

# БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Флагманская публикация МАГАТЭ | Сентябрь 2023 года | [www.iaea.org/ru/bulletin](http://www.iaea.org/ru/bulletin)



## ЯДЕРНЫЕ ИННОВАЦИИ ДЛЯ МИРА БЕЗ ВЫБРОСОВ

Иновации на службе непрерывной генерации низкоуглеродной энергии: потенциал гибридных энергетических систем, стр. 6

Декарбонизация промышленности с помощью малых реакторов и микрореакторов, стр. 12

Когда ядерные отходы – не бремя, а актив, стр. 20



## БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации  
и коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

А/я 100, 1400 Вена, Австрия

Тел.: (43-1) 2600-0

[iaebulletin@iaea.org](mailto:iaebulletin@iaea.org)

Ответственный редактор: Джоанн Лю

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по адресу:

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

Выдержки из материалов МАГАТЭ, содержащихся в Бюллетене МАГАТЭ, могут свободно использоваться

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

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

Обложка: 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.

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

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

Нормы безопасности МАГАТЭ устанавливают основополагающие принципы, требования и рекомендации, касающиеся обеспечения ядерной безопасности, и отражают международный консенсус в отношении того, что можно считать высоким уровнем безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности МАГАТЭ разрабатывались для всех типов ядерных установок и деятельности, преследующих мирные цели, а также для защитных мер, необходимых для снижения существующих рисков облучения.

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

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

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

# Инновации как способ построить мир без выбросов

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

**М**ы все чаще сталкиваемся с последствиями изменения климата и все лучше понимаем насущную необходимость устойчивого развития, поэтому ядерная энергетика получает все большее признание как надежное решение, помогающее нам преобразовать мир и достичь нулевого уровня выбросов.

Для достижения глобальных климатических целей мощность ядерной энергетики должна увеличиться более чем в два раза по сравнению с текущим уровнем. Однако имеющихся технологий в области энергетике будет недостаточно. Чтобы достичь нулевого уровня выбросов к 2050 году, необходимо сократить выбросы углекислого газа, причем половина этого сокращения должна достигаться за счет технологий, еще не получивших коммерческого применения. Именно поэтому так важны инновации в сфере техники. Эксперты ядерной отрасли сходятся во мнении, что при внедрении ядерных реакторов следующего поколения ключевую роль будут играть наращивание производства и мощностей по выпуску топлива, а также гармонизация подходов к регулированию.

Мир столкнулся с насущной необходимостью снижения выбросов и повышения энергетической безопасности, и в этой связи нельзя недооценивать значение ядерной энергетике и инноваций, которые помогут нам в полной мере задействовать ее потенциал: от разработки новых конструкций реакторов повышенной эффективности до применения искусственного интеллекта в решениях по управлению жизненным циклом атомных электростанций. Помимо производства электроэнергии, ядерные реакторы уже используются для опреснения морской воды, и существует значительный потенциал в сфере других неэлектрических применений. В этом выпуске Бюллетеня приводится обзор новых технологий с комментариями ведущих экспертов.

Растет интерес к малым модульным реакторам (ММР) — усовершенствованным ядерным реакторам, мощность которых обычно составляет до 300 МВт (эл). Ожидается, что ММР позволят расширить доступ к ядерной энергии по всему миру, поскольку они лучше подходят для маломощных электросетей и их проще использовать в связке с возобновляемыми источниками энергии.

Благодаря этому они могут применяться в развивающихся странах, многие из которых интересуются этой технологией и хотят больше узнать о ней. В 18 странах на различных стадиях осуществления находится более 80 проектов ММР: энергоблоки на основе ММР уже работают в Китае и Российской Федерации, идет строительство одного ММР в Аргентине. Платформа МАГАТЭ по малым модульным реакторам и их применениям, а также Инициатива по гармонизации и стандартизации в ядерной области МАГАТЭ играют важную роль, содействуя внедрению безопасных и надежных ММР во всем мире.

На прошлогодней Конференции Объединенных Наций по изменению климата (КС-27) я дал старт инициативе Atoms4NetZero. Благодаря этой инициативе страны и другие заинтересованные стороны получают технические знания и научные данные о потенциале ядерной энергии для декарбонизации производства электроэнергии, а также промышленных и транспортных отраслей, уровень выбросов в которых сложно уменьшить. Инициатива позволяет моделировать сценарии достижения нулевого уровня выбросов парниковых газов к 2050 году с помощью ядерной энергетике.

Совершенно ясно, что достичь глобальных целей в области сокращения выбросов можно только с помощью ядерной энергии. Успех будет зависеть от продолжения эксплуатации многих существующих станций, строительства большого числа крупных традиционных АЭС и внедрения усовершенствованных реакторов, включая ММР. Это потребует дальнейших инноваций и сотрудничества на всех этапах топливного цикла. МАГАТЭ продолжит играть свою уникальную роль, содействуя обоим направлениям, чтобы ядерная энергетика помогла нам построить процветающий мир и сохранить планету.



Фото: МАГАТЭ







## 1 Инновации как способ построить мир без выбросов



## 4 Что такое нулевой уровень выбросов? Какую роль играют ядерная энергетика и инновации?



## 6 Инновации на службе непрерывной генерации низкоуглеродной энергии: потенциал гибридных энергетических систем



## 8 Декарбонизация сталеварения с помощью водорода, производимого с использованием ядерной энергии



## 10 Использование ядерной энергетики для опреснения позволит обеспечить безопасность запасов пресной воды



## 12 Декарбонизация промышленности с помощью малых реакторов и микрореакторов

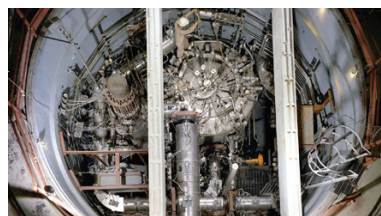


## 14 Перспективы использования аддитивных технологий в конструкциях усовершенствованных ядерных реакторов



**16 Топливо будущего:**

создание цепей поставок топлива для ММП и усовершенствованных реакторов

**18 Повышение эффективности производства ядерной энергии с помощью искусственного интеллекта****20 Когда ядерные отходы — не бремя, а актив****22 Долгосрочный потенциал тория в ядерной энергетике****24 Регулирование инновационных конструкций реакторов****26 Проверка отработавшего ядерного топлива в глубинных геологических хранилищах****ИНТЕРВЬЮ**

---

**28 Как формируется отношение к ядерной энергии****СЕГОДНЯ В МАГАТЭ**

---

**30 Новости МАГАТЭ****32 Публикации**

# Что такое нулевой уровень выбросов? Какую роль играют ядерная энергетика и инновации?

Джоанн Лю

Одной из целей на пути к устойчивому и независимому от изменения климата будущему во всем мире стало достижение нулевого уровня выбросов парниковых газов (ПГ). Оно предполагает использование технологий без выделения ПГ, таких как возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика и ядерная энергетика, либо сохранение некоторого объема выбросов и удаление при помощи технологии улавливания углерода или других технологий такого же объема выбросов из атмосферы.

«Специалисты по климатическим исследованиям сходятся во мнении, что для ограничения глобального потепления в пределах 1,5 градусов к концу века энергетическая система — основной источник выбросов парниковых газов — должна стать углеродно-нейтральной.

Это предполагает отсутствие выбросов, то есть их нулевой уровень», — объясняет руководитель Секции планирования и экономических исследований МАГАТЭ Анри Пайер. Принятое 196 странами в 2015 году Парижское соглашение ставит целью ограничить глобальное потепление отметкой ниже 2 градусов Цельсия, предпочтительно 1,5 градусов Цельсия.

В научной среде также сложился консенсус относительно того, что изменение климата обусловлено главным образом деятельностью человека. Сжигание ископаемого топлива, расчистка земель от растительности и вырубка лесов, включая мангровые заросли, приводят к образованию ПГ, таких как углекислый газ и метан, которые задерживают тепло и вызывают повышение температуры. Участвовавшие экстремальные погодные явления, повышение уровня моря и глобальное изменение температуры свидетельствуют о необходимости скорейшего перехода к углеродной нейтральности.

Страны всего мира взяли на себя обязательство сократить выбросы парниковых газов, чтобы сдержать последствия выбросов и решить проблему климатического кризиса. «Для достижения нулевого уровня выбросов необходим многосторонний подход, который включает как снижение объемов потребления ископаемых видов топлива, так и расширение использования чистых источников энергии», — отмечает Пайер. Согласно изданию «World Energy Outlook 2022» («Обзор мировой энергетики — 2022») Международного энергетического агентства (МЭА), десятую часть мировой электроэнергии





и четверть всей низкоуглеродной энергии обеспечивает ядерная энергетика.

«Ядерная энергетика становится ключевым элементом перехода к чистой энергетике благодаря таким широко известным качествам, как низкий углеродный след и надежное производство электроэнергии», — говорит Пайер.

## Новаторский путь вперед

Решающее значение для освоения в полном объеме потенциала ядерной энергетике в целях достижения нулевого уровня выбросов будут иметь инновации в атомной промышленности. Наряду с новыми модульными методами производства на рынок выходят реакторы новой конструкции, внедрение которых сопряжено как с возможностями, так и с определенными трудностями. Инициатива МАГАТЭ по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО) направлена на поиск точек соприкосновения между регулирующими органами, конструкторами, операторами и другими заинтересованными сторонами для содействия развертыванию этих современных реакторов, включая малые модульные реакторы, с соблюдением всех требований ядерной и физической ядерной безопасности.


 NUCLEAR  
 HARMONIZATION &  
 STANDARDIZATION  
 INITIATIVE

Вместе с тем перспективы развития ядерной энергетике зависят не только от инноваций в реакторных технологиях, но и от производственных процессов, надежности поставок топлива, решения проблемы отработавшего топлива и других факторов. В отрасли уже существуют примеры использования инновационных технологий, таких как искусственный интеллект и аддитивное производство. Такие технологии подготавливают почву для внедрения безопасных и устойчивых решений, которые будут способствовать снижению затрат и улучшению экономических показателей эксплуатации атомных электростанций.

Тогда как ветер и солнце являются источниками энергии переменной мощности и зависят от погоды и времени суток, атомные электростанции, напротив,

позволяют регулировать выработку электроэнергии с учетом спроса. Гибридные энергетические системы, сочетающие ядерную энергетике и возобновляемые источники энергии, способны как обеспечивать гибкость энергосистем, так и снижать выбросы парниковых газов при оптимальном использовании финансовых ресурсов. Кроме того, расширение использования ядерной энергетике для применений, не связанных с выработкой электроэнергии, таких как централизованное отопление, производство водорода, опреснение и выработка тепла для промышленных процессов, открывает возможности для снижения выбросов.

МАЭ отмечает, что ядерная энергетика открывает широкие возможности по декарбонизации электроснабжения в интересах обеспечения нулевого уровня выбросов, а в случае снижения выработки ядерной энергетике переход к нулевому уровню выбросов будет намного более затратным и труднодостижимым. Чтобы использовать возможности ядерной энергии при переходе к энергетике с нулевым уровнем выбросов, МАГАТЭ выдвинуло инициативу Atoms4NetZero. Эта инициатива призвана обеспечить директивные органы и ответственных за принятие решений достоверной информацией о потенциальном пути развития ядерной энергетике как надежной основы для перехода к чистой, доступной, устойчивой и более безопасной энергетике. По состоянию на август 2023 года в 31 стране мира эксплуатировалось 410 ядерных энергетических реакторов общей мощностью более 368 000 МВт (эл.). Кроме того, ведется строительство еще 57 реакторов в 17 странах, причем в трех из них такие реакторы сооружаются впервые.

Рост интереса к ядерной энергетике в мире отчетливо проявился в ходе Генеральной конференции МАГАТЭ в 2022 году. Представители рекордного числа стран (51) рассказали о роли ядерной энергетике в достижении целей по смягчению последствий изменения климата, обеспечению энергетической безопасности и устойчивому развитию.

Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси заявил в обращении к участникам Конференции: «Климатический и энергетический кризисы побуждают все больше стран задуматься об использовании ядерной энергетике в качестве одного из средств решения проблемы, а опросы общественного мнения свидетельствуют о росте одобрения этой технологии во всем мире. Уникальные свойства ядерной энергетике как безопасного, надежного и эффективного источника энергии имеют решающее значение для глобального перехода к “зеленой” энергетике».



# Инновации на службе непрерывной генерации низкоуглеродной энергии:

## потенциал гибридных энергетических систем

Эмма Миджли

Ключом к снижению выбросов в энергетическом секторе является внедрение всех низкоуглеродных источников энергии. В энергосетях растет доля систем на основе возобновляемых источников энергии с прерывистой генерацией, поэтому для обеспечения круглосуточного снабжения энергией с низким уровнем выбросов углерода в гибридных энергетических системах используются атомные электростанции, позволяющие компенсировать нехватку электроэнергии, производимой за счет энергии солнца и ветра.

