные с различными техническими аспектами и выбором материалов, и что были разведаны новые запасы урана, в конечном итоге отраслевым стандартом стали легководные реакторы (LWR). В настоящий момент в эксплуатации находятся пять быстрых реакторов: два действующих промышленных реактора (БН-600 и БН-800) и один опытный реактор (БОР-60) в России, индийский испытательный реактор-размножитель на быстрых нейтронах (FBTR) и китайский экспериментальный быстрый реактор (CEFR).

**Реактор БН-800 на Белоярской АЭС в России.**

(Фото: Росэнерготом)



Благодаря новым концепциям, технологиям и достижениям в области материаловедения, а также долгосрочному видению ядерной энергетике как одного из столпов устойчивого энергетического развития, интерес к быстрым реакторам сейчас проявляется с новой силой. Упомянутые достижения в целом касаются инновационных усовершенствований, в том числе улучшенных характеристик безопасности и оптимизированной и более компактной конструкции, способствующей повышению рентабельности проектов. Кроме того, новые проекты предполагают использование альтернативных теплоносителей, например, расплавов солей, свинца, свинцово-висмутового сплава и газа.

«На протяжении десятилетий быстрые реакторы в основном представляли собой реакторы-размножители топлива, но в последние годы также ведутся разработки в области малых модульных реакторов, работающих по принципу перезаряжаемой батареи длительного срока службы, и даже микрореакторов, — говорит Владимир Кривенцев, руководитель группы по разработке технологий быстрых реакторов в МАГАТЭ. — Быстрые реакторы могут сделать ядерную энергетiku устойчивым источником энергии на тысячи лет и значительно улучшить ситуацию в области обращения с радиоактивными отходами».

## Быстрые реакторы в разработке

Разработка проектов быстрых реакторов ведется в разных странах мира. МАГАТЭ играет центральную роль в содействии их разработке и внедрению, а также в обмене соответствующей информацией и опытом, в том числе в рамках проектов координированных исследований, технических публикаций, технических рабочих групп и международных конференций.

В России, где уже действуют два быстрых реактора с натриевым теплоносителем, планируется в период после 2035 года ввести в строй промышленный быстрый реактор нового поколения мощностью 1200 МВт (эл.), который наряду с легководными реакторами позволит сформировать самодостаточную энергетическую систему. Благодаря быстрому реактору отработавшее топливо с реакторов на тепловых нейтронах будет перерабатываться и использоваться повторно, а образующиеся в итоге объемы отходов будут до десяти раз меньше, чем в случае обычного ядерного топлива.

Индия вводит в эксплуатацию прототип быстрого реактора-размножителя с натриевым теплоносителем мощностью 500 МВт (эл.) — первый из нескольких планируемых к сооружению в стране промышленных быстрых реакторов. Китай, у которого имеется экспериментальный быстрый реактор мощностью 20 МВт (эл.), ведет сооружение демонстрационного быстрого реактора большой мощности и в конечном счете планирует внедрение промышленных быстрых реакторов.

В Северной Америке ведутся работы над несколькими проектами быстрых реакторов с использованием различных видов теплоносителей, в том числе расплавов солей. Соединенные Штаты планируют сооружение опытного быстрого реактора, призванного способствовать дальнейшему развитию этой технологии, а также демонстрационного быстрого реактора мощностью 1,5 МВт (эл.), который также будет использоваться для обоснования возможности применения нового типа переработанного топлива, предназначенного для инновационных реакторов будущего.

Технологическая осуществимость проектов быстрых реакторов неоднократно демонстрировалась еще начиная с 1950-х годов. Во Франции в промышленной эксплуатации в течение 12 лет вплоть до 1998 года находился реактор проекта «Суперфеникс» мощностью 1200 МВт (эл.), и сегодня исследовательские и опытно-конструкторские работы по этой технологии продолжаются, так же как и в Южной Корее и Японии, где планируется перезапустить программу экспериментальных быстрых реакторов.

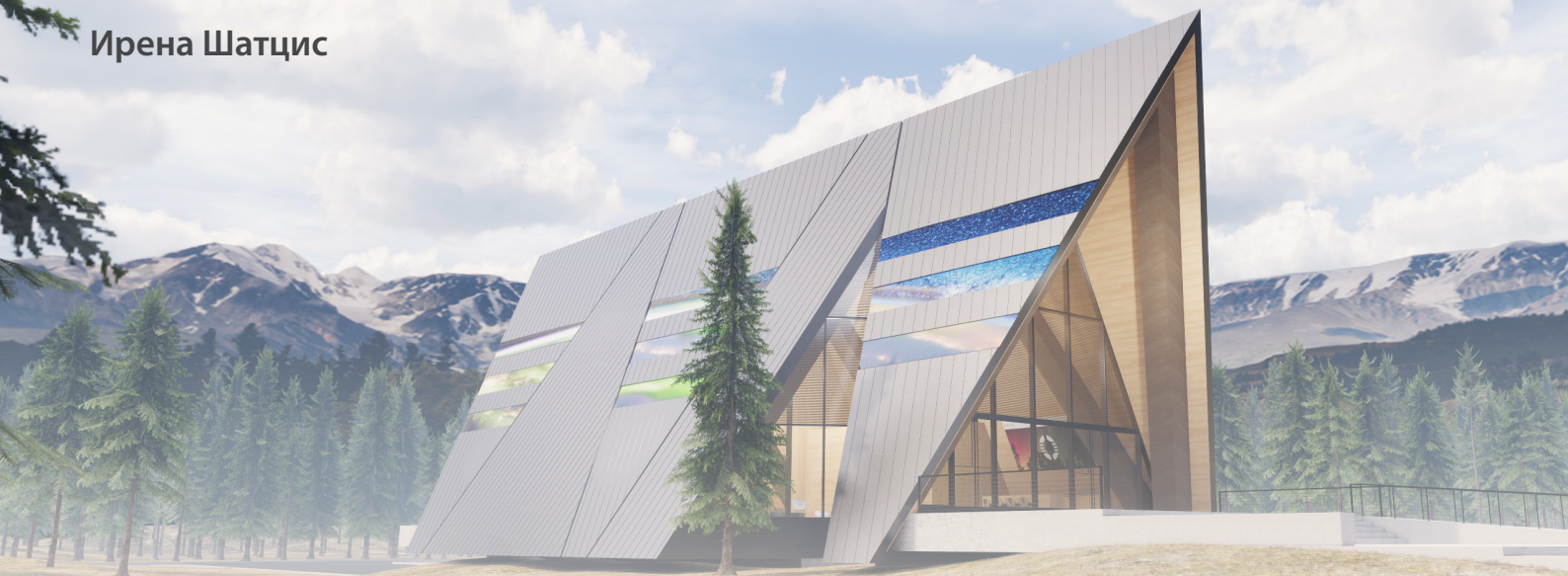
В то же время перспективы более широкого промышленного применения быстрых реакторов будут во многом определяться улучшением экономической составляющей этих проектов.

«В условиях ограниченности ресурсов на мировом рынке, когда цены на уран, как предполагается, будут гораздо выше, чем сегодня, и на первый план выйдут соображения минимизации отходов, инновационные и компактные быстрые реакторы могут оказаться более конкурентоспособными в экономическом плане, чем традиционные реакторы на тепловых нейтронах, — считает начальник Секции развития ядерно-энергетических технологий МАГАТЭ Стефано Монти. — Сегодня, когда ряд стран активно развивает направление быстрых реакторов, следует ожидать, что эта технология внесет весомый вклад в создание в ближайшие десятилетия экологически чистых энергетических систем».



# Малые реакторы с большим потенциалом

Ирена Шатцис



**«Аврора» представляет собой проект усовершенствованной ядерной энергетической установки.**

(Фото: «Окло»)

Когда люди слышат словосочетание «ядерная энергетика», обычно в их воображении возникают картины весьма впечатляющих по своим размерам электростанций и градирен, однако сегодня, когда начинают внедряться малые модульные реакторы (ММР) и микрореакторы (МР), облик и пределы применения ядерной энергетике претерпевают изменения..

«ММР и МР, как и ядерные реакторы большой мощности, обеспечивают выработку электроэнергии с малым объемом выбросов углекислого газа, но при этом они меньше по размерам, более гибкие в применении и более доступные по цене, поэтому их можно подключать к небольшим энергосистемам и сооружать в труднодоступных местах, где применение реакторов большой мощности было бы нецелесообразным, — говорит Фредерик Рейтсма, руководитель группы по технологиям малых модульных реакторов в МАГАТЭ. — Многие из них спроектированы с учетом возможностей неэлектрического применения в дополнение к обычным задачам по выработке электроэнергии, что лишний раз подчеркивает их преимущества в плане получения экологически чистой энергии и экономической выгоды».

Планируется, что в зависимости от конструкции ММР смогут выдавать до 300 МВт (эл.) (мегаватт электрической мощности), а МР — до 10 МВт (эл.). Помимо модульности, другими характерными общими чертами таких реакторов является наличие обеспечивающих повышенную безопасность пассивных и интегрированных систем, возможность экономичной и гибкой генерации электроэнергии для удовлетворения колебаний спроса и упрощенная конструкция, благодаря которой такие реакторы быстрее и проще в сооружении, чем распространенные в настоящее время типы реакторов. Кроме того, они предполагают больше возможностей для сборки в заводских условиях, что поможет

сократить продолжительность строительных работ на площадке и сделает типовое производство этих реакторов для развертывания дополнительных мощностей более простым и экономически выгодным.

«Создание ядерных реакторов большой мощности — это грандиозная задача, требующая значительных долгосрочных инвестиций, что может быть практически осуществимо и оправдано лишь в некоторых ситуациях. В то же время в других ситуациях более реалистичным и быстро реализуемым вариантом, а иногда и единственным способом экономически эффективного внедрения ядерно-энергетических технологий является применение ММР и МР, — поясняет Рейтсма. — Если добавить к этому эффективные подходы к привлечению финансирования и регулированию рынка, ядерная энергетика станет доступной для более широкого круга потребителей и будет рассматриваться на энергетическом рынке как более конкурентоспособный и привлекательный вариант». Подробнее о различных аспектах финансирования и политике регулирования рынка в сфере ядерной энергетике читайте на стр. 24.

## Первые успехи технологии ММР

Первый в мире усовершенствованный реактор типа ММР был подключен к энергосистеме в 2019 году, а его коммерческая эксплуатация была начата в мае 2020 года.

На плавучей АЭС «Академик Ломоносов», действующей у арктического побережья России, находятся две реакторные установки КЛТ 40С, которые представляют собой ММР мощностью 35 МВт (эл.), вырабатывающие достаточно энергии для снабжения города с населением около 100 000 человек. Станция также способна выдавать теплофикационную мощность порядка 50 гигакалорий в час и может использоваться для опреснения морской воды, производя до 240 000 кубометров пресной воды в сутки.



«Благодаря ядерным реакторам малой мощности, уже к 2040 году в Арктическом регионе может быть обеспечен нулевой показатель выбросов, — говорит Антон Москвин, вице-президент по маркетингу и развитию бизнеса АО «Русатом Оверсиз». — «Академик Ломоносов» в перспективе заменит собой угольную ТЭЦ. Помимо того, что он будет способствовать устранению вредных выбросов в арктическую экосистему, этот проект обеспечит уверенность в том, что в морозных условиях Крайнего Севера жители региона не останутся без света и отопления».