Ядерная энергетика, допускающая диспетчерское управление генерацией энергии в зависимости от меняющегося спроса на нее, позволяет вести круглосуточное и бесперебойное производство огромного количества низкоуглеродной электроэнергии. Благодаря этой стабильности ядерная энергия обычно используется для обеспечения базовой нагрузки, поскольку генерация энергии ведется непрерывно, а ее выдаваемая мощность не меняется или меняется незначительно. Ядерная энергия в сочетании с возобновляемыми источниками энергии способствует также стабильности электросетей, нивелируя колебания в выработке энергии из возобновляемых источников. Например, производительность некоторых атомных электростанций в Соединенных Штатах Америки регулярно корректируется примерно на 10–15 процентов с учетом общих колебаний спроса на электроэнергию и прерывистой генерации энергии из возобновляемых источников.

«Гибридные энергосистемы на основе ядерной и возобновляемой энергии несут в себе мощный синергетический эффект, сочетая ядерную энергию, которая надежна и способна обеспечивать базовую нагрузку, с возобновляемыми источниками энергии с прерывистой генерацией. Такой комплексный подход

является ключом к созданию в будущем невосприимчивых к внешним воздействиям низкоуглеродных источников энергии, которые позволят удовлетворить растущий спрос на нее и одновременно смягчить последствия изменения климата», — объясняет руководитель группы МАГАТЭ по разработке технологий водяных реакторов Татьяна Евремович.

Для того чтобы декарбонизировать каждый киловатт-час потребляемой энергии, необходимо использовать все безуглеродные технологии. Потенциал синергии между этими энергоресурсами использован еще не полностью, и эксперты изучают стратегические преимущества прямой интеграции этих альтернативных систем. В гибридных энергосистемах на основе ядерной и возобновляемой энергии предполагается связать эти источники энергии, задействовав все их преимущества. Цель — обеспечить надежное и устойчивое электроснабжение сети, одновременно создав низкоуглеродные источники энергии для различных секторов энергопотребления.

### Связанные системы

Гибридные системы включают несколько источников генерируемой энергии, которые задействованы двумя различными способами. Первый способ — когда системы связаны слабо, а вырабатываемая мощность из различных источников в них объединяется для повышения общей производительности и надежности системы. Второй — который еще предстоит внедрить в гибридных энергосистемах на основе ядерной и возобновляемой энергии — предполагает создание более интегрированной, тесно связанной системы. В системах такого типа используются уникальные сильные стороны каждого компонента для оптимизации производства энергии и достижения экологических преимуществ.

«Переход к более интегрированным энергетическим системам потенциально позволит постоянно удовлетворять потребности энергосетей, независимо от источника генерируемой энергии, будь то ядерная энергия, энергия ветра, воды, солнца, биомассы или геотермальная энергия. Для эффективного регулирования колебаний общего спроса на мощность в идеале в таких системах должно быть возможно накапливать энергию, — говорит Татьяна Евремович. — Кроме того, если учитывать углеродные сборы в экономической оценке внедрения гибридных энергетических систем на основе ядерной и возобновляемой энергии, то их эксплуатационные затраты потенциально могут быть даже ниже, чем у традиционных ископаемых источников энергии».

В будущем тесно связанные гибридные энергосистемы будут проектироваться таким образом, чтобы максимально использовать синергию и оптимизировать выработку электроэнергии в зависимости от текущих условий. Например, возобновляемые источники могут быть более тесно интегрированы с атомными электростанциями, чтобы выдавать дополнительную мощность во время пикового спроса, компенсируя неспособность ядерной энергетики быстро изменять выдаваемую мощность. Или, например, если интегрировать ядерные энергетические объекты с гидроэлектрическими системами, то избыточную энергию, вырабатываемую ядерными реакторами в непиковые часы, можно использовать для закачки воды в напорные емкости, с которых впоследствии она может подаваться на турбины гидроэлектростанции для приведения их в движение в периоды высокого спроса.

Кроме того, гибридные энергетические системы на основе ядерной и возобновляемой энергии могут использоваться для контроля и координации выработки электроэнергии в удаленных районах или в автономном режиме, чтобы обеспечить электроснабжение критически важных объектов инфраструктуры, таких как больницы или транспортные склады. Айдахская национальная лаборатория недавно продемонстрировала автономную систему «микросеть в коробке». В этой системе малый модульный реактор работает в комплексе с установкой по производству электроэнергии за счет энергии ветра, солнца или воды, чтобы обеспечивать электроснабжение в случае его отключения или возникновения масштабных перебоев.

## Роль МАГАТЭ

Недавно МАГАТЭ приступило к осуществлению проекта координированных исследований по технической оценке и оптимизации гибридных энергетических систем на основе ядерной и возобновляемой энергии. Цель проекта — усовершенствовать методики оценки роли, которую гибридные энергосистемы на основе ядерной и возобновляемой энергии могут играть в современных и будущих энергетических системах, а также выявить возможности, способствовать международному сотрудничеству и обмену знаниями в этой области, чтобы помочь странам достичь нулевого уровня выбросов. Одной из стран — участниц проекта является Пакистан. «Принимая во внимание потребности Пакистана в энергии и учитывая глобальные проблемы в области экологии, стратегия интеграции ядерной и возобновляемой энергии представляется крайне многообещающей», — говорит Хасиб ур-Рехман, главный инженер и доцент Пакистанского института инженерных и прикладных наук (PIEAS). — Солнечного света и ветра у нас много, а ядерная энергия обеспечивает стабильную основу. Благодаря такой комбинации снижаются выбросы и повышается энергетическая безопасность».

Совместно с центром сотрудничества МАГАТЭ в PIEAS Агентство разработало платформу «Центр онлайн-тренажеров для отработки отдельных задач на АЭС» (HOPS). HOPS включает два тренажера гибридных энергетических систем: на основе ядерной энергии и энергии ветра, а также на основе ядерной и солнечной энергии. Эти онлайн-тренажеры позволяют пользователям познакомиться с эксплуатационными характеристиками систем и подсистем АЭС. Тренажеры и соответствующая документация распространяются по запросу бесплатно среди специалистов ядерной отрасли всего мира.

**Интегрированные энергетические системы потенциально могут постоянно удовлетворять потребности энергосетей, независимо от источника генерируемой энергии, будь то ядерная энергетика или возобновляемые источники.**

(Изображение: МАГАТЭ)



# Декарбонизация сталеварения с помощью водорода, производимого с использованием ядерной энергии

Мария Платонова

На производство стали приходится более 7 процентов мировых выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). В ближайшие десятилетия этот процент будет расти вместе со спросом на сталь, которая крайне востребована в различных отраслях: от энергетики и транспорта до строительства и производства бытовой техники. Однако благодаря ядерной энергии производство стали в будущем можно будет вывести на нулевой уровень выбросов.

Ежегодно в мире производится около двух миллиардов тонн стали. По прогнозам Международного энергетического агентства, к 2050 году спрос на сталь вырастет более чем на треть, в основном в развивающихся странах. Все больше мировых компаний ищут способы декарбонизации энергоёмких промышленных процессов в этой отрасли.

В сталелитейной промышленности широко применяется коксующийся уголь, который служит топливом для доменных печей и восстановительным агентом для получения стали, в процессе чего выделяется большое количество  $\text{CO}_2$ . Однако сталь можно получить в ходе так называемого прямого восстановления железа, при котором в реакцию с железной рудой без ее плавления вступает водород, с выделением водяного пара и без выхода  $\text{CO}_2$ .

«Для производства “зеленой” стали требуются огромные объемы водорода. Традиционно для производства водорода почти всегда использовалось ископаемое топливо, поэтому поиск способа декарбонизации производства водорода в необходимых количествах будет одной из самых сложных задач, — отмечает технический руководитель по неэлектрическим применениям МАГАТЭ Франческо Ганда. — Производство водорода с использованием ядерной энергии, которое характеризуется нулевым уровнем выбросов углекислого газа, может кардинально изменить ситуацию в отрасли, поскольку ядерная энергетика способна круглосуточно давать достаточное количество тепла и электроэнергии для производства необходимого количества водорода. Это может помочь добиться огромных успехов в переходе к экологически чистой энергетике».

Ядерные энергетические реакторы, соединенные с установкой по производству водорода, могут эффективно производить как энергию, так и водород, образуя систему когенерации, оснащенную компонентами для электролиза или термохимических процессов. Электролиз — это процесс выделения водорода и кислорода из молекул воды с помощью постоянного электрического тока.

Электролиз воды происходит при относительно низких температурах — менее 100 градусов Цельсия, в то время как электролиз водяного пара происходит при гораздо более высоких температурах — от 700 до 800 градусов Цельсия — и требует меньше электроэнергии, чем электролиз воды. При электролизе воды для отделения водорода от кислорода используется электричество. Эта технология доступна на рынке уже несколько десятилетий. В основе высокотемпературного электролиза лежит тот же принцип, но используется вода в виде пара, благодаря чему уменьшается количество необходимой электроэнергии.

Достижения в области технологий электролизеров позволили сделать производство водорода на основе обычных ядерных энергетических реакторов более эффективным и дешевым. По крайней мере на одной атомной электростанции в Соединенных Штатах Америки — «Прейри-Айленд» в Миннесоте — установлен высокотемпературный электролизер и благодаря использованию тепла реактора снижается потребление электроэнергии и, соответственно, стоимость производства водорода с использованием ядерной энергии.

«В процессе высокотемпературного твердооксидного электролиза может быть задействована тепловая энергия пара, вырабатываемого на атомной электростанции, благодаря чему достигается крайне высокий КПД электролизера, — говорит Ахил Батеджа, директор по развитию водородного бизнеса компании “Блум энержи”, которая производит твердооксидные топливные элементы для производства энергии. — Поскольку основную часть расходов, связанных с получением водорода электролизом, составляют затраты на электроэнергию, с точки зрения экономики целесообразнее всего использовать мощности АЭС для производства низкоуглеродного водорода».

## Роль МАГАТЭ

МАГАТЭ помогает странам, содействуя исследованиям в области использования существующего ядерного потенциала для производства водорода, в том числе в рамках проектов координированных исследований. Кроме того, чтобы помочь странам в оценке, планировании и разработке стратегии развития проектов по производству водорода с использованием ядерной энергии, МАГАТЭ организует технические совещания, а также разработало Программу экономической оценки водорода,





**Использование низкоуглеродной ядерной энергии для производства водорода может способствовать декарбонизации сталелитейной промышленности.** (Фото: Adobe Stock)

позволяющую определить технико-экономическую целесообразность крупномасштабного производства водорода с использованием ядерной энергии. Кроме того, в 2022 году МАГАТЭ выступило с инициативой по разработке дорожной карты коммерческого внедрения производства водорода с использованием ядерной энергии и запустило электронный учебный курс, посвященный производству водорода с помощью ядерной когенерации.

«В ряде стран мира исследуются и испытываются варианты использования ядерной энергии для

производства экологически чистого водорода, в том числе и для целей сталелитейной отрасли», — говорит директор Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ Алин де Клуазо. — Учитывая появление новых и более эффективных технологий электролизеров, а также внедрение в будущем технологий усовершенствованных реакторов, таких как высокотемпературные реакторы, ядерная энергия вполне может внести важнейший вклад в производство экологически чистого водорода и декарбонизацию производства стали и других отраслей промышленности».

# Использование ядерной энергетики для опреснения позволит обеспечить безопасность запасов пресной воды

Омар Юсуф

**В** центре климатического кризиса — вода. Повышение уровня моря, участвовавшие наводнения и засухи, сокращение ледникового и снежного покрова — все эти явления, как ожидается, затруднят доступ к источникам питьевой воды. Если не будут решены задачи по смягчению этих и других последствий изменения климата, нехватка воды будет создавать все большую угрозу качеству жизни на земле. Спрос на пресную воду для питья и промышленного использования не ограничивается странами, которые не имеют выхода к морю, и сказывается также на малых островных развивающихся государствах и странах с большими прибрежными территориями.

Решение этой проблемы могут предложить атомные электростанции, которые при этом выполняют двойную задачу — производят низкоуглеродную электроэнергию и перерабатывают морскую воду в пресную. «Неэлектрические применения на основе ядерной энергии, такие как опреснение, предлагают устойчивые решения для целого ряда связанных с интенсивным использованием водных ресурсов задач, с которыми предстоит справиться нынешнему и будущим поколениям, — от удовлетворения потребностей миллионов домохозяйств и промышленного использования пресной воды до сельского хозяйства и животноводства», — говорит технический руководитель по неэлектрическим применениям в МАГАТЭ Франческо Ганда.

МАГАТЭ на протяжении почти 30 лет содействует усилиям стран по улучшению водоснабжения, качества и доступа к чистой воде при помощи ядерного опреснения — процесса, при котором вырабатываемые атомной электростанцией тепло и электроэнергия используются для удаления из морской воды солей и минералов посредством дистилляции или мембранного разделения, в основном методом обратного осмоса. По сравнению с другими методами опреснения, например, на основе ископаемых видов топлива, опреснение с использованием ядерной энергии менее углеродоемко и при этом экономически конкурентоспособно. Наибольшим опытом в области ядерного опреснения обладают Индия, Казахстан и Япония, у которых за плечами сотни реакторо-лет успешной работы. Опреснение — практичное и экономически эффективное средство, которое открывает путь к питьевой воде для тысяч населенных пунктов. «АЭС могли бы помочь удовлетворить растущий спрос на питьевую воду и дать надежду тем районам во многих засушливых и полусушливых зонах, которые испытывают острую нехватку воды», — отмечает Ганда.

В 1996 году МАГАТЭ создало свою первую консультативную группу по ядерному опреснению, которая помогла активизировать обсуждение деятельности по ядерному опреснению и предоставила странам площадку для обмена опытом в области использования атомных электростанций для целей опреснения воды. С тех пор

**Ядерные опреснительные установки, такие как на АЭС «Карачи» в Пакистане (на фото), представляют собой практичное решение для удовлетворения растущего спроса на питьевую воду.**

(Фото: Пакистанская комиссия по атомной энергии)



интерес к опреснению морской воды с использованием ядерной энергии постоянно растет во всем мире.

«Все больше стран серьезно рассматривают возможности опреснения воды с использованием ядерной энергии с целью удовлетворить свои потребности в воде и избежать при этом выбросов углерода, — говорит Ганда. — Поскольку опреснение воды — это весьма энергоемкая технология, крайне важно использовать мощные источники питания с нулевым уровнем выбросов углерода, и как раз такие предлагает ядерная энергетика. Это позволит и в будущем обеспечивать все больше людей во всем мире чистой водой и одновременно бороться с изменением климата и выполнять обязательства по достижению нулевого уровня выбросов. МАГАТЭ стоит во главе усилий по оказанию странам содействия в достижении этих целей».

Для развития и ускорения работы в этой области науки МАГАТЭ разработало и запустило две компьютерные программы, Программу экономической оценки опреснения и Программу термодинамической оптимизации опреснения. Они призваны помочь экспертам в проведении экономического, термодинамического и оптимизационного анализа различных энергоресурсов, используемых в тех или иных процессах опреснения.

## Раскрытие потенциала опреснения

В 2022 году МАГАТЭ в рамках своей программы технического сотрудничества провело в Аммане, Иордания, национальные учебные курсы в целях создания потенциала в области использования малых модульных реакторов (ММР) для опреснения воды. Посредством Платформы МАГАТЭ по малым модульным реакторам и их применениям Иорданская комиссия по атомной энергии (ИКАЭ) обратилась к МАГАТЭ с просьбой о проведении его экспертами по ядерной энергетике оценки исследования ядерного опреснения с использованием ММР.

«В Иордании опреснение рассматривается в качестве основного источника пресной воды, который позволит

удовлетворить ожидаемый спрос и сократить разрыв между водоснабжением и спросом на воду», — говорит комиссар по вопросам ядерных энергетических реакторов ИКАЭ Халид Хасауна. Исследование показало целесообразность использования в Иордании ядерной энергии для опреснения. «По сравнению с импортными источниками энергии эта технология предлагает конечным потребителям конкурентные цены на пресную воду», — добавляет Хасауна.

В октябре 2023 года МАГАТЭ проведет в Москве межрегиональные учебные курсы, посвященные изучению конструктивных особенностей проектов в области когенерации с использованием ММР и микрореакторов, которые в ходе процесса опреснения используют электроэнергию или тепло.

Аналитическое программное обеспечение, набор инструментов МАГАТЭ по ядерному опреснению и проводимое МАГАТЭ обучение дополняет серия технических публикаций, призванных ознакомить экспертов с вопросами проектирования, экономики и безопасности опреснения морской воды с использованием ядерной энергии. В целях внедрения инноваций в области опреснения МАГАТЭ реализовало также ряд соответствующих проектов координированных исследований.

МАГАТЭ продолжает работу, направленную на повышение роли ядерных реакторов, как уже эксплуатируемых, так и запланированных, в расширение доступа к чистой воде при помощи технологий низкоуглеродного ядерного опреснения с использованием ядерной энергии. В прошлом году МАГАТЭ приступило к реализации нового исследовательского проекта с целью оценить различные направления применения ядерной когенерации, включая ядерное опреснение, и изучить соображения, исходя из которых страны могли бы рассматривать ядерную когенерацию в качестве составляющей комплекса мер по борьбе с изменением климата.



## Декарбонизация промышленности с помощью малых реакторов и микрореакторов

Эмма Миджли

Представители самых разных отраслей, от производства цемента до судоходства, от нефтегазовой до сталелитейной промышленности, изучают и меняют подходы к работе, чтобы сократить выбросы вплоть до их полного отсутствия. Ключевую роль в этом начинают играть новые решения в области ядерной энергетики.

Для операций по геологоразведке и добыче газа и нефти, в том числе путем бурения и гидроразрыва пласта путем нагнетания в него жидкости, требуется огромное количество энергии, которую в настоящее время получают из ископаемого топлива. На последующих производственных циклах, таких как перегонка и переработка сырья для производства топлива, фармацевтических препаратов или удобрений, также требуются тепло и электроэнергия, которые вырабатываются в основном с использованием ископаемого топлива.

«В нефтегазовой отрасли в большинстве операций, связанных и с добычей, и с переработкой, для получения необходимой энергии сжигается ископаемое топливо, — говорит директор Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ Алин де Клуазо. — Чтобы снизить выбросы углекислого газа в результате этих процессов, в идеале электроэнергия для бурения, сжижения и переработки природного газа должна поступать из низкоуглеродных источников, таких как ядерная энергия».

Бурение и добыча нефти и газа часто ведется в отдаленной местности, где обеспечить сетевое электроснабжение этих процессов невозможно. В таких ситуациях альтернативным низкоуглеродным источником энергии могут служить микрореакторы (МР) или малые модульные реакторы (ММР).

«Компаниям, занимающимся переработкой и бурением, нужна ядерная энергия. Эти процессы генерируют значительные выбросы углекислого газа, а в 30 процентах случаев в районах, где ведется добыча или переработка, электросетей нет, — говорит Чирайю Батра, технический директор некоммерческой организации «Терра праксис», которая занимается разработкой решений по декарбонизации отраслей, уровень выбросов в которых сложно снизить, включая угольную промышленность, промышленную теплоэнергетику и тяжелый транспорт. — Сжигание дизельного топлива и газа для получения энергии, необходимой для такой деятельности, приносит отрасли коммерческие убытки и приводит к увеличению выбросов углекислого газа. Существует возможность снабжать эти процессы электроэнергией из удаленного, надежного и безуглеродного источника. Микрореакторы можно использовать почти везде, даже в море, размещая их на судах или плавучих платформах».



## Эффективная и экологически чистая эксплуатация

В отдаленных местах можно использовать как ММР, так и МР, но первые могут также найти важное применение в таких отраслях, как производство пластмасс или в других видах промышленной обработки с использованием тепла. Современные ядерные энергетические реакторы вырабатывают большое количество тепла, но 60–70 процентов этого тепла уходит в окружающую среду из-за КПД преобразования тепловой энергии пара в электроэнергию.

Один из способов повысить эффективность использования ядерной энергии и одновременно сократить выбросы углекислого газа — это использовать тепло, вырабатываемое ядерными реакторами, в промышленных или химических процессах. Министерство энергетики США осуществляет Программу демонстрации усовершенствованных реакторов, в рамках которой оказывается содействие разработке высокотемпературного газоохлаждаемого ММР для использования в комплексе по производству потребительских товаров.

Химическая компания «Доу инк.» планирует заменить на ММР газовые двигатели внутреннего сгорания и паровые двигатели в рамках своих обязательств по сокращению выбросов углерода на 30 процентов к 2030 году. Компания стремится достичь углеродной нейтральности к 2050 году.

Высокотемпературный ядерный реактор с выходной температурой 750 градусов Цельсия особенно хорошо подходит для низкоуглеродного производства олефинов — химических соединений, которые применяются в качестве исходного сырья для изготовления пластмасс, моющих средств и клеев. Предлагаемый компанией «Доу» ММР

будет размещен на существующей производственной площадке в городе Сидрифт, штат Техас, и ожидается, что выбросы углекислого газа на этой площадке сократятся примерно на 440 000 тонн в год. Этот ММР будет использоваться для выработки технологического тепла для производства, например, полиэтилена, который используется в упаковке, красках и пенопластах.

Ожидается, что строительство четырех реакторов, предусмотренных проектом, начнется в 2026 году и завершится к концу десятилетия. Этот проект «позволит компании сделать важный шаг в снижении выбросов углекислого газа и одновременно предложить нашим клиентам и обществу продукцию с более низким углеродным следом», — заявил председатель совета директоров и генеральный директор «Доу» Джим Фиттерлинг. Эта инициатива «станет наглядным примером того, что декарбонизация промышленного сектора может быть безопасной, эффективной и малозатратной», — добавил он.

МАГАТЭ помогает координировать деятельность стран мира по разработке ММР и МР, объединяя экспертов, правительства и регулирующие органы для повышения надежности и безопасности внедрения этой новой технологии. В июне 2022 года МАГАТЭ приступило к осуществлению Инициативы по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО), а в 2021 году представило Платформу по малым модульным реакторам и их применениям (Платформу ММР). ИГСЯО нацелена на продвижение гармонизации и стандартизации подходов к проектированию, регулированию и промышленному производству ММР, а на Платформе ММР можно получить помощь по всем аспектам разработки, внедрения и лицензирования ММР и надзора за ними.



**Министерство энергетики США поддерживает разработку малого модульного реактора, который будет размещен в комплексе по производству потребительских товаров в Техасе.**

(Изображение: «Доу» и «Икс-энерджи»)



# Перспективы использования аддитивных технологий в конструкциях усовершенствованных ядерных реакторов

Люси Эштон

Представьте себе напечатанные на 3D-принтере элементы активной зоны ядерного реактора или топливные таблетки. Идея создавать при помощи технологии трехмерной печати материалы, способные выдерживать экстремальные условия эксплуатации ядерного реактора, может показаться невероятной, однако по мнению многих экспертов именно эта технология нужна, чтобы ускорить внедрение усовершенствованных реакторов и приумножить вклад ядерных технологий в борьбу с изменением климата.

Трехмерная печать уже используется в некоторых отраслях промышленности. Она представляет собой разновидность аддитивного производства, при котором печать объекта происходит за счет послойного наращивания материала. В этом заключается ее отличие от субтрактивного производства, которое предполагает удаление лишнего материала путем срезания или плавления. Трехмерная печать выполняется под управлением компьютера непосредственно на основе цифрового чертежа. Технология позволяет создавать объекты сложных форм, изготовление которых ранее было затруднительным или даже невозможным. Такой метод производства быстрее, дает меньше отходов, снижает вероятность ошибки и зачастую позволяет конструкторам уменьшить вес изделий — все эти качества могут значительно снизить производственные затраты.

«Вслед за авиационной и автомобильной промышленностью ядерная отрасль в будущем сможет широко использовать технологии трехмерной печати и другие передовые технологии производства, — говорит инженер-атомщик Анинда Дутта Рай, занимающийся в МАГАТЭ вопросами передовых технологий производства. — Потенциал для этого, безусловно, есть. Первые шаги в этом направлении уже предпринимаются. Проводятся активные научные исследования и анализ с учетом существующих норм и правил проектирования ядерных объектов, при этом некоторые регулирующие органы уже успели приступить к разработке руководящих материалов для лицензиатов».

## Внедрение и испытание объектов, созданных на основе технологии 3D-печати

Первые шаги на пути внедрения технологии трехмерной печати — небольшие, медленные и осторожные, как и в большинстве новых производственных процессов.

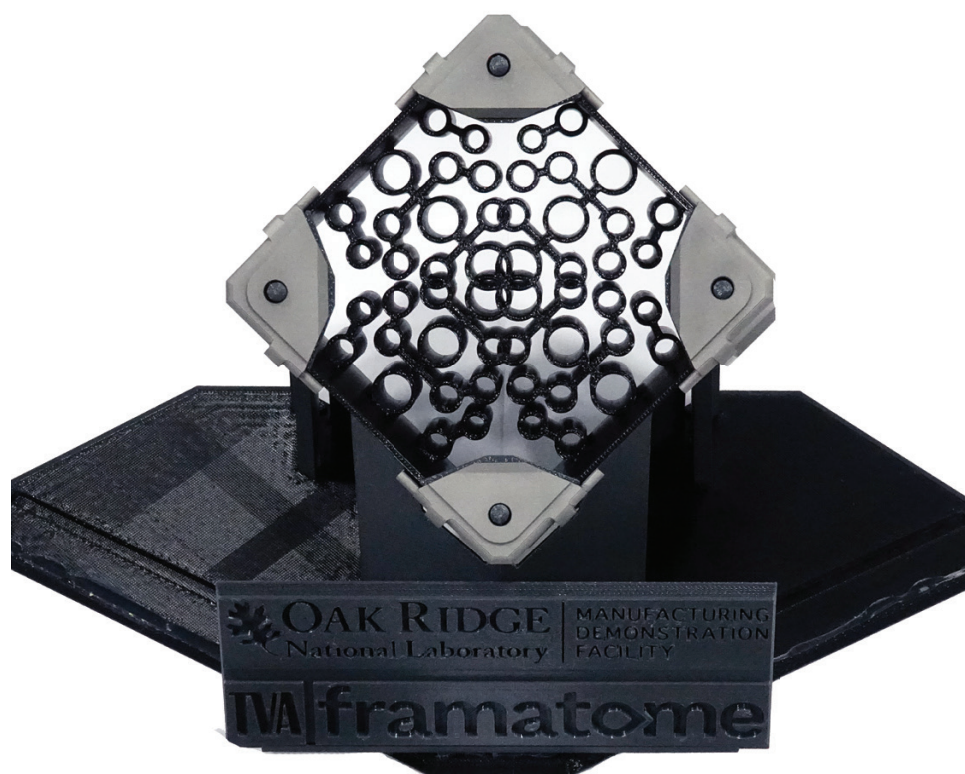
Ядерная отрасль уже знает несколько случаев первого использования технологии трехмерной печати, среди них установленная в 2017 году на реакторе в Словении крыльчатка насоса. Похожий на вентилятор или турбину элемент прогоняет воду через насос. Ввиду отсутствия первоначальных чертежей эту деталь решили изготовить с помощью 3D-печати.