Среди других проектов ММР на завершающих этапах сооружения находятся реактор CAREM мощностью 30 МВт (эл.) в Аргентине и реактор HTR-PM мощностью 210 МВт (эл.) в Китае. Кроме того, несколько проектов уже почти прошли процедуру согласования в регулирующих органах, в том числе ММР «Нью Скейл Пауэр» в Соединенных Штатах и несколько ММР в Канаде. В целом в мире насчитывается более 70 проектов ММР, находящихся на разных стадиях разработки.

МАГАТЭ ведет деятельность по ряду связанных с ММР направлений в целях поддержки профильных исследований и разработок в разных странах мира. Агентство содействует сотрудничеству в области проектирования, разработки и внедрения ММР и выступает в качестве центра по обмену знаниями и опытом в области регулирования ММР.

## Микроэлектростанции

В то время как проекты ММР преимущественно основываются на уже хорошо известных реакторных установках, МР представляют собой нечто такое, что вполне можно было бы отнести к области научной фантастики. Их размеры настолько малы, что вся энергетическая установка может быть сразу собрана на заводе и доставлена на место одним грузовиком. Благодаря наличию саморегулирующихся пассивных систем безопасности такие реакторы не требуют большого количества обслуживающего персонала. Работая без привязки к электрической сети, они могут перевозиться с места на место и использоваться в разных условиях. Такие реакторы могут выдавать до 10 МВт (эл.) и способны на протяжении 10 или более лет в круглосуточном и непрерывном режиме обеспечивать электроэнергией более 5000 домов.

Компактные и передвижные реакторы такого типа могут использоваться в качестве резервного источника электроснабжения для таких объектов, как больницы, либо в качестве замены электрогенераторов, которые обычно работают на дизельном топливе и являются единственным источником электроэнергии в удаленных населенных пунктах или на промышленных площадках и рудниках..

В настоящее время частными компаниями и исследовательскими группами в разных странах мира ведется разработка более десятка проектов МР.

Одним из близящихся к завершению проектов является реактор с быстрым спектром нейтронов «Аврора» мощностью 1,5 МВт (эл.), который разрабатывается компанией «Окло» — стартапом из США. Реактор «Аврора», проект которого сейчас проходит согласование в регулирующих органах, сконструирован по принципу функционирования и саморегулирования преимущественно за счет естественных физических процессов, что подразумевает использование в нем — в целях повышения

безопасности — очень малого количества движущихся элементов. Планируется также, что этот реактор, в котором применяется топливо на основе высокообъемного низкообогащенного урана, сможет работать десятилетиями без необходимости перегрузки топлива.

«Реакция ядерного деления может использоваться в установках самого разного формата: малой и большой мощности, с разными типами топлива, с разными системами охлаждения, — что позволяет реализовать множество различных бизнес-моделей и сценариев взаимодействия с общественностью и обеспечения ее вовлеченности, — говорит Кэролайн Кокрэн, исполнительный директор «Окло». — Благодаря новым способам использования энергии деления и внедрению рассредоточенных, имеющих малую мощность станций, развитие человеческого потенциала может быть обеспечено при минимальном использовании ресурсов».

Среди других находящихся на завершающих этапах проектов МР можно упомянуть реактор мощностью 4 МВт (эл.), разрабатываемый «Ю-Бэтэри» (возглавляемым компанией «Уренко» консорциумом со штаб-квартирой в Соединенном Королевстве), который, как ожидается, будет принят в эксплуатацию в 2028 году.

## Внедрение в крупных масштабах

Несмотря на многие успехи, ММР и МР все еще далеки от внедрения в крупных масштабах.

«Эта ситуация напоминает спор о том, что появилось раньше — курица или яйцо, — говорит Рейтсма. — С одной стороны, для инвестиций в развитие и внедрение технологии ММР требуется наличие гарантированного рынка и спроса на продукт, а с другой стороны, закрепиться на рынке не получится без привлечения финансирования для разработки и демонстрации продукта или хотя бы для того, чтобы провести необходимые исследования или построить испытательные установки, что может потребоваться для получения лицензии. Потенциальные инвесторы не спешат вкладываться в новую технологию, если у них нет уверенности по поводу рыночных рисков».

Одним из других существенных препятствий на пути к внедрению является вопрос применимости регулирующих требований к широкому спектру проектов ММР и МР. Использование в них всего многообразия конструкций, систем и элементов подразумевает, что в целях обеспечения надлежащего уровня безопасности стандартные подходы к регулированию, которые были выработаны для традиционных АЭС, должны быть пересмотрены и в конечном итоге скорректированы. Ситуация в области нормативного регулирования ММР более подробно рассматривается на стр. 26.

«На данный момент многие первые в своем роде проекты усовершенствованных ММР еще только проходят согласование в регулирующих органах, и в целом следует ожидать, что после завершения всех формальностей и до момента их сооружения и ввода в эксплуатацию пройдет еще не менее четырех-пяти лет, — говорит Рейтсма. — Однако по мере того, как ММР и МР будут получать распространение, можно предположить, что эти временные рамки сузятся, и внедрение этой технологии пойдет быстрее, легче и с меньшими затратами».



## Больше чем просто источник энергии

### Производство водорода с помощью ядерной энергии во имя низкоуглеродного будущего

Мэтт Фишер

Водород — самый распространенный химический элемент во Вселенной, но его производство в чистом виде для целого ряда промышленных процессов является энергоемким и сопровождается созданием значительного «углеродного следа».

«Почти 95% текущего спроса на водород удовлетворяется за счет использования углеродоемких производственных процессов, таких как паровая конверсия метана. Это неприемлемо в свете глобального перехода к экологически чистой энергии, особенно учитывая, что спрос уже достаточно высок и продолжает расти», — говорит Ибрагим Хамис, старший инженер-атомщик МАГАТЭ. По данным Международного энергетического агентства, с 1975 года спрос на водород увеличился более чем в три раза.

Водород используется в различных промышленных процессах, начиная от производства синтетического топлива и нефтехимии до изготовления полупроводников и электромобилей на водородных топливных элементах. Чтобы уменьшить вредное воздействие на окружающую среду в связи с производством 70 млн тонн водорода в год, некоторые страны обращаются к ядерной энергетике.

«Например, перевод всего лишь 4% текущего производства водорода на электроэнергию, вырабатываемую АЭС, позволил бы уменьшить выбросы углекислого газа на 60 млн тонн в год, — объясняет Хамис. — А если бы весь водород производился с использованием ядерной энергии, то можно было бы говорить о сокращении выбросов углекислого газа на более чем 500 млн тонн в год».

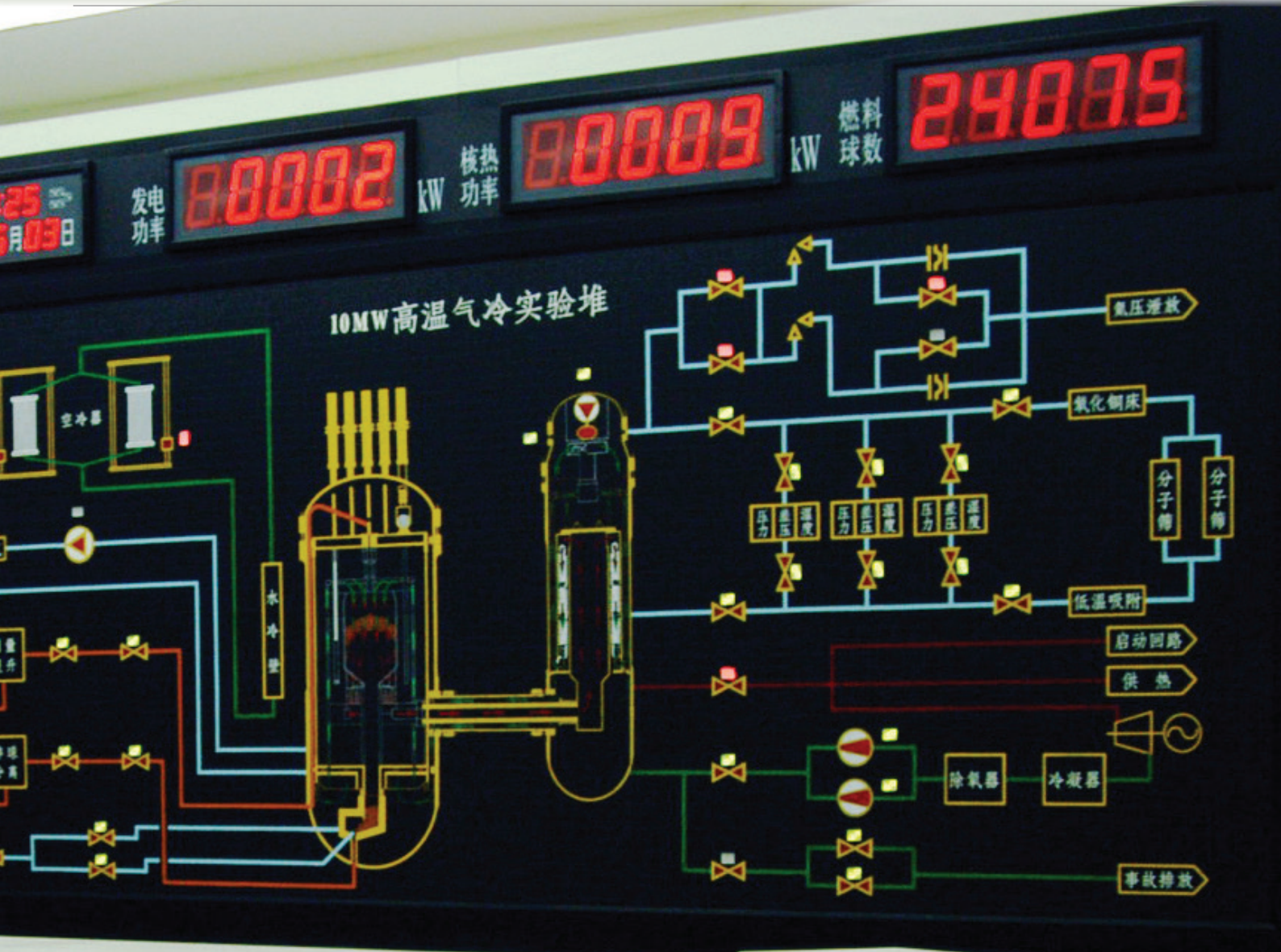
Ядерные энергетические реакторы могут быть соединены с установкой по производству водорода в единую систему когенерации для экономически эффективного производства одновременно электроэнергии и

Помещение щита управления ректора НТР 10 в Университете Цинхуа в Пекине.

(Фото: П. Павличек/МАГАТЭ)









водорода. При производстве водорода когенерационная система оснащается компонентами либо для электролиза, либо для термохимических процессов. Электролиз — это процесс выделения водорода и кислорода из молекул воды с помощью постоянного электрического тока. Электролиз воды проходит при относительно низких температурах от 80°C до 120°C, в то время как электролиз водяного пара проводится при гораздо более высоких температурах и поэтому является более эффективным. Электролиз пара может идеально подходить для интеграции с усовершенствованными высокотемпературными АЭС, поскольку для этого процесса требуется подвод теплоносителя с температурой от 700°C до 950°C.