В Соединенных Штатах Америки разработкой технологии трехмерной печати для ядерной сферы и других отраслей занимается Окриджская национальная лаборатория (ОРНЛ). В ходе первого в своем роде испытания ОРНЛ напечатала крепежные элементы, так называемые канальные крепления. В 2021 году детали были установлены на ядерном энергетическом реакторе. Они будут находиться в реакторе до 2027 года, затем их извлекут и проверят с целью дать оценку их эксплуатационным характеристикам в условиях работы реактора. В 2022 году французская многонациональная компания «Фраматом» установила на АЭС «Форсмарк» в Швеции первый изготовленный при помощи технологии трехмерной печати компонент тепловыделяющего элемента из нержавеющей стали. Кроме того, в Российской Федерации недавно был создан 3D-принтер, который способен печатать изделия диаметром до 2,2 метров и высотой до 1 метра, а в Республике Корея трехмерная печать используется при производстве компонентов для регулирующих клапанов.

Поскольку технология трехмерной печати едва ли создавалась с учетом интересов ядерной отрасли, в настоящее время производственные технологии адаптируют исходя из потребностей отрасли. И хотя разрабатываемые промышленные стандарты организации уже создают стандарты трехмерной печати для различных отраслей, в ядерной сфере такие стандарты находятся на ранней стадии разработки.

По словам Дутты Рая, выработка лучших методов испытаний, их стандартизация в мировом масштабе и получение одобрения регулирующих органов — задачи, вероятно, не менее сложные, чем собственно инновационная деятельность и совершенствование технологий производства. В Европе 13 организаций в 6 странах участвуют в проекте «Производство компонентов для ядерной отрасли на основе аддитивных технологий», в рамках которого проводятся исследования с целью разработать процесс аттестации и оценки, который позволит использовать на атомных электростанциях компоненты, изготовленные на основе технологии трехмерной печати.





Эти крепления для тепловыделяющих сборок, изготовленные Окриджской национальной лабораторией (ОРНЛ) в партнерстве с компаниями «Фраматом» и «Теннесси вэлли аторити», являются первыми напечатанными на 3D-принтере элементами, связанными с обеспечением безопасности, которые будут установлены на атомной электростанции.

(Фото: Ф. Лист/ОРНЛ, Министерство энергетики США)

Кроме того, Научно-исследовательский электроэнергетический институт (ЭПРИ) в сотрудничестве с Министерством энергетики США и производителями проводит исследовательскую работу с целью упорядочить процесс внедрения регулирующими органами новых технологий, таких как трехмерная печать. Исследование ставит целью изучение применимости передовых технологий производства, выработку норм и стандартов, а также содействие экспертизе на предмет соответствия нормативным требованиям путем представления результатов независимых испытаний эксплуатационных характеристик материалов в условиях воздействия окружающей среды. «Спрос на альтернативные цепи поставок и ускоренное внедрение заметно возрастает по мере перехода энергетической отрасли к использованию современных энергетических систем, таких как усовершенствованные реакторы, — говорит Марк Алберт, руководитель группы ЭПРИ по проектам на основе передовых технологий производства. — Аддитивное производство и другие передовые методы производства способствуют ускоренному внедрению экологически чистых технологий».

## Роль МАГАТЭ

Одной из задач МАГАТЭ является содействие международному сотрудничеству и обмену знаниями. В апреле 2023 года МАГАТЭ объявило о создании Международной сети инноваций для поддержки действующих атомных электростанций (ИСОП).

ИСОП — это открытая для участия сеть и площадка для взаимодействия между странами по целому ряду инновационных направлений, включая перспективные производственные методы, такие как трехмерная печать.

Кроме того, в июне 2022 года МАГАТЭ приступило к реализации Инициативы по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО), которая призвана содействовать развертыванию усовершенствованных ядерных реакторов и малых модульных реакторов с учетом требований ядерной и физической безопасности. Цель ИГСЯО — гармонизировать подходы к регулированию и выработать более стандартизированные промышленные подходы, включая общие подходы к нормам и стандартам в ядерной сфере, которые были бы применимы к аддитивным технологиям изготовления частей для ММР.

Эд Брэдли, руководитель группы МАГАТЭ по эксплуатационной и инженерно-технической поддержке АЭС, говорит: «Именно от совместной инновационной деятельности зависит, смогут ли ядерные технологии нового поколения благополучно покинуть стены лабораторий и как можно скорее помочь нам в достижении нулевого уровня выбросов. Обмениваясь полученными результатами, методами и знаниями, мы экономим время и ресурсы, поскольку ядерным странам не нужно проводить одни и те же испытания или тратить деньги на решение одних и тех же задач. Именно так мы сможем добиться успеха».

## Топливо будущего:

### создание цепей поставок топлива для ММР и усовершенствованных реакторов

Люси Эштон

**И**нженеры готовятся к появлению ядерных энергетических реакторов следующего поколения, которые будут способствовать укреплению энергетической безопасности и смягчению последствий изменения климата. Для многих проектов усовершенствованных реакторов, включая малые модульные реакторы (ММР), потребуется топливо на основе высокообъемного низкообогащенного урана (HALEU), в котором содержание урана-235 составляет от 5 до 20 процентов, тогда как в топливе для большинства действующих АЭС оно находится на уровне 5 процентов.

«Топливо HALEU позволит уменьшить размеры установок, увеличить продолжительность эксплуатационного цикла и повысить эффективность, — отмечает директор Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами МАГАТЭ Елена Миколайчук. — «При этом некоторые страны, стремясь воспользоваться всеми преимуществами топлива HALEU, наращивают производственные мощности, чтобы обеспечить достаточный объем предложения, который будет иметь решающее значение для внедрения ММР».

HALEU производится в Российской Федерации и Соединенных Штатах Америки, в основном для исследовательских реакторов и для возможного использования в действующих легководных реакторах. На сегодняшний день единственное предприятие по производству HALEU в промышленных масштабах находится в России.

В прошлом году Агентство по снабжению Евратома подготовило доклад об объемах будущих поставок топлива HALEU для европейских исследовательских реакторов, которые были переведены или скоро будут переведены на это топливо. Традиционно в европейских исследовательских реакторах в качестве топлива используется высокообогащенный уран. В настоящее время топливо для исследовательских реакторов, которые переводятся на HALEU, поступает из России и США, причем последние заявляют, что могут гарантировать эти поставки только до 2035 или 2040 года из-за отсутствия в настоящее время мощностей для производства HALEU, что увеличивает риск дефицита поставок для исследовательских реакторов, которые будут переведены на это топливо в будущем.

По оценкам Агентства по снабжению Евратома, к 2035 году Европейскому союзу ежегодно будет необходимо от 700 килограммов до тонны HALEU для поддержания работы исследовательских реакторов, не учитывая будущие потребности усовершенствованных реакторов, используемых для производства электроэнергии. Поэтому, принимая во внимание опасения по поводу безопасности поставок в будущем, Евратом рекомендует ЕС развивать собственные мощности по производству топлива HALEU.

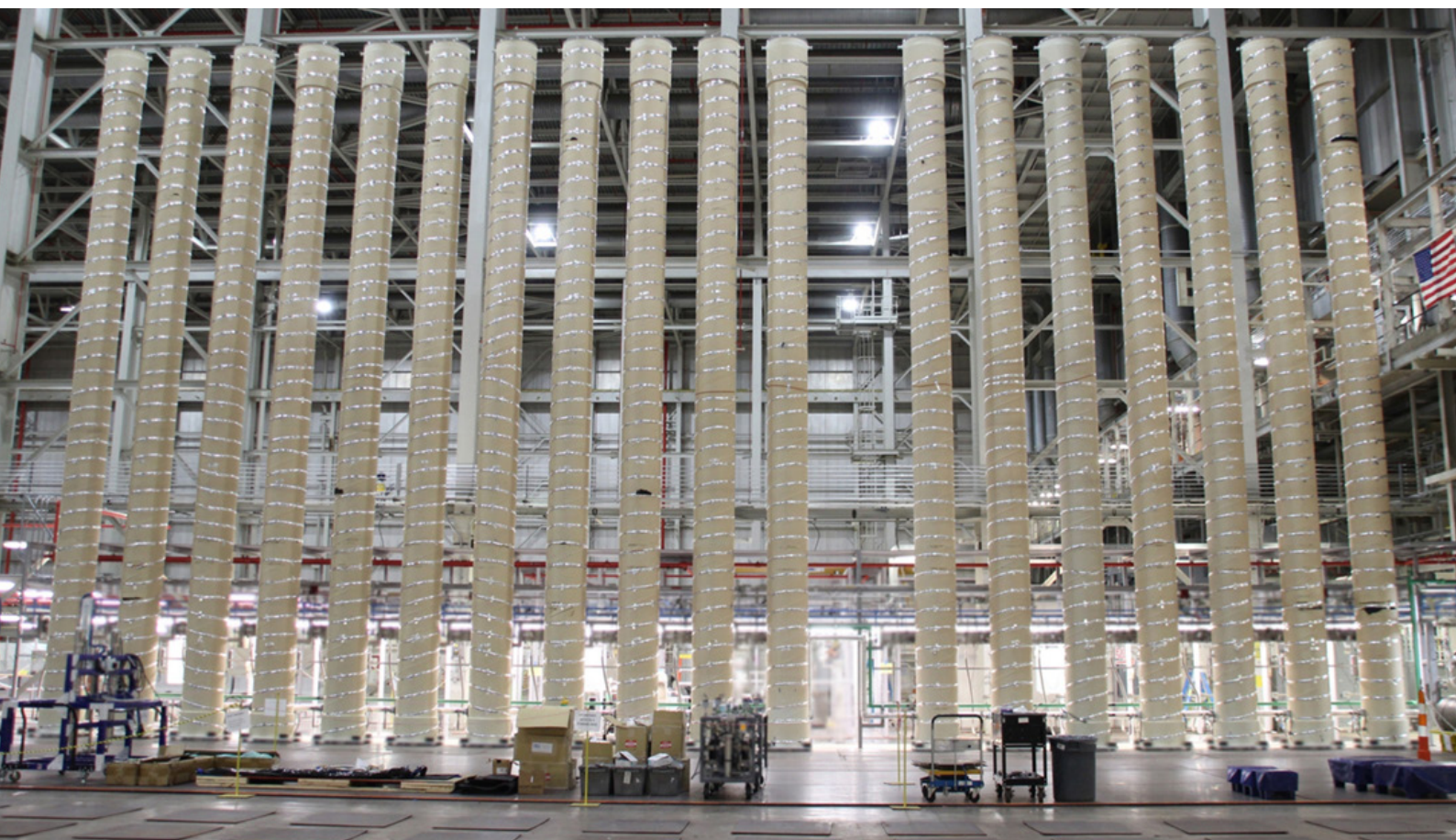
В ближайшей перспективе производства HALEU в Европе не предвидится, однако крупнейшие производители ядерного топлива на континенте являются мировыми лидерами в области технологии обогащения. В настоящее время они производят уран с обогащением до 6 процентов и, согласно докладу Агентства по поставкам Евратома, без значительных технических проблем могут использовать ту же технологию для производства HALEU.

Однако лицензирование, строительство, обеспечение безопасности и эксплуатация таких установок требует значительных инвестиций, и европейские производители пока не уверены в их экономической обоснованности. Европейские компании могут начать производство HALEU уже через пять лет, и в настоящее время рассматриваются планы расширения существующего завода во Франции, а также строительства новых установок в Соединенном Королевстве и США.

Тем не менее представители атомной промышленности США предупреждают, что из-за отсутствия HALEU внедрение некоторых проектов ММР может быть отложено на годы. В настоящее время для девяти из десяти проектов усовершенствованных реакторов, финансируемых правительством США, в ближайшее десятилетие потребуется топливо HALEU. По прогнозам Министерства энергетики США, к 2030 году потребуется более 40 тыс. килограммов HALEU, и это количество будет расти с каждым годом по мере ввода в эксплуатацию нового парка усовершенствованных реакторов.

Стремясь удовлетворить эту потребность, Министерство энергетики США инвестирует в производство HALEU в стране. Оно создало Консорциум HALEU и совместно с другими компаниями финансировало создание демонстрационного завода в Пикетоне, штат Огайо.





**Министерство энергетики США инвестирует в производство в стране топлива на основе высокообъемного низкообогащенного урана (HALEU). Ожидается, что в рамках демонстрационной программы по производству HALEU в Пикетоне, штат Огайо, к концу 2023 года будет произведено 20 килограммов HALEU.** (Фото: «Сентрус энеджи корпорейшен»)

В июне 2023 года американский регулирующий орган разрешил предприятию в Пикетоне начать операции по обогащению.

Ожидается, что на каскаде центрифуг HALEU в Пикетоне к концу 2023 года будет произведено 20 килограммов HALEU, а в 2024 году — 900 килограммов. Совокупная производительность полного каскада для производства HALEU, состоящего из 120 отдельных центрифуг, составит приблизительно 6 тыс. килограммов HALEU в год.

В дополнение к этому начинается производство еще одного вида топлива HALEU, получаемого путем обеднения высокообогащенного урана из государственных запасов. Топливо с трехструктурным изотропным покрытием (TRISO) состоит из микросфер, содержащих уран, углерод и кислород и покрытых тремя слоями углеродных и керамических материалов, которые предотвращают выход радиоактивных продуктов

деления. Затем эти микросферы могут быть собраны либо в более крупные сферы, размером с бильярдный шар (так называемые шаровые твэлы), либо в таблетки цилиндрической формы. Топливо TRISO-HALEU используется в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах; кроме того, некоторые поставщики планируют использовать его в своих проектах ММР и микрореакторов.

«Следующее поколение ядерных технологий потребует новых цепей поставок для новых видов топлива, — говорит специалист по разработке ядерного топлива в МАГАТЭ Сим Ки Соп. — Сейчас предпринимаются усилия по созданию этих цепей поставок, но еще предстоит сделать очень многое, в том числе убедительно продемонстрировать экономические преимущества этих усовершенствованных реакторов во многих регионах, если мы хотим обеспечить необходимые поставки топлива HALEU. Однако я уверен, что нам это удастся».



## Повышение эффективности производства ядерной энергии с помощью искусственного интеллекта

Вольфганг Пикот

**И**скусственный интеллект (ИИ) открывает широкие возможности для наращивания производства ядерной энергии. Эти сложные компьютерные системы решают задачи и принимают решения, используя аналог человеческой логики. Благодаря своей способности повышать эффективность и степень автоматизации, укреплять безопасность, оптимизировать прогнозное техническое обслуживание и другие процессы, искусственный интеллект уже успешно применяется в ряде отраслей атомной отрасли.

Под ИИ в широком смысле понимаются различные технологии, которые разрабатывались на протяжении десятилетий. Это понятие охватывает как простые компьютерные программы, такие как фильтры спама, так и более продвинутые концепции, например машинное обучение на основе больших массивов данных. Появление высокопроизводительных микропроцессоров дало толчок развитию технологий глубокого обучения искусственных нейронных сетей, смоделированных по образцу человеческого мозга.

Генеративный ИИ, подмножество искусственного интеллекта, привлек всеобщее внимание способностью создавать оригинальные тексты, изображения и видео. Он в высшей степени универсален и может применяться в самых разных областях деятельности.

«Всеобщее воодушевление по поводу возможностей генеративных инструментов имеет под собой основания, — считает Джереми Реншоу, руководитель направления ИИ, квантовых и ядерных инноваций в

Научно-исследовательском электроэнергетическом институте. — Уже появились довольно мощные модели, и активно разрабатываются новые и более совершенные инструменты».

Уже понятно, что в атомной отрасли, как и в других областях, ИИ может быть полезен при решении административных задач, при этом его применение в эксплуатации атомных электростанций (АЭС) пока не представляется возможным в силу его новизны и непрозрачности: еще не вполне ясно, как сети ИИ функционируют и делают выводы. Более прозрачные системы, известные как объяснимый генеративный ИИ, имеют перспективы для более широкого использования в работе АЭС. Разработки этого вида ИИ ведутся, и Реншоу уверен, что в случае их реализации станет возможным использовать ИИ на АЭС уже в обозримом будущем.

### Применение машинного обучения

Машинное обучение уже некоторое время применяется в атомной отрасли и приносит пользу в различных областях. Операторы используют алгоритмы машинного обучения для мониторинга в реальном времени и прогнозного технического обслуживания. Модели машинного обучения обрабатывают большой объем данных с датчиков, позволяя аналитикам сосредоточиться на потенциальных нарушениях в небольшой части всех данных. «Инспектору необходимо проанализировать только существенные данные. Вместо того, чтобы искать иголку в стоге сена, мы убираем стог», — говорит Реншоу.

Эта технология не заменяет анализ, проводимый человеком. Однако она может давать более точные результаты более оперативно, сокращая (но не отменяя вовсе) участие человека. Машинное обучение уже применяется для поиска трещин в металлических резервуарах и трубах на АЭС. Повышение точности, снижение затрат и оптимизация контроля со стороны человека благодаря машинному обучению способны принести атомной энергетике большую пользу.

Перспективы применения ИИ в работе АЭС огромны. Например, он может повысить эффективность и обеспечить стабильное электроснабжение, регулируя выработку электроэнергии на основе данных, получаемых в режиме реального времени, таких как потребительский спрос, погода и производительность оборудования. Автоматизация с использованием робототехники и систем ИИ поможет с типовыми задачами, что позволит сотрудникам сконцентрироваться на более важных задачах и повысит эффективность работы предприятия. Она также может использоваться для оптимизации расхода топлива и повышения энерговыработки реакторных установок.

«В сочетании с другими технологиями, такими как “цифровые двойники”, ИИ может существенно повысить эффективность производства ядерной энергии», — убеждена Нелли Нгой Кубелва, инженер-ядерщик МАГАТЭ, специализирующийся на инновационных технологиях. Цифровой двойник — это цифровая копия физического объекта, человека или процесса, которая может использоваться для моделирования реальных ситуаций и их результатов.

По словам Нгой Кубелвы, в отрасли существует огромный интерес к решениям на основе ИИ, но прежде чем начать применять на АЭС любую новую технологию, регулирующие органы должны досконально разобраться в ней, что позволит разработать рекомендации и выдать лицензии и разрешения на ее использование.

«Активно обсуждается вопрос о том, является ли ИИ, и особенно генеративный ИИ, чем-то настолько принципиально новым, что нам нужен иной подход к его регулированию, или же мы можем адаптировать существующие нормы, — говорит Нгой Кубелва. — Для внедрения этой технологии нам необходимо в сотрудничестве с регулирующими органами разработать рамочную основу».

МАГАТЭ поддерживает потенциальное применение ИИ на АЭС с 2021 года: Агентство опубликовало доклад по ИИ и создало в рамках Международной сети инноваций для поддержки действующих атомных электростанций (ИСОП) рабочие группы, которые занимаются нормативными и техническими аспектами внедрения ИИ. Эту позицию подкрепляют готовящиеся к публикации издания, посвященные применению ИИ в атомной отрасли и влиянию ИИ на безопасность АЭС. МАГАТЭ также руководит проектом координированных исследований, посвященным изучению того, как ИИ и инновационные технологии могут способствовать ускоренному внедрению малых модульных реакторов, и рассматривает вопрос о создании центров сотрудничества МАГАТЭ, занимающихся искусственным интеллектом.

Для Нгой Кубелвы это не просто технический вопрос. «Использование ИИ и других передовых технологий станет признаком того, что атомная отрасль идет в ногу с техническим прогрессом, — считает она. — Активная работа в этой сфере позволит заинтересовать молодое поколение, что жизненно важно для обеспечения будущего ядерной энергетики».

**МАГАТЭ руководит проектом координированных исследований, посвященным изучению того, как искусственный интеллект может способствовать внедрению малых модульных реакторов.**

(Изображение: Adobe Stock)



## Когда ядерные отходы — не бремя, а актив

Люси Эштон

**Ч**то, если бы высокоактивные ядерные отходы, образующиеся на атомных электростанциях, могли бы обеспечивать безотходную экономику в энергетическом секторе? Это может быть возможно благодаря быстрым реакторам, работающим в замкнутом топливном цикле.

В быстрых реакторах для поддержания цепной реакции деления используются нейтроны, энергия которых не уменьшается с помощью замедлителя, в роли которого выступает, например, вода, и такие реакторы имеют преимущества перед существующими ядерными реакторами на тепловых нейтронах. При работе в полностью замкнутом топливном цикле, в котором ядерное топливо перерабатывается и используется повторно, в быстрых реакторах возможно извлекать в 60–70 раз больше энергии из того же количества природного урана, чем в реакторах на тепловых нейтронах, что значительно снижает количество высокоактивных радиоактивных отходов.

«При использовании быстрых реакторов в замкнутом топливном цикле один килограмм ядерных отходов может перерабатываться многократно, пока не будет использован весь уран и не выгорят актиниды, которые сохраняют радиоактивность в течение тысяч лет. В итоге остается около 30 граммов отходов, которые будут сохранять радиоактивность в течение 200–300 лет», — говорит заместитель Генерального директора МАГАТЭ, руководитель Департамента ядерной энергии Михаил Чудаков.

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, отраслевым стандартом стали легководные реакторы. Тем не менее, в нескольких странах ведется работа по развитию технологии быстрых реакторов, в том числе в виде малых модульных реакторов (ММР) и микрореакторов (МР).

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 Российской Федерации, испытательный реактор-размножитель на быстрых нейтронах в Индии и китайский экспериментальный быстрый реактор. В Европейском союзе, а также в Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Японии и других странах

осуществляются проекты предназначенных для различных целей и функций быстрых реакторов, включая ММР и МР.

Некоторые страны рассматривают эксплуатацию быстрых реакторов с полностью закрытым топливным циклом как путь к обеспечению долгосрочной устойчивости ядерной энергетики.

Россия, ведет в Северске строительство опытно-демонстрационного энергетического комплекса, включающего быстрый реактор БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, модуль фабрикации и рефабрикации топлива, а также модуль переработки отработавшего смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. Кроме того, будет построено глубинное геологическое хранилище отходов. Важность этого пилотного проекта заключается не только в том, что он позволяет продемонстрировать изготовление свежего топлива, его облучение и последующую переработку, но и в том, что все это происходит на одной площадке.

«То, что весь процесс в рамках замкнутого топливного цикла проводится на одной площадке, хорошо в плане ядерной безопасности, физической безопасности и гарантий, — отметила технический руководитель МАГАТЭ по обращению с отработавшим топливом Ампаро Гонсалес Эспартеро. — Это также должно быть более целесообразно с точки зрения экономии, поскольку ядерные отходы и материалы не нужно будет перемещать из одного места в другое (как это делается в настоящее время в некоторых странах), что снимает многие проблемы перевозки и логистики».

Для реализации замкнутого топливного цикла в любом масштабе необходимы быстрые реакторы и инфраструктура для переработки и утилизации. Кроме того, по соображениям экономии и гарантий не любая страна может иметь собственные перерабатывающие заводы. Чтобы снизить затраты, перерабатывающие заводы оказывают услуги другим странам, или же страны используют заводы совместно.

В России также планируется после 2035 года ввести в строй 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 обычном ядерном топливном цикле.





### На Белоярской атомной электростанции в Российской Федерации действуют два быстрых реактора.

(Фото: Росэнергоатом)

Проекты развиваются и в других странах. В Китае идет строительство двух быстрых реакторов с натриевым теплоносителем (CFR-600) в уезде Сяпу провинции Фуцзянь. Первый блок находится в стадии ввода в эксплуатацию, и ожидается, что он будет подключен к энергосети в 2024 году. В США при содействии соучредителя корпорации «Майкрософт» Билла Гейтса разрабатывается проект быстрого реактора, который не будет работать в замкнутом топливном цикле, хотя в стране сейчас возобновлена работа над замкнутым ядерным топливным циклом и использованием имеющихся ядерных отходов для создания собственных запасов топлива. В Европе осуществляется бельгийский проект MYRRHA, с тем чтобы к 2036 году создать систему на базе ускорителя со свинцово-висмутовым теплоносителем и проверить ее способность расщеплять младшие актиниды для создания в будущем полностью замкнутого топливного цикла.

«Страны все чаще рассматривают способы утилизации таких ресурсов, как отработавшее ядерное топливо, чтобы таким образом получить экологически чистую энергию

для своей экономики, — рассказал руководитель группы по разработке технологий быстрых реакторов в МАГАТЭ Владимир Кривенцев. — Это происходит в то время, когда благодаря технологическим инновациям в области материаловедения, физики реакторов и инженерного дела стало возможным создание более совершенных конструкций с улучшенными характеристиками безопасности, влекущих меньшие затраты на строительство и эксплуатацию, что улучшает экономику АЭС с быстрым реактором».

МАГАТЭ играет ведущую роль в содействии разработке и внедрению быстрых реакторов путем обмена соответствующей информацией и опытом, в том числе в рамках проектов координированных исследований, технических публикаций, технических рабочих групп и конференций. Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам МАГАТЭ также способствует развитию технологии быстрых реакторов и соответствующих ядерных топливных циклов путем содействия странам в планировании и сотрудничестве.

# Долгосрочный потенциал тория в ядерной энергетике

Артем Власов

**П**ески Индии потенциально могут стать источником топлива, которое обеспечит безуглеродное будущее страны. Поскольку Индия является родиной крупнейших в мире запасов тория, ее долгосрочная стратегия развития атомной энергетики предполагает использование этого серебристого малорадиоактивного металла, который считается более экологически чистым и эффективным, чем традиционное ядерное топливо.