Термохимические процессы позволяют производить водород с помощью химических реакций с определенными соединениями при высоких температурах для расщепления молекул воды. Усовершенствованные ядерные реакторы, способные работать при очень высоких температурах, также могут использоваться в целях производства тепла для этих процессов.

«Производство водорода с использованием серно-йодного цикла, в частности, имеет большой потенциал в плане расширения масштабов применения для обеспечения устойчивой и долгосрочной эксплуатации, — рассказывает Хамис. — Разработка этого метода с использованием конструкций японского реактора HTTR и китайских конструкций HTR-PM 600 и HTR-10 является весьма многообещающей, в рамках других исследовательских инициатив также продолжает наблюдаться отличный прогресс».

В настоящее время несколько стран внедряют производство водорода с использованием АЭС или изучают такую возможность в целях содействия декарбонизации своего энергетического, промышленного и транспортного секторов. Это позволяет также увеличить отдачу от АЭС, что может способствовать повышению ее рентабельности.

МАГАТЭ оказывает поддержку странам, заинтересованным в производстве водорода, посредством различных инициатив, в том числе проектов координированных исследований и технических совещаний. Оно разработало также Программу экономической оценки водорода (HEEP) — инструмент для проведения экономической оценки крупномасштабного производства водорода с помощью ядерной энергии. В начале 2020 года МАГАТЭ запустило также электронный учебный курс, посвященный производству водорода с помощью ядерной когенерации.

«Производство водорода с использованием АЭС имеет большой потенциал в плане содействия усилиям по декарбонизации, но сначала необходимо решить ряд вопросов, таких как определение экономической целесообразности включения производства водорода в более широкую энергетическую стратегию, — говорит Хамис. — Для производства водорода с помощью термохимических процессов расщепления воды требуются инновационные реакторы, работающие при очень высоких температурах,

однако в ближайшие годы ввод таких реакторов в эксплуатацию не ожидается. Аналогичным образом, чтобы серно-йодный процесс окончательно оформился и мог использоваться в коммерческих масштабах, нужно еще несколько лет НИОКР». Он добавляет, что с лицензированием ядерно-энергетических систем, включающих не связанные с производством электроэнергии применения, также могут возникать сложности.

## Изучение и оценка целесообразности

В рамках запущенной в начале 2020 года Министерством энергетики Соединенных Штатов инициативы «H2@Scale» проводится исследование целесообразности разработки ядерно-энергетических систем, производящих одновременно водород и низкоуглеродную электроэнергию. Среди десятков проектов, финансируемых посредством этой инициативы, один будет реализован тремя коммерческими электроэнергетическими компаниями США в сотрудничестве с Айдакской национальной лабораторией Министерства энергетики. В проект войдут технические и экономические оценки, а также экспериментальные демонстрации производства водорода на нескольких АЭС на территории США.

Одна из участвующих в проекте электроэнергетических компаний «Exelon», которая является крупнейшим производителем низкоуглеродной электроэнергии в США, в настоящее время предпринимает шаги по установке на одной из своих АЭС электролизера с полимерной электролитической мембраной мощностью один мегаватт и соответствующей инфраструктуры. С помощью этой системы, которая может быть введена в эксплуатацию к 2023 году, можно будет наглядно увидеть экономическую целесообразность производства водорода с помощью электролиза для удовлетворения потребностей систем, связанных с производством электроэнергии, на месте, а также возможности масштабирования в будущем.

«Этот проект поможет нам понять перспективы производства водорода с помощью ядерной энергии, в частности то, как финансовые соображения могут повлиять на любое долгосрочное крупномасштабное производство водорода, — рассказывает старший вице-президент по инженерным и техническим услугам компании «Exelon Generation» Скотт Гринли. — Внедрение производства водорода с помощью ядерной энергии может в значительной степени повысить устойчивость ядерной энергетики в связи с нашими планами построения низкоуглеродного будущего».

В Соединенном Королевстве также идут работы по проведению оценок. В рамках некоммерческой инициативы «Energy Systems Catapult» в Соединенном Королевстве создана модель целой энергетической системы, и теперь в нее включена возможность использования передовых ядерных технологий для производства водорода. Таким образом можно посмотреть на потенциально наиболее экономичную структуру энергопроизводства, которая к 2050 году сможет обеспечить нулевые выбросы парниковых



## Больше чем водород

Ядерная энергия имеет множество неэлектрических применений помимо производства водорода. Это, например, централизованное теплоснабжение для домов и предприятий, отопление и охлаждение для промышленных целей, а также опреснение морской воды в целях расширения доступности питьевой воды.

Возможности потенциального внедрения этих приложений расширяются также по мере создания новых ядерно-энергетических систем для оптимизации комбинированного использования энергии в электрических и неэлектрических целях, а также интеграции с возобновляемыми источниками. Кроме того, для обеспечения более гибкой эксплуатации разрабатываются новые конструкции реакторов, такие как малые модульные реакторы, которые позволяют регулировать выходную мощность в зависимости от спроса. Это качество делает их особенно подходящими для таких применений, поскольку энергия, которая обычно используется для производства электроэнергии, может быть перенаправлена на использование в неэлектрических приложениях.



### На АЭС «Дэвис-Бесс» в штате Огайо с помощью ядерной энергии будет производиться водород.

(Фото: Б. Рэйберн/АЭС «Дэвис-Бесс»)

газов в чистом выражении, а результаты показывают, что усовершенствованные ядерные реакторы могут быть задействованы в производстве водорода наряду с другими технологиями.

«Хотя Соединенное Королевство еще окончательно не определило роль для водорода, согласно проведенному Комитетом по изменению климата и Министерством по делам бизнеса, энергетики и промышленной стратегии анализу, предполагается, что до 2050 года нам, возможно, потребуется обеспечить около 270 тераватт-часов низкоуглеродной электроэнергии для производства водорода, хотя эта цифра может существенно вырасти в зависимости от того, для каких применений в тепловом, энергетическом и транспортном секторах будет использоваться водород в конечном итоге», — говорит Филип Роджерс, старший стратегический и экономический советник Консультативного совета по ядерным инновациям и исследованиям Соединенного Королевства.

### Новые программы

В 2019 году Россия запустила свою первую инициативу по производству водорода с помощью ядерной энергии.

Реализуемая Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» программа предусматривает использование электролиза на основе вырабатываемой АЭС электроэнергии, а также термохимическое производство с использованием высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Ее цель состоит в том, чтобы обеспечивать производство большого количества водорода каждый год и при этом уходить от таких углеродоемких методов, как паровая конверсия метана.

Произведенный по программе водород пойдет на внутреннее потребление и экспорт. В настоящее время проводится технико-экономическая оценка экспорта части водорода в Японию.

«Учитывая продолжение роста спроса на водород, отчасти благодаря расширению таких отраслей, как металлообработка, производство водорода с помощью ядерной энергии дает возможность существенно сократить выбросы углерода и одновременно повысить рентабельность ядерной энергетики», — говорит Антон Москвин, вице-президент по маркетингу и развитию бизнеса «Русатом Оверсиз».



# Современные, стабильные, надежные

## Место умных сетей и ядерной энергетики в низкоуглеродных энергетических системах

Шинейд Харви

Ядерная энергетика в сочетании с умными сетями электроснабжения (двусторонними сетями, которые соединяют производителей с потребителями с использованием новых технологий) может помочь странам перейти на низкоуглеродные источники электроэнергии и обеспечить надежное, стабильное и устойчивое энергоснабжение.

Многие страны занимаются диверсификацией структуры используемых ими источников низкоуглеродной энергии, чтобы содействовать декарбонизации своей экономики и достижению целей в области борьбы с изменением климата. Эти усилия ведут к глобальному сдвигу в сторону возобновляемых источников энергии, однако сами по себе эти источники не способны полностью и надежно удовлетворить спрос.

«Низкоуглеродные возобновляемые источники энергии благоприятны с точки зрения экологии, но они не всегда легко поддаются контролю и не способны бесперебойно удовлетворять спрос ввиду прерывистого характера энергии солнца и ветра, а также отсутствия крупных мощностей для хранения энергии. Это означает, что электросети часто требуются дополнительные источники энергии, — объясняет Анри Пайер, руководитель Секции планирования и экономических исследований МАГАТЭ. — С появлением большего числа разнообразных источников энергии, попадающей в систему, электросети должны были стать более гибкими и адаптируемыми, чтобы обеспечивать надежное и устойчивое энергоснабжение».

Ядерная энергетика может вырабатывать низкоуглеродную энергию 24 часа в сутки 7 дней в неделю. Она обеспечивает энергетическую безопасность, необходимую странам для перехода к низкоуглеродным энергетическим системам. Благодаря гибкости эксплуатации, АЭС могут дополнять переменную генерацию энергии с помощью возобновляемых источников энергии, а за счет инерции своих больших паровых турбин эти электростанции могут также помогать стабилизировать сети и обеспечивать экологически чистое и надежное энергоснабжение.

Традиционно электросети полагались на включение и отключение электростанций, использующих органическое топливо, такое как уголь и природный газ, для

удовлетворения спроса на энергию, когда он превышал предложение.

Умные электросети же могут принимать множество различных источников энергии и динамически переключаться между ними, в отличие от традиционных энергосистем, которые обладают меньшей гибкостью. Умные сети существуют уже какое-то время, однако последние технологические достижения вывели их на новый уровень. Умные сети могут использовать новейшие технологии, такие как искусственный интеллект и «Интернет вещей» (система подключенных через Интернет компьютеров и устройств, которые могут динамически обмениваться данными и действовать на их основе), для сбора информации, повышения эффективности работы и автоматизации процессов.

Например, умная электросеть может с помощью создаваемых искусственным интеллектом прогнозов предугадывать пасмурные или безветренные дни и динамически переключаться с генерации при помощи энергии солнца или ветра на альтернативные источники, такие как ядерная энергия, для обеспечения бесперебойного снабжения. Искусственный интеллект может также прогнозировать возможные районы возникновения и продолжительность неблагоприятных погодных условий и передавать сети сигнал о необходимости увеличения и диверсификации производства на случай повреждения линий электропередачи.

В случае обрыва линии электропередачи или отключения электроэнергии установленные в сети датчики и устройства системы «Интернет вещей» могут сообщать операторам сети о необходимости проведения ремонтных работ и перенаправления электроэнергии или ее получения из другого источника.

В случае традиционных электросетей степень воздействия непогоды можно было оценить только постфактум. Таким образом, если вы живете дальше места повреждения линии электропередачи, это зачастую означает отсутствие электроснабжения до окончания ремонтных работ. За счет способности находить альтернативные решения для производства и передачи электроэнергии умные сети обладают большей устойчивостью и могут сокращать



продолжительность отключений потребителей от электроснабжения.