«Торий был в центре внимания исследователей и разработчиков с самого начала индийской ядерно-энергетической программы», — отмечает Анил Какодкар, ректор Национального института им. Хоми Бабы в Мумбаи, Индия. Индия спроектировала и разрабатывает ториевый реактор — усовершенствованный тяжеловодный реактор, который, по словам Какодкара, будет служить демонстрацией не только ториевого топливного цикла, но и пассивных средств безопасности.

Воспользоваться уникальными свойствами тория намеревается не только Индия. В июне 2023 года Китай выдал разрешение на эксплуатацию экспериментального ядерного реактора на расплавах солей тория. Реактор, построенный на севере страны посреди пустыни Гоби, в течение нескольких следующих лет будет проходить испытания. Япония, Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки и другие страны также интересуются исследованиями возможного применения тория в ядерной энергетике.

## Проблемы использования тория для производства энергии

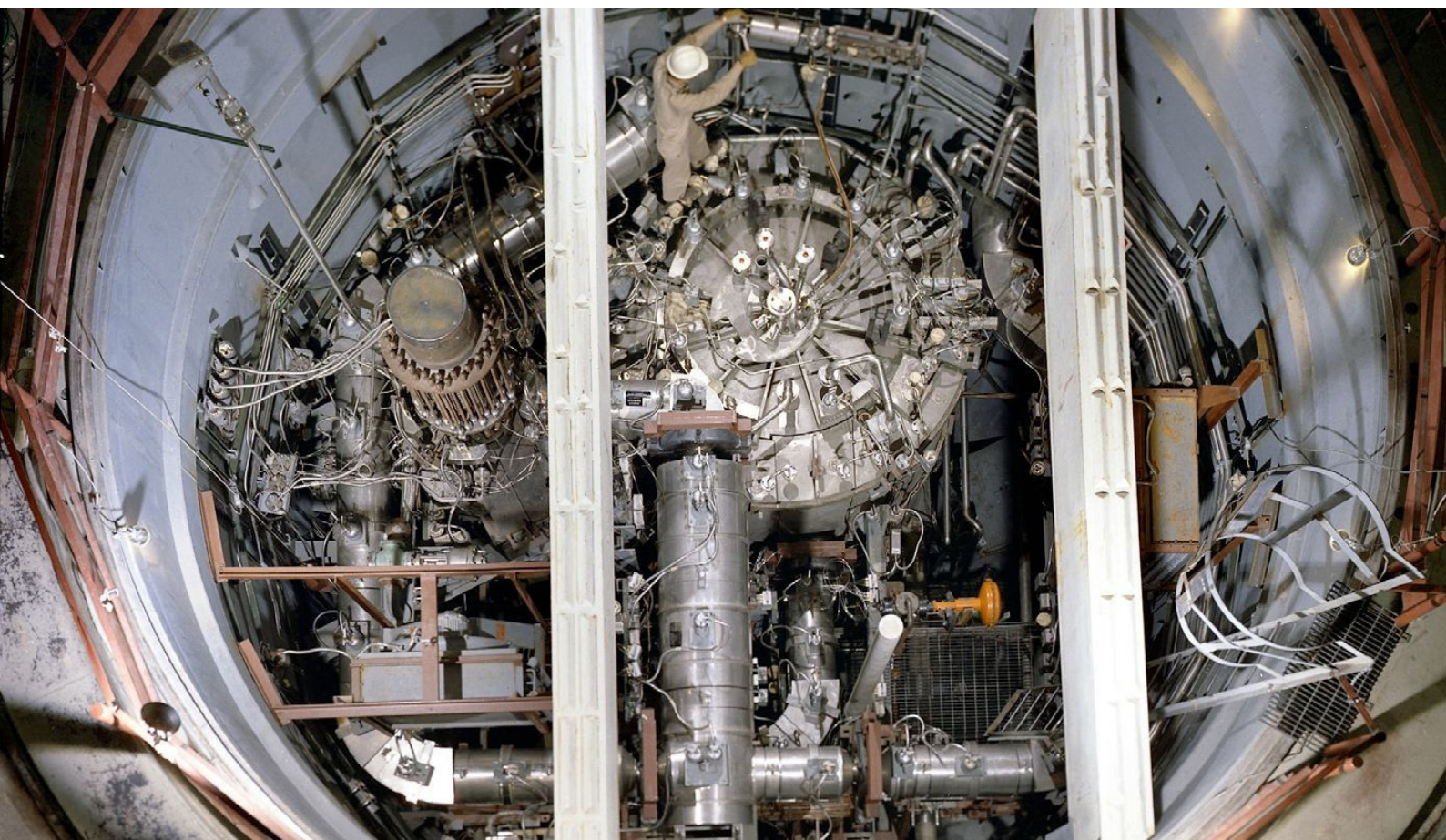
Торий, обычно встречающийся в магматических породах и песках тяжелых минералов, назван в честь Тора, бога грома в скандинавской мифологии. В природе он встречается в три раза чаще, чем уран, но исторически сложилось так, что он не получил широкого применения в промышленности и производстве электроэнергии. Отчасти это объясняется тем, что торий сам по себе не является ядерным топливом, хотя и может быть использован для его создания. Торий-232, единственный изотоп тория естественного происхождения, считается воспроизводящим материалом, т.е. способным к делению. Это означает, что торий нуждается во вспомогательных материалах, таких как уран или плутоний, для запуска и поддержания цепной реакции. При облучении торий-232 претерпевает ряд ядерных реакций, в конечном итоге образуя уран-233, который затем может быть расщеплен с выделением энергии для питания ядерного реактора.

При этом использование тория для производства энергии сопряжено с некоторыми трудностями. Существует ряд экономических и технических препятствий, которые затрудняют внедрение тория. Несмотря на распространенность этого металла, его получение в настоящее время стоит дорого. «Минерал монацит, который является основным источником редкоземельных элементов, является также основным источником тория, — говорит специалист по урановым ресурсам в МАГАТЭ Марк Михаласки. — Без текущего спроса на редкоземельные элементы монацит не добывался бы только из-за содержащегося в нем тория. Торий — это побочный продукт, и для его получения требуются более дорогостоящие методы, чем для получения урана. Однако это может измениться, если возрастет спрос на торий и его применение в ядерной энергетике».

Не менее дорогостоящими являются исследования, разработки и испытания ториевых ядерных установок, что объясняется отсутствием значительного опыта работы с торием и исторически сложившейся распространенностью урана в ядерной энергетике. «Еще одним недостатком использования тория является то, что с таким топливом трудно обращаться, — рассказывает Анжелика Хаперская, технический руководитель по ядерному топливу и установкам ядерного топливного цикла в МАГАТЭ. — Для изготовления ториевого топлива, в отличие от уранового топлива, необходимо использовать более дорогостоящие дистанционные технологии в связи с присутствием дочерних продуктов деления тория с жестким гамма-излучением. Кроме того, сложной задачей является переработка отработавшего ториевого топлива. Существуют трудности с растворением диоксида тория и обращением с газообразными продуктами. Оборудование для переработки также подвержено коррозии из-за использования фторидов в процессе растворения. И в целом технологиям переработки еще необходимо достичь уровня промышленной зрелости».

При координации МАГАТЭ был осуществлен четырехлетний исследовательский проект, посвященный возможностям развития ториевой ядерной энергетике, изучению преимуществ и проблем использования тория в качестве топлива и анализу его применения в различных типах реакторов — от наиболее распространенных водоохлаждаемых реакторов до реакторов на солевых расплавах. Результаты проекта были недавно опубликованы в докладе «Near Term and Promising Long Term Options for the Deployment of Thorium Based Nuclear Energy» («Краткосрочные и перспективные долгосрочные варианты развития ядерной энергетике на основе тория») (IAEA-TECDOC-2009).





### Вид сверху на экспериментальный ториевый ядерный реактор 1960-х годов.

(Фото: Окриджская национальная лаборатория Министерства энергетики США)

## Преимущества тория

Торий обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным ядерным топливом — ураном-235. Торий может производить больше делящегося материала (урана-233), чем он потребляет, будучи загруженным в водоохлаждаемый реактор или реактор на солевых расплавах, и он производит меньше долгоживущих младших актинидов, чем плутониевое топливо. По оценкам, в верхнем слое земной коры содержание тория составляет в среднем 10,5 грамм на тонну, а урана — примерно 3 грамма на тонну.

«Благодаря своей распространенности и способности к воспроизведению делящегося материала торий может помочь человечеству удовлетворять свои потребности в энергии в долгосрочной перспективе», — говорит специалист по установкам топливного цикла в МАГАТЭ и один из авторов доклада МАГАТЭ Кайлаш Агарвал.

Помимо того что ториевые реакторы — и ядерная энергетика в целом — не выделяют парниковых газов в процессе эксплуатации, еще одним их преимуществом является то, что они производят меньше долгоживущих ядерных отходов, чем современные урановые реакторы.



# Регулирование инновационных конструкций реакторов

Наяна Джаяраджан и Ольга Пиотух

Действующие в настоящее время регулирующие положения в ядерной отрасли разработаны в расчете на типы реакторов, которые используются с начала эксплуатации коммерческих атомных электростанций в 1960-х годах. Эти регулирующие положения опираются на опыт, накопленный за последние шестьдесят лет. По мере разработки усовершенствованных ядерных реакторов, в том числе малых модульных реакторов (ММР), регулирующие органы стремятся вводить новшества в собственные процессы, регулирующие положения и руководящие материалы, чтобы внедрение первых в своем роде технологий проходило с соблюдением всех требований ядерной и физической безопасности.

По мнению Брайана Смита, директора отдела выдачи и продления лицензий Комиссии по ядерному регулированию Соединенных Штатов и председателя проводимого МАГАТЭ Форума регулирующих органов по ММР, одной из приоритетных задач является разработка регулирующих положений и руководящих материалов на основе принципа технологической нейтральности. «В Соединенных Штатах на протяжении более 50 лет в эксплуатации находились лишь большие легководные реакторы, и наши регулирующие положения ориентированы именно на эти типы реакторов», — говорит Смит. При этом он отмечает, что «хотя легкая вода используется в качестве теплоносителя в отдельных ММР, некоторые из них сильно отличаются друг от друга». Он добавляет, что «для таких реакторов нам необходимо практически с нуля создать нормативную основу, которая учитывала бы принцип технологической нейтральности, факторы риска и производительность».

Для решения задачи регулирования инновационных технологий регулирующие органы рассматривают различные стратегии, такие как пересмотр применимости мер регулирования, уделение приоритетного внимания найму технического персонала различной специализации и изучение опыта заявителей и других регулирующих органов.

«Некоторые из современных конструкций предполагают использование внутри реактора других материалов, таких как графит; в каких-то из них температура выше, чем у существующих парков (легководных реакторов). Нам приходится это учитывать», — говорит Смит. — Наличие подходящего технического персонала также представляет собой определенную задачу — не только для нас, но и для всех регулирующих органов. Для работы с современными конструкциями требуются технические эксперты, которые знакомы с различными новейшими технологиями и могут оценить параметры безопасности самого реактора».

Другая успешная стратегия заключается в стимулировании взаимодействия перед подачей заявки, также известному как рассмотрение проекта поставщиком или предшествующая лицензированию экспертная оценка. Такой подход позволяет регулирующим органам рассмотреть вопрос о применимости их регулирующих положений к техническим характеристикам инновационных конструкций и дает возможность заявителям ознакомиться с регулируемыми требованиями до начала официального процесса лицензирования. Форум регулирующих органов по ММР рекомендует использовать предшествующее лицензированию взаимодействие между регулируемыми органами и поставщиками реакторов с целью спрогнозировать или определить условия более активного вмешательства регулирующего органа, которое может привести к приостановке либо задержке в деятельности лицензиата.

## Гармонизация на основе сотрудничества

Благодаря более низким начальным капитальным затратам на ММР, их меньшим потребностям в ресурсах, а также потенциалу в области неэлектрических применений, ММР становятся все более привлекательными для стран, приступающих к реализации ядерно-энергетических программ или рассматривающих такую возможность. В частности, председатель Иорданской комиссии по атомной энергии Халед Тукан заявил, что Иордания рассматривает возможность использования ММР отчасти потому, что в этой засушливой и не имеющей выхода к морю стране оказалось весьма непросто найти достаточные для охлаждения обычной атомной электростанции водные ресурсы.

Для таких стран залогом обеспечения соответствия их ядерно-энергетических программ требованиям ядерной и физической ядерной безопасности является международное сотрудничество и возможность перенимать опыт у регулирующих органов с большим опытом. Форум регулирующих органов по ММР, учрежденный в 2015 году, представляет собой международную группу регулирующих органов. Участники Форума выявляют общие проблемы безопасности, которые могут возникнуть при экспертизе ММР регулируемыми органами, и предлагают пути решения.

По словам Смита, Форум служит важной платформой для обмена знаниями и опытом в области регулирования ММР. В рамках Форума проводятся региональные семинары-практикумы и вырабатываются общие позиции по ключевым вопросам, которые представители

регулирующих органов «могут использовать в своих странах, чтобы изменить или дополнить собственные руководящие материалы».

В настоящее время в мире находятся в разработке более 80 проектов ММР. Реализуемая МАГАТЭ Инициатива по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО) направлена на гармонизацию подходов к регулированию и единых отраслевых подходов, чтобы в глобальном масштабе содействовать эффективному развертыванию усовершенствованных ядерных реакторов с соблюдением требований ядерной и физической безопасности.

В июне 2023 года важность этой инициативы МАГАТЭ подчеркнул на пленарном заседании ИГСЯО Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси.

«Гармонизация подходов облегчает международную торговлю ММР и компонентами, поскольку вместо того, чтобы разбираться с многочисленными, порой противоречащими друг другу наборами требований разных стран, разработчики проектируют и изготавливают реакторы, которые соответствуют более единообразному своду глобальных стандартов», — заявил Гросси.

Он добавил, что благодаря десятилетиям опыта работы в качестве центра по вопросам безопасности и регулирования МАГАТЭ располагает всеми возможностями для содействия международному сотрудничеству в области национальных регулирующих основ. «Большая согласованность подходов к регулированию обеспечит более широкое международное сотрудничество и позволит странам внедрить строгие нормы безопасности и физической безопасности», — сказал он. ИГСЯО, к осуществлению которой Агентство приступило в июне 2022 года, состоит из двух отдельных, но взаимодополняющих направлений: регуляторного и отраслевого. Участники Форума регулирующих органов по ММР оказывают содействие регуляторному направлению и разрабатывают процессы, которые позволят использовать в рамках процесса лицензирования результаты экспертных оценок других регулирующих органов и проводить совместные экспертизы.

На регуляторном направлении ИГСЯО действуют также две рабочие группы: одна занимается созданием системы обмена информацией между регулируемыми органами, а другая — предшествующей лицензированию многонациональной экспертной оценкой. В рамках предшествующей лицензированию многонациональной экспертной оценки регулирующие органы будут совместно выявлять потенциальные проблемы в новых конструкциях реакторов еще до подачи заявки на лицензию на национальном уровне.



**В рамках Инициативы по гармонизации и стандартизации в ядерной области, которая была запущена в июне 2022 года, идет разработка согласованных нормативных и единых промышленных подходов.**

Развитие ядерной энергетики зависит от информирования и участия общественности. Важным условием успешного внедрения ММР станет работа по информированию общественности о безопасности инновационных конструкций реакторов, таких как ММР, и привлечению заинтересованных в этой области сторон. «Поскольку такие реакторы могут располагаться значительно ближе к населенным пунктам, первоочередной задачей для регулирующих органов является взаимодействие с населением и готовность прислушиваться к общественному мнению, особенно это касается тех стран, в которых такой реактор будет построен впервые, — говорит Смит. — Регулирующие органы решают эту задачу путем формирования культуры открытости, профессионализма и надежной безопасности, отводя при этом особое место вопросам своей независимости и прозрачности в качестве достоверного источника своевременной, надежной и легкодоступной информации».

## Проверка отработавшего ядерного топлива в глубинных геологических хранилищах

Эва Морела Лам Редондо

В то время как мир ищет альтернативы ископаемому топливу для борьбы с изменением климата, ряд стран разрабатывают программы развития ядерной энергетики, чтобы создать надежный низкоуглеродный источник энергии. Страны, эксплуатирующие ядерные реакторы, несут ответственность за обеспечение мощностей для геологического захоронения высокоактивных радиоактивных отходов. В мире хорошо зарекомендовал себя подход к захоронению в искусственно устроенных глубинных геологических хранилищах (ГГХ). Наиболее развиты программы ГГХ в Канаде, Финляндии, Франции, Швейцарии и Швеции.

Так, в настоящее время ведется работа над установкой по герметизации (УГ) и над ГГХ в Финляндии: на первой отработавшее топливо будет помещаться в надежные закрытые канистры для захоронения, а во втором канистры будут безопасно храниться на постоянной основе. И то и другое необходимо для выполнения международно-правовых обязательств Финляндии перед МАГАТЭ по проверке мирного использования ядерного материала.

МАГАТЭ выполняет свою миссию по ядерной проверке, применяя ряд технических мер (гарантий) для надзора за ядерными установками, материалом и соответствующей деятельностью. Эти меры позволяют МАГАТЭ путем независимой проверки устанавливать, выполняют ли государства свою юридическую обязанность использовать ядерный материал исключительно в мирных целях. Государства принимают эти меры, заключая с МАГАТЭ соглашения о гарантиях. В свою очередь, осуществление гарантий позволяет МАГАТЭ обеспечивать миру надежную уверенность в том, что государства выполняют свои обязательства по ядерному нераспространению.

«Сотрудничество Финляндии с МАГАТЭ свидетельствует о нашем твердом намерении выполнять международные обязательства по нераспространению благодаря применению эффективных гарантий», — объясняет Марко Хямяляйнен, руководитель отдела гарантий ядерных материалов в Управлении по радиационной и ядерной безопасности (СТУК) Финляндии.

С УГ и ГГХ связаны проблемы и возможности, касающиеся применения гарантий, и в настоящее время разрабатываются инновационные решения, благодаря которым инспекторы по гарантиям МАГАТЭ смогут проверять хранящийся ядерный материал. Одной из таких проблем является доступ к ГГХ, которое находится на глубине почти 500 метров под землей и рассчитано на эксплуатацию в течение следующих 100 лет. После ввода в эксплуатацию УГ и ГГХ станут первыми объектами

такого рода в мире в соответствии с соглашением о всеобъемлющих гарантиях, заключенным с МАГАТЭ. Поэтому инспекторам МАГАТЭ требуется разработать новые и устойчивые подходы к применению гарантий для проверки труднодоступных ядерных материалов как уже сейчас, так и в отдаленном будущем.

«Как инспекторы по гарантиям, мы должны иметь возможность проверить отработавшее ядерное топливо до того, как оно будет передано на УГ и в ГГХ. Затем мы принимаем меры гарантий, чтобы подтвердить, что отработавшее топливо не используется в иных целях или не заменено и что установки не используются в незаявленных целях, — говорит инспектор по ядерным гарантиям МАГАТЭ Кортни Эймс. — УГ и ГГХ представляют собой сложную задачу для инспекторов по гарантиям МАГАТЭ относительно поддержания непрерывности поступления информации во время и после передачи отработавшего топлива, особенно в условиях ограниченного физического доступа к геологическому хранилищу. Благодаря инновационным методам, командной работе и тщательному анализу мы можем достичь наших целей, связанных с гарантиями».

Сотрудничество между МАГАТЭ, Европейской комиссией и СТУК играет важнейшую роль в разработке мер гарантий и соответствующих методов, в том числе содействуя разработке и испытанию технологий проверки отработавшего ядерного топлива до его захоронения.

В 2012 году МАГАТЭ инициировало проект строительства установки по герметизации и геологического хранилища (УГГХ), который был призван решить проблемы осуществления гарантий, возникающие в связи с новыми типами установок. В рамках этого проекта в тесном взаимодействии с партнерами был внедрен комплексный подход, включающий принципы учета требований гарантий при проектировании, позволяющие сократить до минимума эксплуатационное воздействие на ГГХ. Учет требований гарантий при проектировании предполагает включение соображений, связанных с гарантиями, в планирование и проектирование той или иной установки на ранних этапах работы, с последующей их интеграцией на протяжении всего периода строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации. В случае Финляндии учет требований гарантий при проектировании позволяет инспекторам по гарантиям МАГАТЭ и Евратома, а также национальному органу (СТУК) эффективно выполнять свои обязанности, не нарушая работы УГ и ГГХ.

«При проектировании УГГХ мы учли требования гарантий. Благодаря этому упреждающему подходу





### Вход в глубинное геологическое хранилище отработавшего ядерного топлива «Онкало» в Финляндии.

(Фото: компания «Посива»)

снижается необходимость в модернизации и экономятся ценные ресурсы оператора, СТУК, МАГАТЭ и Европейской комиссии», — отмечает г-н Хямяляйнен.

Кроме того, внедряются другие недавно разработанные концепции и меры, включая системы дистанционного мониторинга. Используя систему дистанционного мониторинга для наблюдения за местом нахождения ядерного материала, МАГАТЭ может сократить число инспекций на местах и, следовательно, снизить выбросы углекислого газа, связанные с поездками на объекты и обратно. Такие методы, как сейсмический мониторинг и лазерные системы проверки защитной оболочки могут также сыграть свою роль в уменьшении числа инспекций. Сейсмический мониторинг позволяет обнаружить любые незаявленные проходки в окружающей ГГХ породе, в то время как лазерные системы проверки защитной оболочки позволяют изучить характеристики сварного

шва крышки контейнера и таким образом получить уникальную естественную «подпись», изменение которой будет свидетельствовать о том, что контейнер открывался.

К 2025 году УГ и ГГХ в Финляндии будут полностью готовы к размещению отработавшего ядерного топлива. Благодаря сотрудничеству и инновациям МАГАТЭ, Европейская комиссия и СТУК совместно внедряют эффективные и действенные гарантии, помогающие достигать целей МАГАТЭ в области проверки и гарантирующие минимальное влияние на эксплуатацию этих установок. За счет учета требований гарантий при проектировании УГ и ГГХ предложат такое решение для обращения с отработавшим ядерным топливом и его утилизации, которое будет содействовать переходу к низкоуглеродной ядерной энергетике и упрощать проверку ядерного материала и технологий, проводимую МАГАТЭ.

# Как формируется отношение к ядерной энергии

Ирена Шацис

*Отношение общественности к ядерной энергии меняется на фоне обеспокоенности вопросами изменения климата и энергетической безопасности, а также энергетической справедливости и устойчивого развития. При этом сторонники ядерной энергетики находят необычные способы интересно рассказать о преимуществах этого экологически чистого источника энергии. В частности, этим занимается модель и влиятельный блогер по вопросам ядерной энергии Изабель Бёмеке, известная также в социальных сетях как Isodope.*

*По ее словам, ядерная энергия жизненно необходима, если в будущем человечество хочет не просто выживать, но и процветать. В этом интервью Изабель объясняет, как она знакомит молодежь с ядерной энергетикой, используя для этого свой популярный образ в социальных сетях.*

## Как вы заинтересовались ядерной энергетикой?

В 2015 году один ученый, на которого я подписана в соцсетях, написал в «Твиттере» о реакторах на расплавах солей тория. Я поискала информацию про это, но не нашла ничего понятного такому человеку, как мне, не имеющему технического образования. И я заинтересовалась ядерной энергетикой, начала спрашивать людей, что они думают об этом. Ответы по сути сводились к следующему: «Ядерная энергия — это на самом деле хорошо. Без нее проблему изменения климата не решить, но при этом люди от нее в ужасе».

После пожаров 2019 года в Австралии, бассейне реки Амазонки и в Калифорнии я поняла, что мы недостаточно быстро продвигаемся вперед в борьбе с изменением климата, начала искать решения и снова наткнулась на ядерную энергетику. Меня поразило, как много у людей заблуждений относительно ядерной энергии. Потому что в основном источником их информации являются массовая культура, фильмы и мультфильмы, такие как «Симпсоны». Я пыталась разобраться, как рассказать людям о том, что ядерная энергия является вторым по величине источником экологически чистой энергии в мире и что страны, которые декарбонизировали свое производство электроэнергии, добились этого в основном за счет гидроэнергетики или ядерной энергетики.

## Так появилась Isodope?

Наш мир определяют социальные сети и их многочисленные влиятельные пользователи, формирующие общественное мнение. Я поняла, что лучший способ донести до людей идею о ядерных технологиях — это создавать контент, который будет интересен и понятен людям в социальных сетях. Я знала, что он должен быть особенным, и не хотела записывать просто очередной видеоролик. Я придумала персонажа, который одевается в футуристическом стиле, говорит

понятным языком и использует красочные визуальные образы. Я назвала ее Isodope, обыграв химический термин «изотоп».

## Кто ваша основная аудитория?

Прежде всего миллениалы (люди, родившиеся в 1980–90-е годы) и следующие за ними поколения. Речь идет о благополучии молодежи. Ведь с самыми тяжелыми последствиями изменения климата столкнемся мы и наши дети.

## Как вы общаетесь с более широкой аудиторией, помимо сторонников ядерной энергетики?

Для этого очень хорошо подходят соцсети. Там можно не только создавать контент, чем я и занимаюсь, но и таким образом взаимодействовать с людьми. Можно отвечать тем, у кого возникают вопросы и кто проявляет любопытство.

Возможность поговорить о ядерной энергии можно найти везде. Например, когда я иду в больницу и кто-то спрашивает меня о моей работе, я говорю, что работаю в сфере ядерной энергетики, и у нас сразу завязывается интересный разговор. Также очень важно работать с людьми, живущими рядом с АЭС. Эти люди — самые активные защитники ядерной энергетики, потому что их сообщества получают от нее огромную пользу.

Также нужно больше рассказывать о радиоактивных отходах, потому что это один из самых основных вопросов у людей. Если вы видели ядерные отходы, то вы знаете, что это самая неинтересная вещь на свете: это просто бетонные бочки, которые где-то стоят. И тут можно показывать, как выглядят ядерные отходы, рассказывать про безопасное обращение с ними, и что вообще-то отходы — это не так интересно, как люди думают.