Например, в компании «Электрисите де Франс» (ЭДФ), являющейся одним из крупнейших мировых производителей электроэнергии, некоторые из инновационных технологий умных сетей, разработка которых идет в настоящее время, включают в себя использование 5G — технологии мобильного Интернета нового поколения — для поддержки технологии «Интернет вещей» и развития более эффективных гибридных сетей для передачи электрических токов. Также идет внедрение технологий блокчейн, которые обеспечивают весьма надежный способ отслеживания и обработки информации об операциях, для сертификации того, где и в каком количестве производится чистая энергия. ЭДФ использует метод под названием «цифровые двойники», чтобы создавать виртуальную среду для прогнозирования потребностей в обслуживании сети и сокращения расходов на ремонт.

«Наши научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области умных сетей направлены на решение целого ряда задач. Мы также учитываем ожидания общества в отношении более экологически чистой электроэнергетической инфраструктуры и готовимся к рискам, таким как воздействие изменения климата, кибербезопасность и обеспечение устойчивости сетей перед лицом потенциальных кризисов, — говорит Бернар Саля, директор по НИОКР в ЭДФ. — Разумеется, любой новый метод, становящийся возможным благодаря увеличению вычислительных мощностей, будет опробован на существующих моделях для повышения их точности».

Как говорит старший сотрудник МАГАТЭ по ядерной безопасности Диан Заградка, оценка воздействия этих технологических достижений является важной частью этого процесса: «Новые технологии несут пользу только в том случае, если они безопасны. В соответствии с нормами безопасности МАГАТЭ любые изменения конструкции, включая использование технологий искусственного интеллекта и «Интернета вещей», проходят строгую оценку безопасности для определения любого воздействия, которое такие изменения и усовершенствования могут оказать на АЭС и характер их взаимодействия с электросетями. МАГАТЭ организует технические совещания для обсуждения потенциальных последствий и обмена опытом использования этих технологий на АЭС».

## Инерция сети и ядерная энергия

Умные сети позволяют активно подключать и динамически использовать большее число источников энергии. Однако это также ведет к увеличению колебаний электрической частоты и, следовательно, уменьшению стабильности.

Электросеть работает на определенной частоте и сконструирована так, чтобы оставаться в определенном диапазоне, обеспечивающем стабильное энергоснабжение. Изменения в частоте происходят непрерывно, при любом включении или выключении электрических устройств. Они обычно поглощаются производящими электроэнергию движущимися элементами источника энергии, такими как вращающиеся турбины на АЭС или электростанциях, использующих органическое топливо.

Эта тяжелая вращающаяся масса может немного укорять или замедлять свое движение, действуя как поглощающее устройство, помогая уравновесить колебания частоты и сгладить резкие изменения. Характер движения этих элементов и их влияние на энергию в сети называется инерцией сети.

Однако возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия, не имеют таких движущихся элементов. У других возобновляемых источников энергии, которые имеют такие движущиеся элементы, как, например, ветряные турбины, эти движущиеся части не подключены непосредственно к сети, а работают через преобразователь частоты, что означает, что они не обладают необходимой инерцией сети.

«Без инерции сеть имеет ограниченную способность поглощать колебания и может утратить стабильность, — объясняет Шеннон Брэгг-Ситтон, национальный технический директор интегрированных энергетических систем в Айдахской национальной лаборатории в Соединенных Штатах. — Она также становится особенно уязвимой перед значительными изменениями, такими как внезапное отключение источника энергии, большое изменение чистой нагрузки или серьезный сбой в передаче. Эти изменения могут вызывать неожиданный переизбыток или недостаток электроэнергии и возможные в этой связи отключения снабжения электроэнергией. Ядерная энергетика может содействовать решению этой проблемы, обеспечивая стабильность, необходимую для работы сети».

МАГАТЭ оказывает странам поддержку в оценке надежности и устойчивости электросетей, в том числе с использованием ядерной энергии, посредством публикаций, семинаров и технических совещаний. МАГАТЭ также помогает налаживать связи между ядерной отраслью и заинтересованными сторонами в секторе электросетей, предоставляя им возможность обмениваться информацией, делиться положительной практикой и обсуждать общие задачи и возможности. Эти мероприятия помогают странам наметить свои энергетические стратегии, направленные на достижение энергетической безопасности и устойчивости.



# Инвестиции в переход к экологически чистой энергии

## Финансовая и экономическая поддержка ядерной энергетики

Шант Крикорян



**И**нновационные подходы к финансированию и политике регулирования рынка являются одним из способов повышения привлекательности инвестиций в новые АЭС, который может способствовать созданию экологически чистого энергетического будущего.

Значение ядерной энергетики, не производящей при эксплуатации выбросов парниковых газов (ПГ), широко признается во многих странах благодаря ее важной роли в сокращении выбросов ПГ и смягчении последствий изменения климата. Благодаря гибкости и непрерывности создаваемого ею потока энергии она может служить дополнительным источником в случае, когда недоступны другие источники энергии, такие как возобновляемые источники энергии с переменным характером генерации, подобные ветряной или солнечной энергии.

Несмотря на эти преимущества, финансовые соображения представляют собой одну из самых больших сложностей с точки зрения внедрения ядерной энергетики. По экономическим параметрам электроэнергия, вырабатываемая действующими АЭС, остается конкурентоспособной на многих рынках, а вот финансирование строительства новой станции сопряжено с высокими первоначальными капитальными затратами и имеет характер долгосрочных вложений.

«Энергетический рынок меняется и становится все менее предсказуемым во многих странах, поскольку они диверсифицируют свои источники энергии в целях декарбонизации, что ведет к увеличению колебаний цен на энергоносители и сырьевые ресурсы, — объясняет Хуан Вэй, директор Отдела планирования, информации и управления знаниями МАГАТЭ. — Такая повышенная волатильность рынка способствует росту неопределенности с точки зрения принятия обязательств в отношении долгосрочных капиталоемких технологических проектов, требующих больших первоначальных затрат, как, например, ядерная энергетика».

По мнению президента и генерального директора Института ядерной энергетики Марии Корсник, инновационные подходы атомной отрасли к финансированию и политике регулирования рынка могут помогать смягчать неопределенности и противодействовать рыночным колебаниям. Технический прогресс также способствует повышению рентабельности ядерной энергетики (см. стр. 14).

«Для того чтобы ядерная энергетика могла полностью реализовать свой потенциал в будущем мире низкоуглеродной энергии, АЭС должны получать соответствующую компенсацию за присущие им характеристики экологически чистого источника энергии и другие преимущества, которые пока не имеют согласованных критериев оценки на электроэнергетических рынках, — говорит Корсник. — Директивным органам следует придерживаться подходов, которые основываются на получающем все более широкую поддержку мнении, что наиболее экономически эффективным способом быстрого перехода к экологически чистой электроэнергетической системе является подключение к этому процессу ядерной энергетике. Это означает придание приоритетного характера сохранению существующих ядерно-энергетических активов и созданию возможностей для строительства усовершенствованных ядерно-энергетических установок».

По оценкам Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, общая сумма прямых субсидий энергетическому сектору во всем мире в 2017 году составила не менее 634 млрд долл. США. Преобладающая доля субсидий приходилась на ископаемое топливо и технологии производства электроэнергии из возобновляемых источников.

### Стимулирование инвестиций в ядерную отрасль

Соглашения о закупке электроэнергии (СЗЭ) десятилетиями использовались для развития различных технологий, а



теперь они укрепляют свои позиции и в ядерной энергетике в качестве наиболее широко используемого подхода для снижения неопределенности и обеспечения долгосрочных доходов от новых проектов по строительству АЭС. Эти соглашения заключаются между исполнителями проекта и покупателями произведенной АЭС электроэнергии для того, чтобы согласовать цену на определенное количество электроэнергии на определенный, как правило продолжительный период времени, которая зачастую полностью покрывает все затраты по проекту с прибылью. СЗЭ обычно дополняются также другими формами поддержки со стороны правительств и поставщиков, а также инновационными схемами финансирования ядерной энергетике, такими как «контракты на разницу цен» и «строительство, содержание, эксплуатация», которые призваны снизить риск и привлечь инвестиции.

Например, для реализации проекта АЭС «Аккую» в Турции использовались СЗЭ, а также финансирование и гарантии по кредитам со стороны государства и поставщиков.

«В случае АЭС «Аккую» СЗЭ, покрывающее стоимость проекта, сочетается с финансированием со стороны поставщика, представленного российской Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом», которая будет строить, содержать и эксплуатировать станцию. Таким образом, все участвующие в проекте стороны ощущают стабильность и уверенность, поскольку они знают, что цена на электроэнергию и различные инвестиции гарантированы, — говорит Антон Дедусенко, заместитель председателя совета директоров компании «Аккую нуклеар». — Гарантии, полученные по этому СЗЭ, открывают возможности для проведения переговоров с потенциальными инвесторами о приобретении ими до 49% долевого участия в проекте. Обычно подобные крупные инвестиции привлекательны только в случаях, когда есть уверенность и ясность относительно будущих доходов электростанции, а именно это и может обеспечить СЗЭ».

## Установление платы за выбросы углерода

С прицелом на экологически чистое энергетическое будущее меры государственной политики по поддержке низкоуглеродного производства электроэнергии реализуются в виде прямых субсидий, специальных тарифов, обязательств по квотам и льготного налогообложения.

Одним из широко используемых подходов является установление платы за выбросы углерода, который направлен на сокращение выбросов и стимулирование использования низкоуглеродных источников энергии. Это также помогает сделать эти источники энергии более конкурентоспособными и стабильными на фоне низкой стоимости органического топлива.

Установление платы за выбросы углерода в самом простом виде представляет собой определенный сбор с одной тонны выбросов углекислого газа, например электростанциями и промышленными котлами. Согласно механизму установления платы за выбросы углерода, электростанция, использующая

органическое топливо и выделяющая большое количество углекислого газа, платит больше, чем станция, использующая низкоуглеродные источники энергии и выделяющая меньше выбросов.

«Плата за выбросы углерода устанавливается на основе расчетной стоимости выбросов ПГ, такой как стоимость ущерба здоровью человека и окружающей среде, — говорит Анри Пайер, руководитель Секции планирования и экономических исследований МАГАТЭ. — Целью является перенос бремени ущерба, причиняемого выбросами углекислого газа, на источник выбросов, чтобы стимулировать использование низкоуглеродных источников энергии в целях сокращения выбросов парниковых газов в конечном итоге».

В случае ядерной энергии установление платы за выбросы углерода может также сделать ее более конкурентоспособной в эксплуатации, чем органическое топливо, особенно в долгосрочной перспективе, за счет экономии на выбросах. Благодаря стабилизации платы можно также снизить некоторую неопределенность в связи с инвестициями в ядерную энергетiku.

«Чтобы низкоуглеродные технологии, такие как ядерные, а также гидроэнергетические и возобновляемые источники энергии с переменным характером генерации, оставались конкурентоспособными по отношению к органическому топливу, особенно в условиях падения цен на органическое топливо, нужно иметь такой механизм установления платы за выбросы углерода, — говорит Ян Хорст Кепшлер, старший экономический советник Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР). — При этом в долгосрочной перспективе правительства должны убедить разработчиков проектов и инвесторов, что они серьезно настроены на введение стабильного или прогрессивного ценообразования в отношении выбросов углерода».

Пока страны изучают возможные варианты в области финансирования и политики, деятельность МАГАТЭ в области энергетического планирования помогает им ориентироваться в этом процессе. МАГАТЭ проводит обследования существующих моделей финансирования, а также организует совещания экспертов и публикует комплексные отчеты о затратах и выгодах ядерной энергетике на примерах успешно завершенных проектов.

«Обеспечение продолжения эксплуатации существующих и ускорение темпов введения в строй новых АЭС может быть сложной задачей в условиях волатильного энергетического рынка, — говорит Пайер. — Государственные органы не должны забывать о роли ядерной энергии как ключевого фактора устойчивого развития и производства экологически чистой энергии».

# Безопасность и лицензирование малых модульных реакторов

## Технологически нейтральный подход

Миклош Гашпар



Помещение щита управления моделью малого модульного реактора компании «NuScale Power».

(Фото: Energy Northwest)

Несмотря на то, что малые модульные реакторы (ММР) имеют меньший размер и используют инновационные технологии со многими встроенными функциями безопасности, главная цель регулирования остается неизменной — обеспечить защиту населения и охрану окружающей среды, а также свести к минимуму риск аварий и радиоактивных выбросов.

Новые подходы к разработке и внедрению ММР могут создавать проблемы для существующей нормативной базы. По сравнению с действующими реакторами конструкции ММР являются в целом более простыми, а концепция безопасности для ММР в большей степени опирается на пассивные системы и такие присущие этим реакторам внутренние характеристики безопасности, как малая мощность и низкое рабочее давление. Это увеличивает запас безопасности и в некоторых случаях практически исключает риск серьезного повреждения активной зоны реактора и, следовательно, вероятность крупных выбросов радионуклидов в случае аварии. Следовательно, снижается зависимость от активных мер по локализации и устранению последствий аварий.

«Работа ММР в целом в меньшей степени зависит от систем безопасности, эксплуатационных мер и участия человека, чем существующие реакторы. Поэтому обычный подход к регулированию, основанный на перекрывающихся мерах безопасности для компенсации потенциальных механических неисправностей и человеческих ошибок, может оказаться неуместным, так что следует рассмотреть новые идеи», — рассказывает Грег Жентковский, директор Отдела безопасности ядерных установок МАГАТЭ. При этом он добавляет, что основные концепции, лежащие в основе нынешнего подхода к обеспечению безопасности, такие как, например, глубокоэшелонированная защита, которая обеспечивает предотвращение и смягчение последствий аварий на нескольких инженерных и организационных уровнях, применимы и к ММР, если они реализуются с использованием информации о рисках и показателях работы.

Для того, чтобы продемонстрировать безопасность конструкции АЭС любого типа, требуется представить всестороннюю оценку безопасности станции во всех состояниях — нормальной эксплуатации, ожидаемые при эксплуатации события и аварийные условия. На этой основе



можно установить способность конструкции выдерживать внутренние и внешние события и определить критерии эффективности характеристик безопасности, включая аварийное планирование.

«В рамках проверки концепции ММР требуется провести демонстрацию эффективности фундаментальных функций безопасности (управление реактором, охлаждение активной зоны и локализация реактивности) на основе оптимизации стратегий глубокоэшелонированной защиты для сведения к минимуму рисков аварий и, в случае возникновения аварии, практического устранения ее последствий», — объясняет Жентковский. Учитывая новые концепции конструкций и безопасности, особое внимание следует уделять проверке обоснования безопасности, взаимодействию между энергоблоками, свойствам материалов и человеческому фактору. Кроме того, по его словам, независимо от того, насколько низок риск аварий, необходимо иметь масштабируемые механизмы локализации и устранения последствий аварий на случай непредвиденных обстоятельств.

### Технологически нейтральная основа

Поскольку инновационные технологические концепции и конструкции, включая ММР, разнообразны с технической точки зрения, МАГАТЭ работает над созданием технологически нейтральной основы безопасности для содействия гармонизации международных подходов на основе существующих норм безопасности МАГАТЭ.

Такая технологически нейтральная основа состоит из общей части с перечислением задач с точки зрения общества и здравоохранения, целей в вопросе предотвращения рисков, а также принципов и требований безопасности высокого уровня, которую затем можно конкретизировать в рамках национальной основы для учета регулятивных и технических элементов в зависимости от особенностей конкретной используемой технологии. Как считает Жентковский, этот подход обеспечивает гибкость и достижение сбалансированного сочетания инноваций и проверенных методов, что необходимо для оптимизации защитных и смягчающих мер в соответствии с общими целями безопасности и конкретными целевыми показателями риска.

Некоторые страны уже ведут активную работу в этом направлении. Например, Канада является одной из немногих стран, наряду с Аргентиной, Китаем, Россией и Соединенными Штатами, которые проводят рассмотрение вопросов регулирования ММР.

«Технологически нейтральная нормативная основа Комиссии по ядерной безопасности Канады (КЯБК), которая в значительной степени основана на нормах безопасности МАГАТЭ, обеспечивает новизну и инновации в проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации реакторов без ущерба для безопасности, — говорит генеральный директор КЯБК Хью Робертсон. — В тех случаях, когда существует неопределенность относительно запаса безопасности

конструкции, а эксплуатационный опыт является ограниченным, может потребоваться дополнительный эксплуатационный контроль. В этих случаях защитные меры будут соразмерны риску».

«Сотрудничество между ядерными регулирующими органами и гармонизация регулируемых требований могут принести пользу всем вовлеченным сторонам, — добавляет он. — Это в конечном счете делает процесс лицензирования более эффективным и действенным. По сути, рассмотрение общих проблем безопасности сразу несколькими сторонами может способствовать повышению уровня безопасности. Можно также использовать одинаковую научную и нормативную информацию в процессе изучения дальнейших возможностей для гармонизации с соблюдением суверенных прав регулирующих органов».

### Предметные исследования для демонстрации безопасности

Несмотря на то, что нормы безопасности МАГАТЭ, которые служат глобальным ориентиром для защиты населения и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения, в целом являются технологически нейтральными и могут применяться к ММР, МАГАТЭ продолжит оказывать поддержку национальным регулирующим органам путем разработки конкретных руководящих указаний по их применению. «Предметные исследования, демонстрирующие то, как требования к конструкциям АЭС могут быть использованы для лицензирования двух наиболее распространенных технологий ММР (водоохлаждаемых и высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов), уже завершены», — сообщает Жентковский.

Параллельно на Форуме регулирующих органов по ММР ведется работа по обмену знаниями и опытом в области регулирования и выявлению положительной практики. Организованный МАГАТЭ Форум представляет собой международную группу, работающую над проблемами регулирования новых конструкций ММР, с тем чтобы определить новые рекомендации по безопасности для ММР. По итогам совещания по разработке специальных национальных норм для ММР эти рекомендации были размещены на сайте МАГАТЭ. Работа Форума сосредоточена на изучении многомодульного характера ММР и аспектов безопасности в связи с взаимозависимостью модулей для того, чтобы удостовериться в том, что если что-то пойдет не так в одном модуле, то его воздействие на другие модули будет минимальным.

«Признавая, что безопасность всегда будет оставаться приоритетом номер один, подход регулирующих органов к ММР требует смещения внимания только с одного обособленного реактора на глобальную оценку безопасности надежности конструкции, полноты обоснования безопасности и достаточности процессов, предпринимаемых для обеспечения безопасности на протяжении всего срока службы реактора, чтобы избежать такой ситуации, когда вопросы безопасности начинают решать только после окончания строительства», — говорит Жентковский.

# Развитие во имя будущего

## Гарантии и ядерная энергетика

### Адем Мютлуер

**Я**дерно-энергетические технологии продолжают развиваться, и во всем мире увеличивается число ядерных установок и количество ядерного материала. Технологии, связанные с гарантиями, также должны идти в ногу со временем, чтобы сохранять свою эффективность. Гарантии представляют собой комплекс технических мер, которые позволяют удостовериться в том, что ядерный материал и технологии используются исключительно в мирных целях и не переключаются на производство ядерных бомб.

«В ближайшее время на осуществлении международных гарантий могут сказаться технологии искусственного интеллекта, послыонного синтеза и распределенного реестра, — говорит Чад Хаддал, специалист МАГАТЭ по координации информационно-просветительской деятельности в связи с гарантиями. — С развитием передовых средств производства ядерной энергии необходимо продолжать адаптировать гарантии, чтобы обеспечить непрерывную и эффективную проверку».

Технический прогресс способствует повышению устойчивости, рентабельности, безопасности и надежности ядерной энергетике. Стабильные источники низкоуглеродной энергии, такие как ядерная энергетика, приобретают все большее значение для многих стран, стремящихся обеспечить безуглеродную выработку энергии и построить экологически чистое будущее.

«По мере развития ядерно-энергетических технологий необходимо принимать во внимание гарантии, — говорит Менексе Бастурк Татлису, специалист МАГАТЭ по анализу гарантий. — Соглашения о гарантиях с государствами предусматривают, что МАГАТЭ может проверить весь ядерный материал в соответствующих странах. Для выполнения этого обязательства государства должны

предоставить информацию о конструкции всех ядерных установок, чтобы МАГАТЭ могло проверить использование и количество ядерного материала».

### Новые и перспективные технологии

Эксперты МАГАТЭ по гарантиям внимательно следят за новыми и перспективными технологиями, чтобы быть в курсе изменений и понимать, как они могут повлиять на их работу. В рамках этих усилий Департамент гарантий МАГАТЭ организует семинары-практикумы по перспективным технологиям, на которых международные эксперты вместе с сотрудниками МАГАТЭ обсуждают и анализируют эти технологии.

«Проводимый экспертами анализ новых технологий, которые могут оказать воздействие на выработку ядерной энергии и на ядерную отрасль в целом, помогает нам понять, как они могут сказаться на осуществлении гарантий и на условиях нашей работы в будущем, — говорит Хаддал. — Мы рассматриваем как преимущества, так и проблемы, связанные с новыми технологиями. Мы должны быть в курсе технологических разработок, имеющих отношение к нашей деятельности, и адаптироваться к ним, при этом мы применяем инициативный подход, ориентированный на перспективу».

### Применение и совершенствование технологий

Одним из последних примеров новых технологий, разрабатываемых МАГАТЭ, является набор основанных на обучении алгоритмов, известных как нейронные сети. Эти управляемые компьютером сети обладают аналогом ассоциативной памяти человеческого мозга и способны постепенно изучать, анализировать и выявлять закономерности, помогающие понимать данные.

**Инспекторы по гарантиям устанавливают камеру наблюдения.**

(Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)





Что касается гарантий, то аналитики рассматривают большие объемы данных, собранных с помощью систем видеонаблюдения. В 2019 году у МАГАТЭ имелось 1425 камер наблюдения на ядерных установках по всему миру. Эти камеры работают в круглосуточном режиме. Они дают возможность непрерывно отслеживать ядерный материал и позволяют инспекторам по гарантиям удостовериться в том, что не было ни несанкционированного доступа к материалу, ни незаявленной эксплуатации установки. На некоторых установках используется несколько камер наблюдения, в результате чего образуется огромный объем данных.

СБлагодаря нейронным сетям, которые могут быть разработаны с помощью искусственного интеллекта и машинного обучения, инспекторы по гарантиям могут фиксировать перемещение ядерного материала и другую связанную с гарантиями деятельность на установке. Кроме того, с помощью этих технологий можно определять наиболее значимые показатели, позволяющие оценивать и отслеживать объекты и выявлять непредвиденные объекты и поведение. В результате специалисты, анализирующие данные с камер наблюдения, могут более эффективно использовать свое время.

## Встроенные гарантии

Технологии открывают новые возможности для эффективного использования ядерной энергетики, и опыт показывает, что лучше всего с самого начала проектировать новые установки, принимая во внимание необходимость осуществления гарантий.

«Учет соображений гарантий на всех этапах — это беспроигрышный вариант для страны, операторов и МАГАТЭ, занимающегося гарантиями, — говорит Бастурк Татлису. — Если при проектировании новых

ядерно-энергетических установок и процессов принимать во внимание соображения гарантий, то у операторов, а также инспекторов МАГАТЭ по гарантиям появляется возможность еще больше упростить процесс проверки соблюдения гарантий».

Например, проектирование хранилища свежего топлива, активной зоны реактора и хранилища отработавшего топлива на новой ядерной установке с учетом гарантий позволяет сделать осуществление гарантий более экономичным и эффективным и свести к минимуму вмешательство в процесс эксплуатации ядерной установки.

В распоряжении стран имеется серия документов МАГАТЭ по учету требований гарантий при проектировании, в которой содержатся руководящие материалы и рекомендации относительно того, какие факторы гарантий следует учитывать, например, при проектировании нового ядерного реактора, модернизации или строительстве ядерной установки и создании установки для долгосрочного обращения с отработавшим топливом. В этой серии приводятся рекомендации для компетентных органов, конструкторов, поставщиков оборудования и потенциальных покупателей, позволяющие принимать обоснованные решения, а также учитывать факторы, связанные с рентабельностью, эксплуатацией, безопасностью и сохранностью, при проектировании ядерной установки.

«Серия документов по учету требований гарантий при проектировании призвана помочь странам найти оптимальный баланс между расходами, правовыми требованиями и эффективностью эксплуатации, — говорит Бастурк Татлису. — При разработке всех элементов ядерного топливного цикла — от первоначального планирования до вывода из эксплуатации — следует учитывать требования гарантий при проектировании».



# Ядерная энергетика как двигатель более глубокой декарбонизации

Кёрсти Гоген и Эрик Ингерсол



Кёрсти Гоген — одна из основателей и генеральный директор Energy for Humanity («Энергия для человечества»), природоохранной неправительственной организации, деятельность которой направлена на содействие реализации концепции «глубокой декарбонизации» в широких масштабах и обеспечение доступности энергии.



Эрик Ингерсол — консультант по стратегическим вопросам и предприниматель с обширным опытом в области коммерциализации новых энергетических технологий, в Energy for Humanity занимает должность технического директора.

Миру предстоит проделать еще долгий путь к тому, чтобы достичь предусмотренных Парижским соглашением целей в области климата, направленных на ограничение роста глобальной средней температуры до отметки ниже 1,5–2°C к 2050 году. Текущие прогнозы указывают на то, что к 2050 году большая часть потребления энергии в мире все еще будет обеспечиваться за счет органического топлива.

Если будет превышена отметка в 1,5 °C, человечеству, возможно, придется примириться с последствиями изменения климата, причем миллионы людей могут быть вытеснены со своих мест проживания из-за повышения уровня моря, а еще миллионы — страдать от периодов экстремальной жары, не говоря уже о серьезных последствиях для биологического разнообразия на планете, в числе которых — исчезновение видов, таяние морских льдов в Северном Ледовитом океане и гибель практически всех коралловых рифов.

Если будет превышена также и отметка в 2°C, половина населения Земли может испытывать на себе влияние «смертельной жары» в летние месяцы, антарктический ледяной щит может разрушиться, масштабы засух — многократно возрасти, а пустыня Сахара может начать захватывать Южную Европу. Производство продовольствия в мире может быть поставлено под угрозу, что приведет к массовой миграции населения и нарастанию опасности краха цивилизации.

Текущие сценарии развития энергетики, даже предполагающие значительное расширение генерации энергии на основе возобновляемых источников, лишь приближают наступление на

планете катастрофических последствий изменения климата, при этом риск того, что температура в итоге повысится почти на 4°C, весьма высок. Это может предвещать то, что существенная часть планеты станет непригодной для жизни.

Совместно финансируемая нами кампания «Гибкое развитие ядерных технологий» в рамках комплекса инициатив на уровне министров «Экологически чистая энергия» направлена на изучение вариантов того, как благодаря расширению роли ядерной энергетики можно снизить риски при переходе к экологически чистой энергии. В этой публикации мы подробнее рассмотрим два пути к обеспечению более глубокой декарбонизации за счет ядерной энергетики.

Первый путь заключается в расширении доли ядерной энергетики в структуре производства электроэнергии на основе внедрения усовершенствованных реакторов в сочетании с технологиями аккумулирования тепловой энергии. Эти решения призваны дополнить собой возобновляемые источники энергии в составе энергосистем будущего.

Второй путь заключается в решении проблем использования нефти и газа, за счет которых в настоящее время обеспечивается три четверти потребляемой в мире энергии, путем развития производства водорода в крупных масштабах и с низкими затратами на основе мощностей ядерной энергетики.

Для достижения необходимых показателей с точки зрения затрат, масштабов и темпов внедрения требуется новая парадигма развития ядерной энергетики. Ядерная отрасль должна действовать ответственно и творчески и находить место для инноваций как в техническом плане, так и в плане ведения бизнеса, как это научились делать те компании, которые занимаются возобновляемой энергией.

Итак, в чем заключается потенциал ядерных технологий в контексте обеспечения к 2050 году нулевого показателя выбросов и устойчивого снабжения энергией для всех, который может быть раскрыт при наличии концепции массового, малозатратного, быстро развертываемого и коммерчески привлекательного производства?

## Гибкие ядерные технологии в энергосетях будущего

В нашем исследовании на тему требуемых показателей затрат и производительности для усовершенствованных АЭС, которое недавно было проведено в Соединенных Штатах в рамках программы MEITNER Агентства передовых исследований в области энергетики (ARPA-E), определены требования, которые предъявляются рынком к компаниям — разработчикам усовершенствованных реакторов, которые хотят создать востребованные и конкурентоспособные с точки зрения затрат продукты с перспективой их коммерциализации в начале 2030-х годов.

В этом исследовании установлены ценовые и эксплуатационные характеристики, исходя из которых владельцы АЭС и инвесторы, а также общество в целом могут наметить путь к недорогим,



надежным, устойчивым, гибким и — самое главное — экологически чистым электроэнергетическим системам будущего. Полученные нами результаты указывают на то, что для усовершенствованных реакторов, затраты на создание которых составляют менее 3000 долл. США в расчете на киловатт мощности, открываются обширные рыночные перспективы. Сочетание АЭС с системами для аккумулирования тепловой энергии позволит эффективно использовать ядерные установки в качестве ресурса для удовлетворения пиковой нагрузки, который при этом способен обеспечить дополнительный полезный запас энергии и повысить отдачу от энергосистемы. С точки зрения операторов энергосетей, организаций, занимающихся анализом энергетических систем, и директивных органов это свидетельствует о ценности гибких ядерных технологий не только в плане снижения объемов выбросов, но также и в плане снижения совокупных издержек в рамках всей энергосистемы.

## Синтетическое топливо с использованием водорода

Для того чтобы достичь требуемых масштабов и темпов снижения выбросов, а также обеспечить большую доступность энергии и экономический рост во всем мире, используемые в качестве замены безуглеродные или не связанные с образованием углерода виды топлива должны быть равноценны органическим видам топлива с точки зрения стоимости и характеристик.

Производство водорода с использованием ядерной энергии и с нулевым показателем выбросов может быть вполне конкурентоспособным с точки зрения затрат по сравнению с другими технологиями производства без выбросов двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>), а также потенциально может конкурировать с технологией паровой конверсии метана, получаемого из недорогого природного газа (Allen et al. 1986; BloombergNEF 2020; Boardman et al. 2019; Gogan and Ingersoll 2018; Hydrogen Council 2020; IEA 2019b; NREL 2019b; M. Ruth et al. 2017; Yan 2017). Даже дорогостоящие головные энергоблоки традиционных проектов АЭС в Европейском Союзе и Соединенных Штатах могут производить водород с использованием экологически чистой энергии при затратах, сопоставимых с современными солнечными и ветровыми электростанциями, имея при этом высокий коэффициент использования установленной мощности.

Более того, крупномасштабное и малозатратное производство «экологически чистого» водорода может создать условия для декарбонизации в сфере авиации, морского судоходства, производства цемента и промышленного производства, при условии способности водородного топлива конкурировать с дешевой нефтью. По нашим оценкам, для этого его цена должна составлять 0,90 долл. США за килограмм.

Согласно текущим прогнозам в отношении производства водорода на основе возобновляемой энергии, ожидаемый уровень цен к 2030 году составит всего 2 долл. США, а к 2050 году и того меньше. Снижение цен сдерживается малым коэффициентом использования установленных мощностей даже несмотря на то, что следует ожидать дальнейшего уменьшения капитальных затрат на установки по использованию возобновляемых источников энергии.

Атомные электростанции сегодня могли бы поставлять «чистый» водород по цене менее 2 долл. США/кг, а с появлением нового поколения усовершенствованных модульных реакторов не исключено, что к 2030 году уровень цен достигнет 0,90 долл. США/кг.

Для того чтобы обеспечить масштабный прирост производства «чистого» водорода, модели реализации и внедрения проектов

в ядерной отрасли должны быть переосмыслены с точки зрения возможностей по масштабированию и производству тепла, топлива и электроэнергии без загрязнения окружающей среды. Это потребует столь же сильного смещения акцентов в сторону оптимизации затрат, повышения показателей работы и темпов внедрения, что в случае с возобновляемыми источниками энергии привело к тому, что сам облик глобальной энергетической системы начал меняться.

Стремительное сокращение затрат в ближайшей перспективе будет достижимо за счет перехода от традиционных проектов строительства к использованию высокопроизводительных производственных комплексов, например судостроительных верфей, или к развертыванию электролизных заводов по производству водорода гигаваттного масштаба, которые будут представлять собой перерабатывающие заводы следующего поколения, размещаемые на площадках уже имеющихся объектов, таких как крупные прибрежные нефтегазоперерабатывающие заводы.

Переход от традиционного строительства к высокопроизводительным комплексам по изготовлению усовершенствованных реакторов позволит радикально снизить затраты на производство «чистого» водорода и синтетического топлива. Ведущие судостроительные верфи уже обладают обширными производственными мощностями, которые могут быть использованы для производства специально разработанных установок по производству водорода.

Появление гигаваттных электролизных заводов и сошедших со ступеней судостроительных верфей плавучих ядерных энергетических установок позволит миру вернуться на правильный путь, ведущий к достижению целей Парижского соглашения по удержанию прироста температуры в пределах 1,5/2°C. Эти масштабные усилия по декарбонизации могут быть осуществлены при изъятии под эти цели очень малых площадей, благодаря чему удастся сохранить больше земель для восстановления дикой природы и природных экосистем, что составляет разительный контраст с «беспорядочным разрастанием энергетической инфраструктуры», под которым понимается выделение под промышленное освоение технологий получения энергии из возобновляемых источников территорий, сравнимых по площади с иными странами.

Руководствуясь этими моделями предоставления энергетических услуг, проделав за три десятилетия путь от потребляемых в сутки 100 млн баррелей нефти к равнозначным объемам используемого в качестве ее замены «чистого» топлива получится с гораздо меньшими затратами: вместо 25 триллионов долларов США, которые требуются для поддержания поставок нефти на период до 2050 года, пришедшие на замену нефти виды топлива, получаемые при помощи «чистой» энергии, обойдутся в 17 триллионов. Эта цифра становится еще наглядней в сравнении с 70 триллионами долларов США, которые понадобятся для реализации стратегии, делающей ставку только на возобновляемые источники энергии.

Благодаря ядерной энергетике, работающей на основе этих переосмысленных моделей предоставления услуг, затраты на декарбонизацию экономики могут оказаться ниже, чем затраты в связи с дальнейшим использованием органического топлива. Тем не менее этот переход не может быть начат до тех пор, пока правительствами и другими заинтересованными сторонами не будут предприняты срочные меры по сокращению издержек и ускорению внедрения инновационных технологий. Необходимо, чтобы в общемировых усилиях по декарбонизации ядерная энергетика заняла свое полноправное место.

## Оптимизация хранения МАГАТЭ проводит обучение по вопросам обращения с радиоактивными отходами в Африке



**Участники практических занятий наблюдают за экспертом МАГАТЭ, который извлекает изъятый из употребления источник, ранее использовавшийся в промышленности.** (Фото: О. Юсуф/МАГАТЭ)

Надлежащие переработка, кондиционирование и хранение изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников (ИЗРИ) чрезвычайно важны для обеспечения безопасности и защиты людей и окружающей среды. Однако эта деятельность может быть сопряжена с трудностями, особенно в странах, которые еще не располагают своими собственными ноу-хау в этой области. Поэтому МАГАТЭ содействует разработке более простого и экономичного подхода к управлению ИЗРИ, подходящего для стран с относительно небольшим количеством ИЗРИ. Впервые этот новый подход был применен в 2020 году на учебных курсах МАГАТЭ в Кампале, Уганда.

Данный подход предусматривает использование установки со всеми необходимыми элементами для переработки, кондиционирования и хранения низкоактивных источников нейтронного- и гамма-излучения, которые обычно используются в промышленности и медицине. Так называемая концепция «двух ISO-контейнеров» предусматривает, что на установке имеются два стандартных транспортных контейнера, расположенных в непосредственной близости друг от друга и оснащенных надлежащими системами вентиляции, контроля за загрязнением, безопасности

и защиты. Один контейнер служит для переработки и кондиционирования, а другой — для приема и промежуточного хранения низкоактивных ИЗРИ, а затем и кондиционированных источников.

На функционировании установки и связанных с ней процедур положительно сказалось проведение международной независимой экспертизы. Специалисты из Ганы, Германии, Марокко и Соединенных Штатов сформировали группу международных экспертов по вопросам обращения с радиоактивными отходами, которая наблюдала за работой установки с двумя ISO-контейнерами, а также за самими учебными курсами МАГАТЭ. Эксперты также провели анализ установки и применяемых на ней технических процедур обращения с отходами на этапах от приема до отправки на хранение, чтобы оценить этот подход на предмет соответствия всем международным нормам и наилучшей практике. Эти усилия, предпринимаемые при финансовой поддержке со стороны Европейского союза, являются частью более масштабной инициативы МАГАТЭ в рамках Африканского регионального соглашения о сотрудничестве при проведении исследований, разработок и при подготовке кадров в связанных с ядерной наукой и техникой областях (АФРА), направленной на оказание содействия африканским странам

в укреплении их правовой и регулирующей инфраструктуры в области ядерной и физической безопасности. В каждой стране национальный регулирующий орган должен выдавать лицензию на использование установки с активными радиоактивными источниками. В Уганде такая лицензия была выдана до начала учебных курсов. «Это было сделано в соответствии с нормами безопасности МАГАТЭ», — говорит Деогратиас Секьянзи, генеральный директор Совета по атомной энергии, являющегося национальным регулятором Уганды.

В некоторых странах, таких как Камерун, имеются хорошо продуманные планы по использованию транспортных контейнеров для хранения ИЗРИ, однако в других странах безопасность этого метода еще не была доказана. В рамках нового проекта технического сотрудничества, начатого в 2020 году, МАГАТЭ помогает национальным организациям укреплять свой потенциал, чтобы они могли обеспечивать безопасное хранение, объясняет Дэвид Беннетт, специалист МАГАТЭ по безопасности отходов.

### Контейнер и капсула

Когда установка построена, следующим шагом является извлечение радиоактивных источников из устройств в соответствии с требованиями и руководящими указаниями, изложенными в Кодексе поведения по обеспечению безопасности и сохранности радиоактивных источников и в нормах безопасности МАГАТЭ. В основе предлагаемого подхода лежат технические процедуры, которым местный персонал должен следовать при извлечении изъятых из употребления источников и их кондиционировании до состояния, пригодного для хранения. Эти процедуры предусматривают использование специальной капсулы из нержавеющей стали, в которую помещаются изъятые из употребления источники. Такая капсула обеспечивает надлежащую герметизацию без использования специализированного оборудования, что облегчает обращение с ней в любой стране. Капсула, содержащая источники, закрывается и помещается в свинцовый кожух, который, в свою очередь, кладется в бетонированный цилиндр, используемый для хранения и транспортировки ИЗРИ.

«Новая установка такого типа, продемонстрированная в Уганде, может быть построена на площади менее 1000 квадратных метров и является



доступной по цене», — говорит Мохамед аль Муграби, старший эксперт МАГАТЭ.

## Обучение специалистов по обращению с радиоактивными отходами в Африке

МАГАТЭ, постоянно оказывающее содействие в контроле за ИЗРИ по всему миру, в рамках своей программы технического сотрудничества организует

серию курсов практического обучения, в том числе посвященных строительству, лицензированию и использованию установок с двумя ISO-контейнерами. Ожидается, что эти учебные курсы будут проводиться по всей Африке, особенно в странах, где еще нет установок по переработке, кондиционированию и хранению отходов.

По итогам демонстрации подхода, основанного на использовании двух ISO-контейнеров, в Уганде, а также в Камеруне, Сенегале и Зимбабве, и по результатам международной технической

независимой экспертизы были составлены планы по внедрению этой концепции в большем числе стран, включая Камерун, Мадагаскар, Нигерию и Эфиопию.

МАГАТЭ при финансовой поддержке со стороны Европейской комиссии, Испании и Соединенных Штатов осуществило проект RAF9062 «Совершенствование обращения с радиоактивными отходами (АФРА)».

— Омар Юсуф

## Овощи с улучшенными вкусовыми и питательными характеристиками Болгария повышает качество пищевых продуктов при поддержке МАГАТЭ



Профессор ИЗК Нася Томлекова и Илия Валчанов — один из сельхозпроизводителей, выращивающих вновь выведенные сорта. (Фото: ИЗК)

Болгария, одна из отличающихся наибольшим биологическим разнообразием стран в Европе, уже долгое время является крупнейшим экспортером различных пищевых продуктов. В условиях постепенно повышающихся в течение последних десятилетий температур фермеры отмечают снижение урожайности и качества основных культур. Чтобы обеспечить адаптацию к изменениям окружающей среды и устойчивость выращивания овощей с сохранением их полезных свойств и в дальнейшем, теперь применяются ядерные методы.

«Болгария известна своими сельскохозяйственными культурами высокого качества, в основе которого

лежат давние традиции овощеводства во всех регионах страны, — говорит Нася Томлекова, руководитель Лаборатории молекулярной биологии Института овощных культур «Марица» (ИЗК), расположенного в Пловдиве, втором по величине городе страны. — Сегодня мы сталкиваемся со все более серьезными проблемами, связанными со снижением продуктивности и качества местных сортов. Нам необходимо развитие в этой области и содействие продажам продукции — все это возможно при использовании ядерных методов».

Реализуемые в настоящий момент при поддержке МАГАТЭ совместно с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных

Наций (ФАО) программы селекции направлены на выведение новых сортов перца, томата и картофеля.

По состоянию на 2020 год ожидается, что в течение ближайших трех лет в распоряжение фермеров будут предоставлены три сорта перца. Один из них, «Златна шипка», который был получен в 2020 году, обладает на 7% более высокой урожайностью по сравнению с традиционными сортами. В 2021 году будет введен в культуру сорт перца «Десислава», который отличается большей урожайностью и повышенным содержанием бета-каротина, таким же как у моркови. Это имеет большое значение, учитывая, что достаточное потребление бета-каротина, который в нашем организме преобразуется

в витамин А, крайне важно для здоровья кожи и глаз, а также укрепления иммунной системы. Повышенная концентрация бета-каротина будет характерна и для сорта перца «Тонико», который планируется ввести в культуру в 2022 году.

«Как всякий фермер, я вкладываю немало заботы и труда в то, чтобы получить здоровый и качественный урожай, — рассказывает Янчо Валчев, один из фермеров, участвующих в пилотных испытаниях в рамках программы мутационной селекции. — Мы сталкиваемся с самыми разными трудностями — изменением климата, болезнями растений, сельскохозяйственными вредителями, — но за счет этих программ нам удается сохранять более высокие показатели урожайности и качества наших культур».

«Как молодого человека, которому еще нет тридцати, меня интересуют правильное питание и здоровый образ жизни, и как фермер я могу обеспечивать возможности для этого благодаря новым сортам, — говорит Илия Валчанов, еще один участвующий в программе фермер. — Уже сейчас такие продукты пользуются повышенным спросом в местных магазинах, особенно у молодежи, разделяющей мой интерес к правильному питанию».

Это лишь одна из последних инициатив МАГАТЭ и ФАО по поддержке сельского хозяйства в Болгарии. Болгарские специалисты, которые участвовали в учебных мероприятиях и исследованиях МАГАТЭ в области использования ядерных методов для

обеспечения устойчивого производства продуктов питания и продовольственной безопасности, за последние 50 лет создали 76 сортов сельскохозяйственных культур (см. вставку «Наука»).

«Плодотворное сотрудничество между МАГАТЭ, ФАО и ИЗК будет продолжаться и будет способствовать выведению улучшенных сортов перца, томата и картофеля с высокой урожайностью, повышенной пищевой ценностью и способностью адаптироваться к изменению климата, что позволит укрепить продовольственную безопасность в масштабах всей страны», — говорит Фатма Сарсу, селекционер и генетик из Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях.

## НАУКА

### Что такое мутационная селекция?

В основе мутационной селекции лежит использование ядерных технологий, например рентгеновского излучения или гамма-излучения, в целях индуцирования мутационных процессов для улучшения сельскохозяйственных культур. Семена или клетки растения подвергаются воздействию излучения, после чего ученые извлекают мутировавшие в результате этого новые ростки или семена и помещают их в стерильную среду для прорастания. По мере их развития осуществляется

мониторинг и селекция растений с учетом таких характеристик, как интенсивность роста, окраска, питательная ценность или жаровыносливость. Отобранные в результате селекции образцы подвергаются дальнейшему мониторингу на протяжении нескольких поколений, после чего формируются новые линии и сорта растений.

Для ускорения естественных эволюционных процессов применяются ядерные методы, и в результате этой работы появляются сельскохозяйственные культуры с улучшенными характеристиками.

В настоящее время в Болгарии имеется 18 гамма-облучательных установок, что позволяет стране продолжать работу, направленную на обеспечение устойчивого производства продовольствия для внутреннего потребления и поддержание объемов экспорта на высоком уровне. Полученные с помощью имеющихся в стране облучательных установок мутантные линии и сорта, обладающие желаемыми характеристиками, поступают на хранение в национальный генетический банк, в котором хранится порядка 60 000 образцов семян, либо передаются в исследовательские институты по всей стране для дальнейшего использования. В рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ и проектов координированных исследований, осуществлявшихся в Болгарии на протяжении последних 50 лет, были созданы 76 сортов сельскохозяйственных культур. Они также занесены в Базу данных ФАО/МАГАТЭ по мутантным сортам.

— Карли Уиллис

## При поддержке МАГАТЭ в Китае открыта крупнейшая в мире установка по очистке сточных вод при помощи электронно-пучковых технологий

В июне 2020 года в Китае была открыта крупнейшая в мире установка по очистке сточных вод с использованием электронно-пучковой технологии, способная обрабатывать 30 млн литров промышленных сточных вод в сутки. Основанный на технологиях, которые МАГАТЭ передавала начиная с 2010 года, этот процесс очистки позволит ежегодно экономить 4,5 млрд литров пресной воды — достаточное количество, для того чтобы напоить 100 000 человек в год.

Работающая при трикотажной фабрике «Гуаньхуа» в Южном Китае, являющейся крупнейшим в мире импортером гребенной пряжи, установка использует электронно-пучковые технологии для очистки воды, загрязненной остатками промышленных красителей, молекулы которых нельзя разложить при помощи

бактерий или химических веществ. Но с помощью электронно-пучковых технологий можно разрушать эти длинные и сложные молекулы, находящиеся в сточных водах, и тогда очищенная вода может использоваться повторно.

В текстильной промышленности Китая, который является крупнейшим в мире производителем текстильных изделий, для очистки сточных вод традиционно используются химические вещества. Однако по мере ужесточения политики в области охраны окружающей среды эта отрасль все активнее прибегает к электронно-пучковым технологиям, которые обеспечивают крайне эффективный и экологически чистый метод очистки сточных вод.

«Обычно такие сточные воды очищаются с помощью химических процессов, в

результате которых появляются вторичные отходы, — объясняет Хан Пум Су, специалист МАГАТЭ по радиационной химии. — Обработка с использованием электронно-пучковых технологий является экологически чистым и экономически эффективным методом очистки сточных вод, поскольку в результате ее применения сокращаются время обработки и расходы на химические вещества, а также не образуются вторичные отходы».

Все началось с проекта технического сотрудничества МАГАТЭ в 2012 году, в рамках которого китайские ученые разработали программу очистки сточных вод с использованием электронных пучков. Помощь МАГАТЭ включала в себя стажировки на действующих установках в других странах, национальные учебные курсы и консультации приглашенных





## Семь ускорителей электронов обрабатывают образовавшиеся после печатания и окрашивания тканей сточные воды на трикотажной фабрике «Гуаньхуа».

(Фото: Институт ядерных и новых энергетических технологий, Университет Цинхуа)

экспертов, которые готовили рекомендации по разработке проекта.

«При поддержке МАГАТЭ я прошел стажировку в 2013 году в Венгрии, — рассказывает Хэ Шицзюнь, профессор Института ядерных и новых энергетических технологий Университета Цинхуа. — Работа в международной лаборатории и участие в учебных курсах непосредственно помогает в текущей работе, которой мы занимаемся».

В 2017 году в расположенном в 30 километрах к юго-западу от Шанхая городе Цзиньхуа была сооружена экспериментальная установка, способная очищать в сутки 1,5 млн литров сточных вод, поступающих с близлежащей текстильной фабрики. Через два года после запуска этого демонстрационного проекта началось строительство коммерческой станции очистки сточных вод на трикотажной фабрике «Гуаньхуа». Новая станция по очистке сточных вод, которую построила компания «CGN Nuclear Technology Development Company» (CGNNT), являющаяся дочерним предприятием компании «China General Nuclear Power Corporation» (CGN), обрабатывает более 30 млн литров сточных вод в сутки с помощью семи ускорителей электронов. «Более 70% сточных вод, которые проходят через этот процесс очистки, можно повторно использовать на фабрике, тогда как раньше уровень повторного использования составлял только 50%. Это означает, что для работы

фабрики нужно забирать меньше воды непосредственно из близлежащей реки, что позволяет ежегодно экономить 4,5 млрд литров воды», — объясняет Ху Дунмин генеральный директор CGNNT.

В целях внедрения этой технологии очистки увеличивающихся объемов сточных вод в связи с ростом населения и развитием промышленности и сельского хозяйства информация об истории успеха этого проекта была широко распространена среди других отраслей экономики Китая. «У нас в Китае сбрасывается большое количество сточных вод, и их трудно обрабатывать посредством традиционных технологий. Но с помощью электронных пучков мы можем значительно улучшить степень обработки сточных вод для повторного использования», — говорит Хэ. Другие демонстрационные проекты осуществляются в провинциях Синьцзян, Хубэй и Гуанси. «Мы работаем над внедрением электронно-пучковых технологий в самых разных отраслях промышленности Китая», — добавляет Хэ.

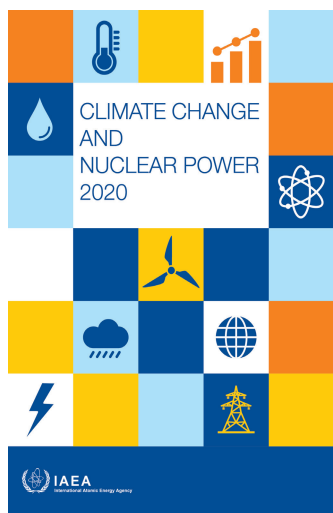
### Принцип работы

Текстильная промышленность потребляет огромное количество воды и химических веществ, таких как красители, крахмалы, кислоты, соли и детергенты, которые полностью сбрасываются после использования в процессе производства. «Радиационные методы с использованием электронно-пучковых технологий

могут разлагать большое количество загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах, и удалять эти сложные загрязнители», — отмечает Хан. В ходе процесса очистки ускоритель электронов создает электронный пучок, способный ионизировать молекулы воды, тем самым генерируя активные радикалы, которые вступают в реакцию с вредными органическими загрязнителями, содержащимися в сточных водах. Затем эти загрязняющие вещества разлагаются и превращаются в более простые химические соединения, которые легче поддаются обработке традиционными методами.

«Этот проект служит ярким примером того, как даже небольшая поддержка в рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ и проектов координированных исследований может способствовать появлению в стране устойчивого промышленного производства», — говорит Гашо Вольде, который управляет проектами технического сотрудничества МАГАТЭ в Китае. — В результате появляются более чистые и эффективные производственные процессы, что ведет к ощутимым положительным социально-экономическим изменениям на национальном уровне».

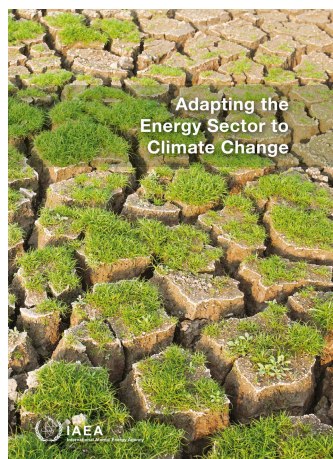
— Карли Уиллис



### Изменение климата и ядерная энергетика в 2020 году

В публикации приводятся последние данные о текущем состоянии ядерной энергетике и ее перспективном вкладе наряду с другими низкоуглеродными источниками энергии в реализацию амбициозных стратегий смягчения последствий изменения климата, которые позволят ограничить глобальное потепление 1,5°C в соответствии с Парижским соглашением 2016 года. С 2000 года МАГАТЭ регулярно публикует такую информацию и аналитические материалы для оказания помощи тем государствам-членам, которые решили включить ядерную энергетiku в свою энергетическую систему, а также тем, которые прорабатывают другие стратегии. В центре внимания публикации 2020 года — значительный потенциал интегрированной в низкоуглеродную энергетическую систему ядерной энергетике в плане содействия достижению целевого показателя на уровне 1,5°C в вопросе смягчения последствий изменения климата, а также проблемы в связи с реализацией этого потенциала. Проанализированы энергетические системы и рыночные факторы, влияющие на переход к низкоуглеродным энергетическим системам. В издании также обрисованы условия, которые необходимы для реализации масштабного увеличения мощностей для быстрой декарбонизации глобальной энергетической системы в соответствии с ограничением глобального потепления 1,5°C.

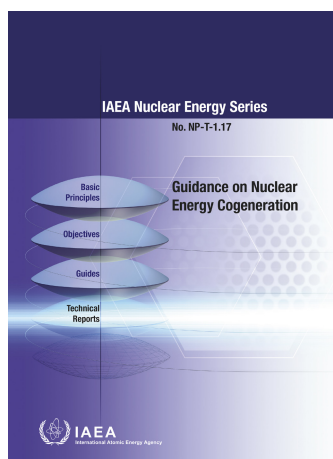
Non-serial Publications; ISBN:978-92-0-115020-2; на английском языке; 28,00 евро; 2020 год



### Адаптация энергетического сектора к изменению климата

В публикации рассматриваются различные виды воздействия на энергетический сектор в результате постепенного изменения климата и экстремальных погодных явлений, а также возможные пути их преодоления. Проанализированы все элементы цепочки поставок: ресурсная база, добыча и транспортировка ископаемых энергетических ресурсов, производство, передача и распределение электроэнергии. В публикации приведены три предметных исследования уязвимости энергетического сектора на примере Аргентины, Пакистана и Словении.

IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.17; ISBN: 978-92-0-104119-7; на английском языке; 32,00 евро; 2019 год



### Руководящие материалы по когенерации с использованием ядерной энергии

В публикации дано краткое описание преимуществ, опыта и перспективного планирования внедрения ядерной когенерации. В ней также освещаются некоторые демонстрационные проекты, которые были разработаны ранее для некоторых отраслей промышленности, и дано описание технических концепций для комбинированных ядерно-промышленных комплексов. Эта публикация может заинтересовать пользователей в образовательных и промышленных кругах, а также в государственных и общественных учреждениях, которым требуется базовая информация о различных аспектах использования ядерной энергии для целей когенерации.

IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.17; ISBN: 978-92-0-104119-7; на английском языке; 32,00 евро; 2019 год

За дополнительной информацией и для заказа книг  
просьба обращаться в:

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







# SCIENTIFIC FORUM

РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В БОРЬБЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА



**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии  
*Атом для мира и развития*

2020

#Atoms4Climate

Читайте этот и другие выпуски Бюллетеня МАГАТЭ по адресу  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

С более подробной информацией о МАГАТЭ и его работе можно ознакомиться  
на сайте [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

или на наших страницах