### Что стало вашим самым большим достижением как лидера мнений в области ядерной энергетики?

На первом месте, причем сразу по многим причинам, — спасение от закрытия атомной электростанции «Дьябло-каньон» в Калифорнии в 2022 году. Когда я начала рассказывать людям о ядерной энергетике, я исследовала АЭС, которые планировалось досрочно закрыть в Соединенных Штатах Америки. В то время их было пять, и АЭС «Дьябло-каньон» выделялась из их числа не только тем, что была прекрасной станцией, которая могла проработать еще 20 лет, но и тем, что она была символом движения против ядерной энергетике в Соединенных Штатах Америки. В конце 1960-х и в 1970-х годах люди часто протестовали против строительства АЭС «Дьябло-каньон» — на один митинг даже пришло около 30 тыс. человек.

Спасти станцию означало дать понять общественности и политикам, что ситуация изменилась и что люди теперь на стороне ядерной энергетике. Я решила

попробовать и стала сотрудничать с различными организациями в Соединенных Штатах Америки. Мы организовали крупнейший в стране митинг в поддержку ядерной энергетике. Я создала также некоммерческую организацию под названием Save Clean Energy («Спасем экологически чистую энергию») и направила губернатору Калифорнии письмо, которое подписали 80 ведущих экспертов и предпринимателей в области энергетике и климата, в котором мы призывали не закрывать АЭС «Дьябло-каньон». В результате станция будет работать еще как минимум пять лет после 2025 года, в котором ее первоначально планировалось закрыть.

### Каковы ваши последние проекты и планы в отношении Isotope?

В настоящее время я пишу книгу «Rad Future» («Радикальное будущее») о ядерной энергетике; она написана понятным языком, в стиле моего персонажа Isotope. Что касается моей некоммерческой деятельности, то я много работаю в области перехода от угля к ядерной энергии, поскольку считаю, что это, вероятно, наш лучший шанс ускорить внедрение ядерной энергетике, по крайней мере в Соединенных Штатах Америки.

А еще я думаю, что индустрия моды помогает нам выйти на совершенно другую аудиторию. Я рассказывала о ядерной энергетике в редакционных колонках в модных изданиях и в интервью, и буду продолжать это делать. Здесь есть большой потенциал для интересных совместных проектов.

# ОСАРТ: 40 лет на службе делу укрепления безопасности атомных электростанций во всем мире



Члены 200-й миссии Группы по оценке эксплуатационной безопасности проводят экспертизу ОСАРТ в Альмарасе, Испания, в 2018 году. (Фото: М. Клингенбек/МАГАТЭ)

МАГАТЭ отмечает 40-ю годовщину создания Группы по оценке эксплуатационной безопасности (ОСАРТ), посредством которой МАГАТЭ оказывает своим государствам-членам одну из важнейших услуг в этой области. Цель программы ОСАРТ — помочь государствам-членам укреплять безопасность своих АЭС во время ввода в эксплуатацию и эксплуатации путем сравнения принятой на них практики с нормами безопасности МАГАТЭ. С августа 1983 года, когда состоялась первая миссия на АЭС «Кори» в Республике Корея, МАГАТЭ провело 218 миссий ОСАРТ в 37 странах, обеспечив объективную и независимую оценку показателей их эксплуатационной безопасности.

«В рамках этих миссий тысячи экспертов содействовали непрерывному укреплению безопасности атомных электростанций, работающих по всему миру», — подчеркнул Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси.

Миссии ОСАРТ призваны помочь операторам ядерных установок укреплять эксплуатационную безопасность их станций путем выявления областей, которые следует улучшить, и вынесения рекомендаций о том, как этого добиться.

В ходе миссии ОСАРТ эксперты из государств-членов и МАГАТЭ оценивают соответствие показателей безопасности на ядерной установке нормам безопасности МАГАТЭ, международно признанным нормам ядерной безопасности, и предоставляют конкретные рекомендации и предложения по повышению безопасности. В ходе миссии оценивается применение этих норм в целом ряде областей, включая управление станцией, обучение и аттестацию персонала, производственную деятельность и культуру безопасности.

На действующих АЭС миссии ОСАРТ могут проводиться в любое время после начала промышленной эксплуатации станции. Повторное посещение обычно проводится примерно через 18 месяцев после основной миссии. Миссии пред-ОСАРТ проводятся на этапе ввода в эксплуатацию АЭС, обычно за несколько месяцев до первой загрузки топлива в ядерный реактор. В качестве дополнения к таким миссиям проводятся также корпоративные миссии ОСАРТ с целью анализа централизованных функций, связанных с аспектами эксплуатационной безопасности АЭС в составе парка, таких как корпоративное управление, мониторинг показателей безопасности; надзор, закупки или людские ресурсы.

## Программа ОСАРТ сегодня

Проведенный недавно анализ показал, что операторы ядерных установок оперативно учитывают в работе результаты миссий ОСАРТ и что на момент проведения повторных миссий более 95 процентов вопросов, поднятых по итогам миссий, были решены или активно решались.

В последние годы в программе больше внимания уделяется таким областям, как управление авариями и обеспечение взаимодействия между людьми, технологиями и организациями. Кроме того, много внимания в программе уделяется культуре безопасности, то есть важности и ценности безопасности в культуре организации. Цель программы ОСАРТ — привить культуру безопасности, которая побуждает принимающие организации самостоятельно и на ранней стадии выявлять и решать проблемы обеспечения безопасности.

## Содействие обмену информацией, прозрачности и доверию

На сегодняшний день в ходе миссий ОСАРТ выявлено 1350 примеров положительной практики, которые опубликованы также на сайте МАГАТЭ. Эксплуатирующие организации часто изучают эти примеры положительной практики и внедряют применимые.

Для обеспечения прозрачности опубликованы Руководящие принципы ОСАРТ и нормы безопасности МАГАТЭ, на которых основывается работа ОСАРТ.

«Миссии МАГАТЭ по экспертной оценке сейчас важны как никогда, поскольку они закладывают основу для значительного расширения ядерной энергетики, необходимого для достижения глобальных целей по борьбе с изменением климата», — отметил Генеральный директор Гросси.

— *Наяна Джаяраджан*



## МАГАТЭ на Политическом форуме высокого уровня ООН рассказало о помощи в достижении ЦУР

МАГАТЭ приняло участие в Политическом форуме высокого уровня Организации Объединенных Наций по устойчивому развитию 2023 года, который состоялся 10–19 июля в Центральных учреждениях ООН в Нью-Йорке. На Форуме Агентство подчеркнуло важнейший вклад ядерной науки и технологий в достижение целей в области устойчивого развития (ЦУР).

«Впереди неопределенное будущее, обусловленное совокупностью кризисов — водного, энергетического и климатического. Мы должны работать сообща, чтобы отыскать оптимальные пути решения для удовлетворения приоритетных потребностей стран, повышения их устойчивости и сокращения глобального неравенства», — заявил Лю Хуа, заместитель Генерального директора МАГАТЭ и руководитель Департамента технического сотрудничества.

МАГАТЭ уделяет большое внимание оказанию странам помощи в решении их задач в рамках ЦУР. На Политическом форуме высокого уровня 2023 года Агентство представило анализ хода работы по достижению пяти ЦУР, в том числе ЦУР 6 («чистая вода и санитария») и ЦУР 7 («недорогостоящая и чистая энергия»). МАГАТЭ содействует использованию ядерной науки и технологий для производства чистой, надежной и недорогостоящей энергии и ядерных методов, таких как изотопная гидрология, для совершенствования управления водными ресурсами.

17 ЦУР — это взаимосвязанные цели, призванные способствовать решению глобальных проблем, с которыми столкнулось человечество. Текущий год знаменует собой середину пути к достижению 17 целей, намеченному на 2030 год. МАГАТЭ провело выставку и организовало параллельное мероприятие, посвященное расширению доступа

к чистой воде и энергии на основе сотрудничества Юг — Юг и трехстороннего сотрудничества.

Важность такого подхода подчеркнула Дима Аль-Хатиб, директор Управления ООН по сотрудничеству Юг — Юг. Она заявила: «Сотрудничество Юг — Юг и трехстороннее сотрудничество зарекомендовали себя в качестве новаторского метода укрепления потенциала и преодоления трудностей, с которыми сталкиваются страны Юга, будь то управление водными ресурсами, энергия, цифровизация или искоренение нищеты. Сотрудничество Юг — Юг представляет собой ценный механизм взаимодействия, который приносит результаты на всех уровнях».

Посол Южной Африки Ксолиса Мабхонго подчеркнул важность сотрудничества Юг — Юг в области энергетического планирования и необходимый для него высокий уровень технической компетентности. Южная Африка при поддержке МАГАТЭ провела сессии школы по управлению в области ядерной энергии, чтобы помочь экспертам из африканских стран приобрести знания и навыки в области жизненного цикла ядерной энергии.

«Объединившись с надежными партнерами, мы сможем справиться с климатическим и энергетическим кризисами, расширив сферу применения проверенных решений, ставших возможными благодаря науке и технологиям», — сказала Вивиан Океке, представитель Генерального директора МАГАТЭ при Организации Объединенных Наций и директор бюро связи МАГАТЭ в Нью-Йорке.

Согласно специальному выпуску доклада о целях в области устойчивого развития за 2023 год, несмотря на расширение доступа к чистой энергии в глобальном

масштабе, электроэнергии по-прежнему нет у 675 миллионов человек, а безопасных источников топлива для приготовления пищи — у 2,3 миллиарда человек. МАГАТЭ помогает странам в достижении ЦУР посредством своей программы технического сотрудничества.

Лю Хуа, заместитель Генерального директора МАГАТЭ, обращаясь к участникам параллельного мероприятия Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, которое было посвящено научно обоснованной оценке водных ресурсов, отметил, что «при помощи научно обоснованной оценки ученые могут предоставлять директивным органам информацию, которая необходима для управления водными ресурсами, их защиты и сохранения». Он добавил, что «обеспечение доступа к чистой воде для всех станет важнейшим шагом на пути к устойчивому развитию».

Во всем мире у 2,2 миллиарда человек нет доступа к безопасным источникам воды, а у 3,5 миллиарда — к санитарным услугам. Проблема нехватки воды обострилась в некоторых регионах из-за изменения климата и конфликтов. Постоянный Представитель Таджикистана при ООН Джонибек Хикмат рассказал об усугубившихся из-за изменения климата проблемах с безопасностью водоснабжения, которые в настоящее время испытывает Таджикистан. МАГАТЭ в рамках программы технического сотрудничества оказало Таджикистану адресную помощь в оценке запасов подземных вод в бассейне Аральского моря, и совсем недавно началась реализация национального проекта, посвященного ледникам.

— Мелисса Эванс

# публикации МАГАТЭ



Читайте  
бесплатно



скачать по ссылке



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



Для заказа книги просьба обращаться по адресу:  
[sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)

## ЗАГРУЗИТЬ

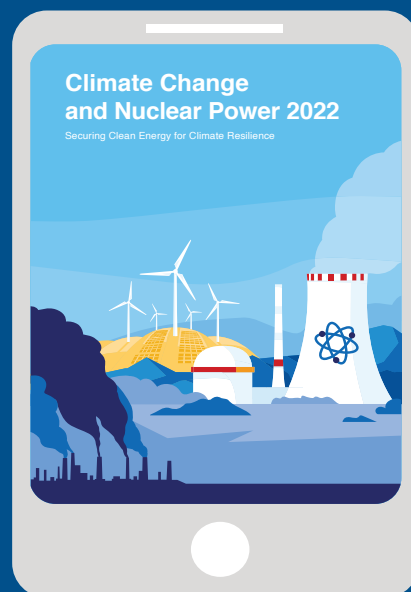
«Climate Change and Nuclear Power 2022»  
(«Изменение климата и ядерная энергетика в 2022 году»)

и другие публикации МАГАТЭ, посвященные инновационным решениям для мира без выбросов:

«Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment»  
(«Технологическая дорожная карта технологий для внедрения малых модульных реакторов»)

«Nuclear–Renewable Hybrid Energy Systems»  
(«Гибридные энергетические системы на основе ядерной и возобновляемой энергии»)

«Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors»  
(«Преимущества и проблемы малых модульных реакторов на быстрых нейтронах»)



[www.iaea.org/ru/bulletin/64-3](http://www.iaea.org/ru/bulletin/64-3)



# Сотрудничайте с нами

для создания энергетических систем  
с нулевым уровнем выбросов

ATOMS4  
NETZERO

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

[www.iaea.org/ru/Atoms4NetZero](http://www.iaea.org/ru/Atoms4NetZero)





# SCIENTIFIC FORUM

NUCLEAR ENERGY FOR CLIMATE

26 – 27 СЕНТЯБРЯ 2023 ГОДА

СМОТРИТЕ И УЗНАЙТЕ БОЛЬШЕ



[atoms.iaea.org/SciFoNetZero](https://atoms.iaea.org/SciFoNetZero)

Читайте Бюллетень МАГАТЭ в интернете по адресу  
[www.iaea.org/ru/bulletin](https://www.iaea.org/ru/bulletin)

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

или на наших страницах:

