

# БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

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

## ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ



Роботы, искусственный интеллект и трехмерные модели: как прорывы в высоких технологиях помогают при выводе ядерных объектов из эксплуатации, стр. 14

Учет требований по выводу из эксплуатации при проектировании: как при проектировании усовершенствованных реакторов учитываются требования по выводу из эксплуатации, стр. 16

Как экономика замкнутого цикла влияет на вывод ядерных установок из эксплуатации, стр. 18



## БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации  
и коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

А/я 100, 1400 Вена, Австрия

Тел.: (43-1) 2600-0

iaebulletin@iaea.org

Ответственный редактор: Эстель Маре

Ответственный редактор: Эмма Миджели

Дизайн: Риту Кенн

Инфографика: Адриана Варгас Терронес

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по адресу:

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

Выдержки из материалов МАГАТЭ, содержащихся в Бюллетене МАГАТЭ, могут свободно использоваться при условии указания на их источник. Если указано, что автор материалов не является сотрудником МАГАТЭ, то разрешение на повторную публикацию материала с иной целью, чем простое ознакомление, следует спрашивать 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 сайте:



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

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

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

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

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

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

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

# Решение задач, связанных с выводом из эксплуатации

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

Все больше стран обращаются к ядерной энергии для укрепления энергетической безопасности и смягчения последствий изменения климата, поэтому интерес к успешному решению проблем, связанных с выводом из эксплуатации ядерных установок, будет только расти. Залог успеха в этой области — упреждающее планирование.

Сегодня в мире строится 56 реакторов, а многие страны приступают к реализации планов по расширению своего парка атомных электростанций или разрабатывают свою первую ядерно-энергетическую программу.

В вопросах, связанных с окончанием срока службы ядерных реакторов, ключевую роль сегодня играют заблаговременное планирование и инновации. Новые атомные электростанции, включая электростанции с малыми модульными реакторами (ММР), проектируются с учетом перспективы их вывода из эксплуатации. Другими словами, проектировщики заранее, еще до начала строительства планируют, как будет проводиться демонтаж ядерных энергетических реакторов.

МАГАТЭ играет уникальную роль мирового масштаба, содействуя внедрению новых ядерных технологий и дальнейшей гармонизации регулирующих положений с целью обеспечить безопасный и эффективный вывод из эксплуатации, когда придет время.

К 2050 году начнется вывод из эксплуатации почти половины из 423 ядерных энергетических реакторов, вырабатывающих сегодня электроэнергию по всему миру. В каждом случае для завершения всех работ по выводу из эксплуатации может потребоваться 20 и более лет.

МАГАТЭ оказывает странам помощь в обеспечении того, чтобы работы по выводу из эксплуатации проводились с соблюдением соответствующих технических и регулирующих требований, предлагает нормы безопасности и способствует обмену передовым опытом, проводя семинары-практикумы, форумы и миссии и выпуская публикации.

Вывод из эксплуатации является отражением обязательства и стремления добиться замкнутого промышленного и ядерного цикла. Больше материалов удастся переработать, что позволяет экономить средства и время. Новые разработки в таких технологических областях, как наука о данных, искусственный интеллект, робототехника и БПЛА, способствуют повышению эффективности и безопасности работ по выводу из эксплуатации.

МАГАТЭ организует обмен инновационными решениями и опытом успешной реализации проектов по выводу из эксплуатации, в том числе через Международную сеть по выводу из эксплуатации. Оно также играет важную роль в обеспечении безопасности даже в сложных условиях. В ходе ликвидации последствий произошедшей в

2011 году аварии на АЭС «Фукусима-дайти» применялись инновационные решения, такие как картирование с помощью мюонов космических лучей для определения местонахождения поврежденных топливных элементов, строительство подземной стены из замороженного грунта для предотвращения просачивания загрязненной воды внутрь зданий реакторных установок, а также использование робототехники для проведения работ в труднодоступных местах. Эти инновации способствовали не только повышению эффективности, но и снижению рисков для работников, населения и окружающей среды.

Безопасность крайне важна, но есть и другие соображения. Ключевым аспектом вывода из эксплуатации являются гарантии. При перемещении и захоронении отработавшего топлива инспекторы МАГАТЭ проводят мероприятия по проверке с целью удостовериться, что материал, использовавшийся на атомной станции, не переключается с мирного использования.

МАГАТЭ развивает и поддерживает международное сотрудничество и обмен знаниями, которые жизненно важны с учетом растущего в мире интереса к проблемам вывода из эксплуатации ядерных установок. Для того чтобы ядерная энергия могла играть полноценную и устойчивую роль в решении самых насущных мировых проблем, от смягчения последствий изменения климата и загрязнения воздуха до обеспечения энергетической безопасности и борьбы с онкологическими и сердечно-сосудистыми заболеваниями, крайне важно правильно организовать конечную стадию ядерного топливного цикла.



(Фото: МАГАТЭ)







## 1 Решение задач, связанных с выводом из эксплуатации



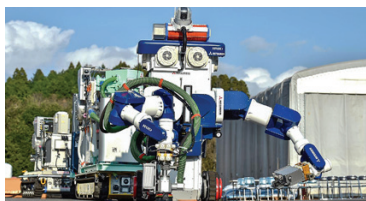
## 4 Вывод из эксплуатации ядерных объектов Ориентация на будущее с оглядкой на прошлое



## 8 Инфографика: Вывод из эксплуатации атомной электростанции



## 10 Словакия подает пример другим странам в области вывода из эксплуатации атомных электростанций



## 12 Инструменты нового поколения позволяют быстрее и эффективнее выводить из эксплуатации ядерные реакторы после тяжелых аварий



## 14 Роботы, искусственный интеллект и трехмерные модели:

как прорывы в высоких технологиях помогают при выводе ядерных объектов из эксплуатации



## 16 Учет требований по выводу из эксплуатации при проектировании:

как при проектировании усовершенствованных реакторов учитываются требования по выводу из эксплуатации



## 18 Как экономика замкнутого цикла влияет на вывод ядерных установок из эксплуатации





**20** Инфографика: **Обращение с радиоактивными отходами, образующимися в процессе вывода из эксплуатации**



**24** Отрасль вывода из эксплуатации ядерных объектов ожидает бурный рост



**26** Осуществление ядерных гарантий при выводе из эксплуатации



**28** Планирование на 60 лет вперед:

первая атомная электростанция в ОАЭ и планы по ее выводу из эксплуатации



**30** Создание стимулов для следующего поколения строить карьеру в области вывода из эксплуатации

## ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ

---

**32** Вывод из эксплуатации французского завода по переработке отработавшего топлива: комментарии эксперта

## МИРОВОЙ ОБЗОР

---

**34** Новая бизнес-модель для вывода из эксплуатации атомных электростанций

## СЕГОДНЯ В МАГАТЭ

---

**36** Новости МАГАТЭ

**40** Публикации

# Вывод из эксплуатации ядерных объектов

## Ориентация на будущее с оглядкой на прошлое

Патрик О'Салливан

Ожидается, что в течение следующих 10–20 лет количество ядерных объектов, требующих вывода из эксплуатации, значительно возрастет. Однозначной связи между продолжительностью эксплуатации объекта и сроком его постоянного останова не существует: на решение о выводе из эксплуатации могут влиять различные факторы, в том числе политического и экономического характера. Сроки могут зависеть также от вопросов технического обслуживания, затрат на переоснащение и конъюнктуры рынка электроэнергии (см. стр. 8 и 9). При этом на уровне государственной политики все чаще отдается предпочтение стратегии немедленного демонтажа в соответствии с принципами устойчивости, чтобы бремя, связанное с выводом из эксплуатации и обращением с отходами, не перекладывалось на будущее поколение. Немалое внимание также уделяется потенциалу повторного использования площадок, где размещались ядерные объекты, для строительства новых ядерных объектов или для других целей.

### Сроки и бюджет

Вывод из эксплуатации крупного ядерного объекта — сложное мероприятие, которое обычно требует значительных затрат времени и средств. Например, стоимость вывода из эксплуатации ядерного энергетического реактора, включая сопутствующие расходы на обращение с отходами, обычно составляет от 500 млн до 2 млрд долл. США, при этом вывод из эксплуатации газоохлаждаемых реакторов с графитовым замедлителем обходится значительно дороже, чем реакторов с водой под давлением или кипящих реакторов, из-за их гораздо большего размера и сложности конструкции. Обычно процесс вывода из эксплуатации занимает от 15 до 20 лет, хотя этот срок может варьироваться. Стоимость вывода из эксплуатации такого крупного объекта топливного цикла, как установка по переработке отработавшего топлива, обычно составляет около 4 млрд долл. США, а сроки вывода из эксплуатации подобных объектов могут превышать 30 лет. Вывод из эксплуатации исследовательского реактора с тепловой мощностью 10 мегаватт может стоить более 20 млн долл. США и занимать от 5 до 10 лет, хотя затраты



зависят от размера реактора, его назначения и истории эксплуатации. Однако успешные примеры показывают, что существует потенциал для более эффективного по времени и менее затратного процесса вывода из эксплуатации.

### Основные вызовы для отрасли вывода из эксплуатации

Ожидаемое увеличение числа случаев перевода ядерных объектов в состояние полного останова до 2050 года означает, что потребуются значительные ресурсы — как кадровые, так и финансовые — для реализации программ по их выводу из эксплуатации, некоторые из которых не будут завершены до конца этого столетия. Что касается коммерческих объектов, то финансирование на цели вывода из эксплуатации обычно резервируется во время эксплуатации. Однако вывод из эксплуатации большого числа объектов финансируется прямо или косвенно из государственных средств. Сроки осуществления подобных планов в таких случаях зависят от наличия или отсутствия достаточного финансирования. Для реализации программ по выводу из эксплуатации в будущем также потребуется много специалистов, обладающих высокой квалификацией. Популяризация среди молодежи работы в области вывода из эксплуатации и обращения с радиоактивными отходами — одна из наиболее важных задач, стоящих перед отраслью в настоящее время (см. стр. 30).

### Переработка и повторное использование отходов

В результате вывода из эксплуатации образуется большое количество материалов и отходов, большинство из которых не подверглись радиоактивному загрязнению. Предпринимаются усилия для того, чтобы значительная часть этих незагрязненных отходов, включая металлы, бетонные обломки и грунт, перерабатывалась или повторно использовалась в соответствии с принципами циклической экономики (см. стр. 28). В некоторых случаях щебень от снесенных строений может быть использован для заполнения пустот ниже уровня земли. Также рассматривается вопрос о более широком использовании вторичной переработки металлолома, в том числе для повторного использования в ядерной промышленности.

Большая часть загрязненного радиацией материала (обычно около 5% от общего количества материала) имеет очень низкий уровень радиоактивности и подходит для захоронения в приповерхностных хранилищах. Небольшая часть загрязненного материала (менее 5% от общего объема образовавшегося материала) не может быть освобождена от регулирующего контроля и не подходит для приповерхностного захоронения из-за высоких уровней активности и присутствия высокоактивных или долгоживущих радионуклидов; этот материал в итоге будет захоронен в подземных хранилищах (см. стр. 20,21, 22 и 23).





## Удовлетворение будущих потребностей

Учитывая масштабы будущих потребностей в сфере вывода из эксплуатации и потенциал новых и перспективных технологий для повышения эффективности вывода из эксплуатации, вполне вероятно, что в ближайшем будущем произойдут значительные изменения в плане осуществления проектов, как только подобные технологии широко распространятся и будет доказана их экономическая эффективность. В число таких перемен входят применение цифровых методов в целях планирования и оптимизации проектов, более широкое использование дистанционно управляемых инструментов, включая БПЛА и робототехнику, для дробления различных сооружений объекта, погрузочно-разгрузочных работ, измерений и обеззараживания, а также более широкая автоматизация деятельности по обращению с отходами и использование искусственного интеллекта (см. стр. 12).

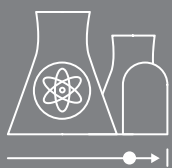
Роль системы поставок имеет решающее значение для обеспечения максимально эффективной и результативной реализации будущих проектов. Уже есть свидетельства того, что организации, входящие в систему поставок, наращивают потенциал для предоставления более широкого спектра услуг по выводу из эксплуатации в таких областях, как исследования и разработка новых технологий, выполнение инженерно-проектных работ, демонтаж и обращение с радиоактивными отходами. Новым явлением в сфере вывода из эксплуатации атомных электростанций стало формирование консорциумов, объединяющих специализированные компании для комплексной реализации проектов по выводу из эксплуатации в пределах утвержденной сметы, которые следуют согласованным подходам и принимают на себя все связанные с проектом риски (см. стр. 24).

## Что такое вывод из эксплуатации ядерных объектов?

В ядерной энергетике под «выводом из эксплуатации» понимаются все действия по окончательному останову, дезактивации, демонтажу и освобождению от регулирующего контроля ядерных объектов. Вывод из эксплуатации не может считаться завершенным, пока радиоактивные и другие опасные материалы не будут удалены с площадки, а сооружения и участки земли, которые ранее использовались в составе ядерных объектов, не будут подготовлены для использования в других целях. Наконец, для завершения процесса вывода из эксплуатации должны быть проведены радиологические обследования, показывающие, что площадка более не представляет опасности для людей и окружающей среды.



## глобальный вывод из эксплуатации в цифрах



# 420+

ядерных энергетических реакторов в эксплуатации по всему миру

В настоящее время в мире эксплуатируется около 420 ядерных энергетических реакторов, и срок эксплуатации большинства из них подходит к концу.



# 1/2

будет остановлена к 2050 году

К 2050 году может быть окончательно остановлено до половины реакторов из эксплуатируемого в настоящее время парка, соответственно, их нужно будет вывести из эксплуатации.



# ≈ 200

сняты с эксплуатации

Более двухсот ядерных энергетических реакторов уже сняты с эксплуатации, из них двадцать один реактор полностью выведен из эксплуатации.

# 222

исследовательских реактора в 53 странах

# 353

установки топливного цикла в 40 странах

вероятно будут окончательно остановлены

Кроме того, высока вероятность того, что в течение этого времени будет окончательно остановлено значительное число эксплуатируемых в настоящее время исследовательских реакторов (222 в 53 странах) и установок топливного цикла (353 в 40 странах).

# ≈ 450

исследовательских реакторов

# 150+

установок топливного цикла

были полностью выведены из эксплуатации

Около 450 исследовательских реакторов и более 150 установок топливного цикла уже полностью выведены из эксплуатации.

С начала этого века был накоплен значительный опыт вывода из эксплуатации, особенно в странах, которые приступили к реализации своих ядерно-энергетических программ в середине XX века, таких как Германия, Италия, Российская Федерация, Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки, Франция и Япония. Другие страны, включая Болгарию, Испанию, Канаду, Литву, Словакию и Украину, также имеют опыт в этой области, а в ближайшие 30 лет можно ожидать много программ в Бельгии, Индии, Китае, Республике Корея, Пакистане и Швеции.

# Вывод из эксплуатации атомной электростанции

Джоанн Лю

**В**ывод из эксплуатации — это последний этап жизненного цикла атомной электростанции. Планирование вывода из эксплуатации начинается на этапе проектирования станции, чтобы обеспечить безопасный и эффективный демонтаж и обращение с образующимися отходами без негативного воздействия на окружающую среду. После окончательного останова атомной электростанции она превращается из объекта, вырабатывающего электроэнергию, в объект, на котором ведется деятельность по подготовке и осуществлению вывода из эксплуатации, что, в частности, предполагает организационно-административные преобразования и изменения в системах безопасности станции.

## 1 ПОДГОТОВКА

Залогом успешного вывода из эксплуатации является тщательное планирование и учет всех аспектов проекта еще на этапе проектирования, включая финансирование, организационные преобразования и получение разрешений от регулирующих органов.

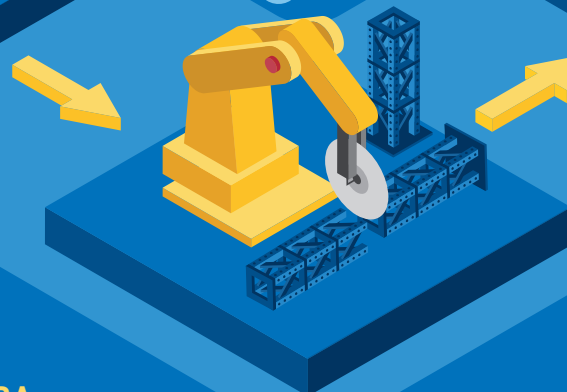
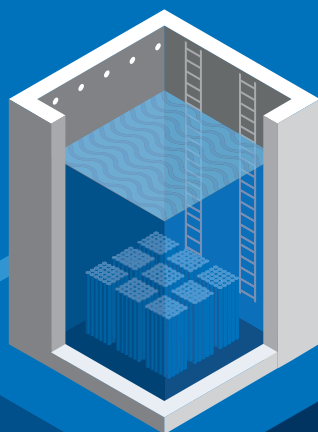


## 2 ПОСЛЕ ОСТАНОВА

Топливо извлекается из активной зоны реактора и перемещается в хранилище отработавшего топлива. **Проводится адаптация систем безопасности и обращения с отходами установки.** Определяются характеристики объекта, связанные с выводом из эксплуатации, и уточняются ожидаемые уровни излучения.

## 3 ДЕЗАКТИВАЦИЯ И ДЕМОНТАЖ

**Проводится обеззараживание элементов станции,** они измельчаются механическим способом и помещаются в упаковку для отходов или вывозятся с объекта для дальнейшей переработки.





Если демонтаж откладывается, объект стабилизируется до его проведения, в то время уровень радиоактивности естественным образом снижается. Время, которое проходит между окончательным остановом атомной электростанции и завершением вывода из эксплуатации, в разных странах варьируется и может составлять от примерно 10 до 70 и более лет.

После вывода из эксплуатации площадка может быть использована в других социально-экономических целях. Процесс вывода из эксплуатации включает следующие основные мероприятия.



## 5 ОЧИСТКА И ПОДГОТОВКА К ПОВТОРНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Площадка подготавливается к **возможному повторному использованию** путем удаления загрязненной почвы или других материалов для захоронения. Оставшиеся после демонтажа строения углубления в земле засыпаются грунтом.

## 4 СНОС

Все здания, сооружения и нерадиоактивные компоненты разбираются на части, сортируются и перерабатываются в максимально возможной степени. **Радиоактивные отходы обрабатываются отдельно и направляются на хранение или захоронение.**

## 6 ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ И ВЫВЕДЕНИЕ

Детальное обследование площадки позволяет регулирующему органу убедиться в том, что согласованные **уровни очистки были достигнуты**: это позволяет освободить участок от регулирующего контроля и **использовать его в других целях.**

# Словакия подает пример другим странам в области вывода из эксплуатации атомных электростанций

Михаэль Амди Мадсен

Когда в 2004 году Словакия вступила в Европейский союз (ЕС), она обязалась выполнить важное условие, касающееся ядерной безопасности: страна должна была остановить и вывести из эксплуатации реакторы атомной электростанции «Богунце V1». Эти реакторы, еще советских времен, уже не соответствовали нормам ядерной безопасности того времени. Правительство Словакии взяло на себя обязательство вывести реакторы из эксплуатации, и, выполняя его, оно подало другим странам пример безопасного и эффективного вывода из эксплуатации атомных электростанций. При поддержке МАГАТЭ и Европейской комиссии Словакия сейчас делится полученным опытом в интересах других стран.

Объекты ядерной энергетики Словакии вырабатывают немногим более половины потребляемой в стране электроэнергии. Большую роль в развитии ядерной энергетики в Словакии сыграли четыре реактора на площадке в Богунце. Первый энергоблок «Богунце V1», запущенный в 1978 году, стал первым на площадке реактором с водой под давлением с конструкцией ВВЭР 440 V230 (водо-водяной энергетический реактор). Это была одна из самых ранних версий «водо-водяных энергетических реакторов», разработанных в СССР. Однако из-за особенностей конструкции защитной оболочки первого реактора наблюдался повышенный риск разрыва трубопроводов большого диаметра по сравнению с более поздними, усовершенствованными конструкциями.

Елена Миколайчук, руководитель Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами МАГАТЭ, тесно взаимодействовала со специалистами словацкой государственной компании по выводу из эксплуатации ядерных установок ЯВИС (JAVIS) в ходе реализации проекта по выводу из эксплуатации АЭС «Богунце V1». «На протяжении всего периода вывода из эксплуатации компания ЯВИС применяла инновационные цифровые инструменты, чтобы обеспечить безопасность и эффективность процесса. Эти инструменты сейчас используются в проектах по выводу из эксплуатации по всему миру», — отметила г-жа Миколайчук.

В частности, речь идет о виртуальном и симуляционном моделировании. С помощью симуляционного моделирования инженеры разработали процедуры для извлечения корпуса реактора, который был помещен в бетонную шахту реактора, а затем для его перемещения и погружения в бассейн с водой, где его можно было безопасно разрезать на части для дальнейшей упаковки в целях безопасного хранения.

Ева Храснова, руководитель проекта в ЯВИС, сообщила, что в ходе реализации проекта механические режущие инструменты, такие как ленточные и дисковые пилы, безопасно и эффективно применялись под водой для разделения на фрагменты радиоактивных компонентов первого контура реакторов ВВЭР-440. Она добавила,





что по опыту чрезвычайно важным с точки зрения последующего эффективного обращения с отходами является применение комплекса методов дезактивации — химических, электрохимических и ультразвуковых, а также механических методов, таких как пескоструйная обработка и измельчение.

«При выводе из эксплуатации АЭС «Богунце V1» профильные специалисты получили ценный практический опыт, — отметила Миколайчук. — Это относится к самым разным вопросам, от поиска способов экономии площадей и средств за счет повторного использования зданий для хранения до высокой степени переработки стали, металла и бетона в соответствии с принципами циклической экономики».

Работы по выводу из эксплуатации «Богунце V1», как ожидается, продлятся до 2027 года. Проект, расходы на реализацию которого могут составить 1,239 млрд евро, осуществляется при финансовой поддержке ЕС и Европейского банка реконструкции и развития.

Признавая достижения компании ЯВИС в выводе из эксплуатации «Богунце V1», а также стремясь содействовать реализации подобных проектов по всему миру, в марте 2021 года МАГАТЭ предоставило компании статус центра сотрудничества. В качестве центра сотрудничества по выводу из эксплуатации ядерных установок и обращению с радиоактивными отходами ЯВИС в координации с МАГАТЭ делится своим опытом с другими заинтересованными сторонами.

«В Богунце мы можем продемонстрировать технический прогресс и обеспечить безопасность в таких областях, как определение физических и радиологических характеристик, дезактивация, демонтаж, снос и обращение с отходами, — сказал генеральный директор ЯВИС Павол Штуллер на церемонии подписания соглашения о

предоставлении статуса центра сотрудничества, которая состоялась в Вене, Австрия. — Наше сотрудничество с МАГАТЭ сосредоточено на уже выполненных и запланированных работах, и оно будет расширяться по мере развития центра сотрудничества в ближайшие годы».

Партнерство между МАГАТЭ и ЯВИС уже приносит плоды: в мае 2022 года в Трнаве, Словакия, МАГАТЭ организовало международный семинар-практикум по урокам, извлеченным из осуществления проектов по выводу из эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов. В ходе мероприятия специалисты ЯВИС поделились опытом вывода из эксплуатации с экспертами из Армении, Бельгии, Болгарии, Венгрии, Италии, Китая, Норвегии, Турции, Узбекистана, Финляндии, Чешской Республики, а также представителями ЕБРР и ЕК.

«Некоторые из этих стран в настоящее время эксплуатируют реакторы ВВЭР и планируют их вывод из эксплуатации, а другие только приступают к реализации ядерно-энергетических программ или строят ядерные объекты и уже принимают во внимание свои долгосрочные потребности в области вывода из эксплуатации, — говорит Миколайчук. — Мы наблюдаем в ядерной сфере переход к более ответственному и долгосрочному планированию, когда вопросы вывода из эксплуатации и сопутствующие проблемы учитываются с самого начала. Опыт работы компании ЯВИС на «Богунце V1» помогает в этом».

**В групповой научной командировке в Трнаву и на АЭС «Богунце» в Словакии приняли участие эксперты из Венгрии, Греции, Грузии, Литвы, России, Словении и Украины. 11–14 октября 2011 года.**

(Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)





# Инструменты нового поколения позволяют быстрее и эффективнее выводить из эксплуатации ядерные реакторы после тяжелых аварий

Наяна Джаяраджан

Уже через несколько дней после самого мощного землетрясения, когда-либо зарегистрированного в Японии, стало очевидно, что энергоблоки с 1 по электростанции (АЭС) «Фукусима-дайти» будут остановлены навсегда. 11 марта 2011 года огромные волны вызванного землетрясением цунами прорвали береговые защитные сооружения Японии, включая периметр АЭС, причинив значительный ущерб. Наводнение вывело из строя аварийные генераторы, что привело к перегреву ядерного топлива в трех реакторных установках и частичному расплавлению активных зон. Из-за утечки водорода на АЭС также произошло несколько взрывов, которые повредили здания и привели к выбросу радиоактивных материалов. Из префектуры Фукусима были эвакуированы более 150 000 человек, часть ее территории была объявлена властями запретной зоной. Однако даже после того, как острая фаза вызванного цунами кризиса была пройдена, предстояло решить не менее сложную задачу — вывод из эксплуатации сильно поврежденной станции.

Вывод из эксплуатации ядерной установки после тяжелой аварии сопряжен со многими сложностями и, по сравнению с выводом из эксплуатации после планового останова, часто требует применения особых подходов, методов и практик. Важнейшей проблемой является обеспечение радиационной безопасности при проведении всего комплекса работ. Одно из самых ответственных направлений работы при выводе из эксплуатации поврежденного реактора — это удаление отработавшего и поврежденного топлива.

При аварии на АЭС «Фукусима-дайти» часть ядерного топлива расплавилась и попала в нижние секции защитной оболочки реакторных зданий первого, второго и третьего энергоблоков. Из-за высокого уровня радиации внутри защитной оболочки люди не могли добраться до зоны вблизи реактора. Специалисты столкнулись с серьезной проблемой: как удалить поврежденное топливо, если его точное местонахождение неизвестно?

В этом им помог метод картирования с помощью мюонов космических лучей, который впервые был применен более шестидесяти лет назад и с тех пор используется в различных областях, от картирования внутренней поверхности вулканов и древнеегипетских пирамид до обнаружения ядерных материалов в транспортных контейнерах. Мюонные детекторы обнаруживают и отслеживают проходящие через

материалы высокоэнергетические субатомные частицы, фиксируя изменения в их траектории для определения плотности материала. Ядерные материалы, такие как уран и плутоний, обладают очень высокой плотностью и, следовательно, относительно легко определяются с помощью этих устройств.

На АЭС «Фукусима-дайти» была установлена аппаратура для регистрации потока мюонов космических лучей, что позволило оценить местоположение и состояние обломков топлива в активных зонах реакторов. В 2015 году японские эксперты разработали модифицированный метод, позволяющий обнаруживать обломки размером всего около 30 сантиметров. Этот метод был использован для анализа состояния поврежденного топлива в реакторе первого блока АЭС «Фукусима-дайти» — что стало важным предварительным условием для начала вывода из эксплуатации.

Это лишь один из многих примеров того, как инновационные технологии применяются для решения уникальных и непредвиденных задач, связанных с выводом из эксплуатации и восстановлением окружающей среды после аварии.

«Последствия аварии всегда непредсказуемы, и существующая организационная и техническая инфраструктура, а также имеющиеся технологии могут оказаться непригодными или недостаточными для удовлетворения требований по ликвидации последствий аварии. Часто при выводе из эксплуатации поврежденных ядерных объектов технические подходы и соответствующее оборудование разрабатываются для каждого конкретного случая, — поясняет Владимир Михаль, эксперт МАГАТЭ по вопросам вывода из эксплуатации, который был одним из руководителей проекта по документированию и анализу процесса вывода из эксплуатации и реабилитации поврежденных ядерных установок («Международный проект по управлению выводом из эксплуатации и реабилитацией поврежденных ядерных установок»), так называемый проект ДАРОД). — Во многих случаях, как в примере с мюонным картированием, эти технологии нашли более широкое применение не только в области вывода из эксплуатации, но и в других отраслях».

Другим ярким примером является сооружение нового безопасного конфайнмента над реакторным зданием четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС на Украине

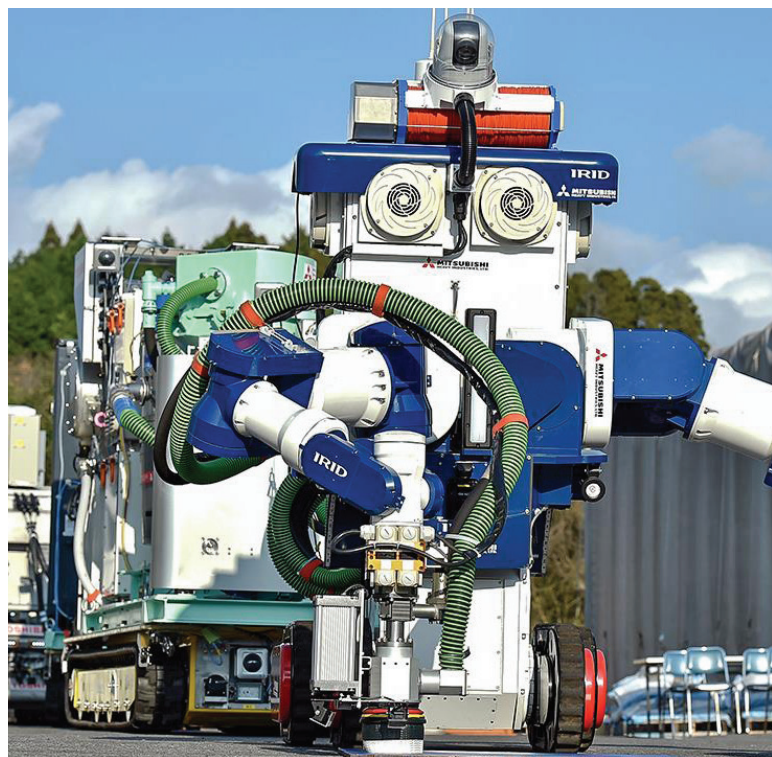
в период с 2016 по 2019 год. Конфайнмент, который заменил временный объект «Укрытие», построенный после аварии 1986 года, является самым большим наземным передвижным сооружением в мире. Он рассчитан на столетний срок службы и может выдержать ветер ураганной силы. Новый конфайнмент возводился примерно в 180 метрах к западу от поврежденного четвертого энергоблока. При его строительстве и последующем перемещении использовались самые современные методы строительной инженерии.

Как отмечает Валерий Сейда, исполняющий обязанности генерального директора Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС», «новый безопасный конфайнмент не просто предотвращает попадание радиоактивного материала в окружающую среду, он будет способствовать выводу из эксплуатации в будущем». Безопасный конфайнмент сконструирован таким образом, чтобы предотвратить радиоактивное загрязнение, защитить внутренние элементы реактора и облегчить проведение работ по выводу из эксплуатации. Для решения последней задачи в конструкции конфайнмента предусмотрены два современных крана с дистанционным управлением. Они установлены непосредственно под крышей и предназначены для работ по выводу из эксплуатации четвертого энергоблока, во время которых персонал и окружающая среда будут ограждены от воздействия радиации.

На АЭС «Фукусима-дайити» было использовано хорошо зарекомендовавшее себя инженерное решение — создание подземного ограждения из замороженного грунта для предотвращения проникновения грунтовых вод на площадку и смешивания их с уже загрязненной водой внутри реакторных зданий. Путем замораживания грунтов, в результате чего они становились непроницаемыми для грунтовых вод, была сооружена стена протяженностью 1500 метров; это решение позволило уменьшить общий объем загрязненной воды, нуждающейся в очистке.

При выводе из эксплуатации сегодня применяются передовые технологии дистанционного управления и робототехники, что делает возможным проведение работ в зонах с высоким уровнем радиации. Например, на АЭС «Фукусима-дайити» роботы используются для радиационного мониторинга и измерения интенсивности излучения, проведения обследований, дезактивации и подготовки к удалению обломков топлива.

«Дистанционно управляемые роботы, оснащенные приборами для измерения/визуализации радиационного загрязнения, являются приоритетной областью исследований и разработок, поскольку помогают свести к минимуму облучение работающего на площадке персонала и систематически продвигаться вперед в процессе вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайити», — констатирует исполнительный директор Японского агентства по атомной энергии Кентаро Фунаки. Среди широкого спектра финансируемых



**Робот-дезактиватор, разработанный для обеспечения мероприятий по выводу из эксплуатации на АЭС «Фукусима-дайити»**

(Фото: Международный исследовательский институт по выводу из эксплуатации ядерных объектов (IRID), Япония)

правительством исследований и разработок г-н Фунаки особо выделяет совместные международные проекты как одно из ключевых направлений деятельности. «В настоящее время ведутся активные работы по трехмерной визуализации радиоактивных горячих пятен вблизи первого и второго энергоблоков АЭС «Фукусима-дайити». Благодаря использованию результатов национальных и международных совместных исследований был достигнут большой успех, и эти усилия будут предприниматься и в дальнейшем», — говорит он.

Использование неядерных технологий в условиях радиации сопряжено со многими проблемами, включая значительные затраты на разработку, особенно из-за наличия факторов облучения и неопределенности относительно точных условий, в которых будет работать оборудование. Однако достижения в области экранирования электропроводки и других критически важных компонентов, наряду с разработкой оборудования, устойчивого к радиации, позволяют безопасно и эффективно применять робототехнику в этих сложных условиях. Кроме того, для сканирования внутренних помещений в таких условиях среды, которые нередко исключают возможность доступа человека, применяются лазерные технологии, что обеспечивает защиту здоровья и безопасность работников. «Эти достижения значительно расширяют возможности безопасного и эффективного демонтажа объектов, поврежденных в результате тяжелой ядерной аварии, даже в условиях самой сложной обстановки», — резюмирует г-н Михаль.

# Роботы, искусственный интеллект и трехмерные модели

## Как прорывы в высоких технологиях помогают при выводе ядерных объектов из эксплуатации

Джеффри Донован

Роботы, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), искусственный интеллект (ИИ) и другие новые цифровые технологии, которые уже помогают в реализации проектов по выводу из эксплуатации ядерных объектов по всему миру, будут играть все более заметную роль в этой области, поскольку все больше стран решают демонтировать свои выведенные из эксплуатации ядерные объекты.

Для эффективного осуществления таких проектов и снижения рисков, в том числе финансовых и радиологических, страны обращаются к высокотехнологичным инструментам виртуальной реальности и трехмерного моделирования. Судя по всему, в ближайшие годы по мере постепенного вывода из эксплуатации нескольких стареющих атомных электростанций и других ядерных установок эта тенденция будет только усиливаться.

«Будь то не боящиеся радиации роботы, которые устраняют последствия аварий, таких, например, как авария на АЭС “Фукусима-дайти” в Японии, или технологии трехмерного моделирования, используемые для планирования демонтажных работ на закрытых электростанциях, отрасль вывода из эксплуатации ядерных объектов все чаще оказывается в авангарде технологических инноваций, — говорит Михаил Чудаков, заместитель Генерального директора и руководитель Департамента ядерной энергетики МАГАТЭ. — Эти технологии позволяют получить важнейшие данные для планирования и реализации проектов, особенно в ситуациях, которые могут быть рискованными для людей, тем самым помогая обеспечить безопасное и эффективное выполнение этих работ».

Во всех регионах мира передовые технологии применяются для решения уникальных проблем и продвижения проектов по выводу из эксплуатации. Одним из пионеров в этой области является норвежский Институт энергетических технологий (IFE), который в 2019 году стал центром сотрудничества МАГАТЭ, специализирующимся на поддержке деятельности МАГАТЭ и государств-членов в области цифровизации управления знаниями при выводе из эксплуатации ядерных объектов. IFE одним из первых начал использовать системы виртуальной реальности при выполнении работ по техническому обслуживанию и выводу из эксплуатации на ядерных объектах.

«Эти технологии, включая методы визуализации радиационного загрязнения, используются для обучения персонала, чтобы работники имели представление о радиологических условиях, — говорит Иштван Шоке, руководитель исследовательских проектов в IFE. — Основная специализация IFE — интеграция трехмерных цифровых моделей ядерных объектов с физическими моделями и элементами ИИ, включая модели радиационной физики с динамикой в реальном времени. Это означает, что за визуализацией радиационного загрязнения стоит реальная физика, а соответствующие модели могут рассчитать, например, уровни радиации на местности вблизи подлежащего демонтажу оборудования и визуализировать радиационное загрязнение в целях планирования и обучения». В настоящее время эти методы получают все большее распространение при реализации программ вывода из эксплуатации, в том числе энергетических и исследовательских реакторов, а также при демонтаже установок топливного цикла.

IFE вносит вклад в развитие международного сотрудничества, направленного на создание модульных, интегрированных систем управления информацией, которые применялись бы на протяжении всего процесса вывода из эксплуатации. Это предполагает создание интегрированной системы на основе трехмерного сканирования и автоматизированного проектирования (CAD) или создание моделей управления информацией о здании (BIM), содержащих радиологические и другие данные. Такая модель управляет всей имеющейся информацией, интегрирована с моделями радиологической физики и другими системами, и объединяет их все в единую систему, которая обеспечивает принцип снижения радиологического риска до «разумно достижимого низкого уровня» (ALARA).

Технологии цифрового и трехмерного моделирования также успешно использовались в проектах по выводу из эксплуатации в Италии и Словакии. Итальянская государственная компания «Согин», занимающаяся выводом установок из эксплуатации и обращением с радиоактивными отходами, использовала трехмерное моделирование при подготовке к демонтажу реакторов и обращении с образующимися отходами. Словацкая компания по атомной энергии и выводу из эксплуатации ЯВИС применяла трехмерное моделирование при демонтаже компонентов энергетических реакторов A1 и V1 АЭС «Богунце». Как и IFE, «Согин» и ЯВИС, будучи центрами сотрудничества МАГАТЭ со специализацией



на выводе установок из эксплуатации и обращении с радиоактивными отходами, делятся своими знаниями и опытом с мировым ядерным сообществом.

Применение робототехники также набирает обороты. Эта технология помогает снизить риск для персонала, позволяя ему не приближаться к инструментам, используемым для манипуляций с компонентами, а также повысить эффективность, поскольку автономные и дистанционно управляемые роботы лучше справляются с работой в труднодоступных местах. Мобильные роботы с датчиками и трехмерными системами все чаще используются для сканирования объектов и сбора данных, которые могут быть использованы для построения трехмерных моделей. «Одна из самых насущных задач, стоящих сейчас перед отраслью, — это использование искусственного интеллекта для создания на основе трехмерных изображений, которые сейчас очень легко получать путем сканирования, “умных” BIM-моделей, — говорит Шоке. — Смежная задача — создание “цифровых копий” объектов, которые могут использоваться при выводе из эксплуатации сложных систем, а также для систематизации знаний об объекте на протяжении всего его жизненного цикла».

В 2022 году МАГАТЭ объявило о начале реализации глобальной инициативы, направленной на повышение роли новых и прорывных технологий в выводе из эксплуатации ядерных объектов. Эта инициатива, совместный проект организаций, участвующих в планировании или реализации вывода из эксплуатации и сопутствующей исследовательской деятельности, направлена на распространение информации о новых и прорывных цифровых инструментах и технологиях, используемых в управлении данными, планировании, лицензировании и осуществлении вывода из эксплуатации.

«Цель проекта — задействовать экспертные знания и опыт различных организаций, занимающихся выводом из эксплуатации, чтобы в полной мере реализовать потенциал новых и прорывных технологий», — говорит Елена Миколайчук, руководитель Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами МАГАТЭ. В 2025 году МАГАТЭ планирует опубликовать отчет, содержащий информацию о результатах проекта и об опыте, полученном в нескольких странах, с целью дальнейшей поддержки успешных проектов по выводу из эксплуатации по всему миру.

**«Робот-собака»: автономный шагающий робот составляет карту радиационной обстановки вокруг четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС.** (Фото: Boston Dynamics, США)



# Учет требований по выводу из эксплуатации при проектировании

## Как при проектировании усовершенствованных реакторов учитываются требования по выводу их эксплуатации

Джоанн Лю

Планирование действий по окончании срока службы объекта на его начальном этапе может быть не особенно интересным или приоритетным вопросом. Однако, когда речь идет о жизненном цикле ядерной установки, важность завершающего этапа ее срока службы настолько велика, что побуждает проектировщиков, поставщиков и регулирующие органы решать вопросы вывода из эксплуатации заблаговременно. Такой упреждающий подход, известный как «учет требований по выводу из эксплуатации при проектировании», опирается на передовую практику и накопленный опыт и реализует концепцию «учет соответствующих требований на этапе проектирования», которая также применяется в сфере ядерной и физической безопасности и гарантий. Когда требования по выводу из эксплуатации учитываются с самого начала, уже на этапе проектирования можно внедрять решения, которые сделают вывод из эксплуатации более безопасным, эффективным и экономически выгодным.

«Принимая во внимание вопросы вывода из эксплуатации на стадии проектирования ядерной установки, мы можем оптимизировать заключительный (и обязательный) этап жизненного цикла реактора — вывод из эксплуатации», — говорит Гелена Мразова, специалист МАГАТЭ по технологиям вывода из эксплуатации. При проектировании первых поколений атомных электростанций (АЭС) упор делался на краткосрочные эксплуатационные характеристики, а выводу из эксплуатации уделялось мало внимания. Например, в проектах некоторых графитовых ядерных реакторов, построенных во Франции в 1970-х годах, вообще не было предусмотрено, как они будут демонтироваться, и сегодня их демонтаж представляет серьезную проблему.

«Существуют объекты высотой более 60 метров, диаметром 30 метров и с бетонными стенами толщиной более 5 метров, при этом в активной зоне реактора находятся тонны графита. Демонтаж этих реакторов сильно затруднен: при их проектировании вопросы вывода из эксплуатации вообще не рассматривались. Французская электроэнергетическая компания ЭДФ («Электрисите де Франс») недавно открыла Опытно-демонстрационный центр по выводу из эксплуатации графитовых реакторов (который стал также центром сотрудничества МАГАТЭ) для тестирования, совершенствования и оптимизации инновационных инструментов и технологий дистанционного управления на полномасштабных макетах

и цифровых трехмерных моделях с целью проверки осуществимости различных сценариев вывода из эксплуатации и оптимизации вывода из эксплуатации этих реакторов», — сообщила г-жа Мразова.

### Большие ожидания и возможности

Концепция учета требований по выводу из эксплуатации на этапе проектирования направлена на повышение качества планирования последовательности работ по выводу из эксплуатации, снижение риска облучения персонала и сокращение объема радиоактивных отходов, что позволит снизить нагрузку на хранилища отходов и снять часть проблем с будущими поколениями. «Эта концепция охватывает не только конструктивные решения, но и организацию рабочих процессов по планированию и осуществлению вывода из эксплуатации», — говорит Марсель Дево, директор по вопросам регулирования компании «Продиджи клин энеджи», которая разрабатывает морские и наземные передвижные АЭС. Ранее г-н Дево руководил программой рассмотрения проектов поставщиков в Комиссии Канады по ядерной безопасности (КЯБК). — Для успешного вывода из эксплуатации необходима определенность в отношении механизмов финансирования и сфер ответственности».

В мире растет интерес к малым модульным реакторам (ММР), которые представляют собой разновидность усовершенствованного ядерного реактора с ограниченной мощностью, обычно до 300 МВт (эл.) на блок. «Разработчики следующего поколения АЭС, включая ММР, имеют прекрасную возможность уже на этапе проектирования и развертывания во многом решить социальные проблемы, связанные с окончанием срока службы ядерной установки, ускорив при этом вывод из эксплуатации и снизив нагрузку на будущие поколения, связанную с отходами», — убежден г-н Дево.

Принципы учета требований по выводу из эксплуатации на этапе проектирования еще не получили повсеместного распространения, но Канада входит в число стран, которые предприняли шаги в этом перспективном направлении. При рассмотрении проектов реакторов, представляемых поставщиками, КЯБК анализирует, в какой мере требования по выводу из эксплуатации учитываются на этапе проектирования, опираясь при этом на опыт, задокументированный МАГАТЭ и Агентством по ядерной



энергии Организации экономического сотрудничества и развития. «Будущие владельцы и операторы установок в Канаде все чаще требуют от поставщиков пройти процесс рассмотрения проектов в КЯБК и представить четкий план по устранению выявленных недостатков. В отрасли есть понимание того, что вопросы окончания срока службы являются приоритетными в процессах лицензирования и экологической оценки», — считает г-н Дево.

## Вывод из эксплуатации ММР

В мире существует более 80 проектов и концепций ММР, находящихся на разных стадиях разработки. Поскольку ММР различаются по размеру, материалам и технологиям, подходы к выводу из эксплуатации этих передовых реакторов также будут различаться. «Выбор процесса вывода установки из эксплуатации будет зависеть от ее конструктивных особенностей, ее доступности и компактности, а также от планов и практики страны в области обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами», — отмечает г-жа Мразова.

Модульная конструкция ММР и различные модели их развертывания могут привести к полному пересмотру традиционной практики вывода из эксплуатации. Некоторые ММР малой мощности (микрореакторы) собираются на заводе и перевозятся на площадку в собранном виде. В конце срока службы модуль может быть возвращен на завод-изготовитель для перегрузки топлива или отправлен на объект по выводу из эксплуатации. «Такой подход позволит сократить расходы и объем работ, проводимых в месте расположения электростанции, повысить уровень ядерной и радиационной безопасности, а также будет способствовать более благожелательному отношению населения к развертыванию ММР», — полагает г-жа Мразова. — Существует также потенциал для стандартизации некоторых видов работ по выводу из эксплуатации, таких как дезактивация и демонтаж оборудования». Однако такой подход оставляет нерешенными некоторые задачи, такие как разработка специализированных инструментов для демонтажа и дистанционно управляемого погрузочно-разгрузочного оборудования.

Информация об использованных материалах, в частности о типах стали и стандартах для ее производителей, включая требования по низкому содержанию примесей



**Многие ММР спроектированы достаточно компактными, чтобы их можно было перевозить автомобильным транспортом или в грузовых контейнерах.**

(Фото: Окриджская национальная лаборатория Министерства энергетики США)

для сведения к минимуму активации, помогает правильно обращаться с отходами, образовавшимися в результате вывода из эксплуатации. Применяя концепцию учета требований по выводу из эксплуатации на этапе проектирования, можно заранее тщательно продумать состав материалов, ограничить содержание примесей и, соответственно, снизить расходы на демонтаж в конце срока службы.

«Общее правило для вывода из эксплуатации ядерных установок, включая ММР, заключается в том, что конструкция должна быть “удобной для вывода из эксплуатации”, что подчеркивает ценность ранних этапов, — говорит г-жа Мразова. — Особенности ММР, такие как их модульная конструкция и используемые материалы, должны сделать процесс их вывода из эксплуатации более эффективным и менее дорогостоящим, а также снизить по всему миру мощность ежедневной дозы облучения персонала, который будет заниматься их выводом из эксплуатации».

МАГАТЭ готовит к публикации в 2024 году документ, посвященный аспектам проектирования ММР с учетом требований по выводу из эксплуатации.

# Как экономика замкнутого цикла влияет на вывод ядерных установок из эксплуатации

Артем Власов

Традиционную линейную модель экономики — когда из добытого сырья производят промышленные товары, которые после использования выбрасывают — часто критикуют за производство большого количества отходов и загрязнений, а также за то, что она способствует изменению климата и утрате биоразнообразия. По данным международной группы экспертов по ресурсам Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде, на добычу и переработку природных ресурсов приходится около половины всех глобальных выбросов парниковых газов.

Переход от этой модели к так называемой экономике замкнутого цикла предполагает сокращение отходов и связанного с ними загрязнения окружающей среды. Это модель производства и потребления, направленная прежде всего на то, чтобы ресурсы использовались как можно дольше путем их экономии, повторного использования и утилизации.

Если при выводе ядерных установок из эксплуатации руководствоваться принципами экономики замкнутого цикла, то это может дать множество преимуществ. Вывод из эксплуатации — это комплексный процесс, который обычно длится десять и более лет и включает дезактивацию, демонтаж и снос ядерных установок, чтобы площадка могла быть освобождена от регулирующего контроля и использована повторно. Благодаря тому, что в ходе этого процесса материалы перерабатываются, образуется меньше отходов. Это дает и дополнительные преимущества: снижаются стоимость вывода из эксплуатации и риск несоблюдения сроков.

«Применяя к выводу из эксплуатации принципы экономики замкнутого цикла, мы можем сократить количество радиоактивных и нерадиоактивных отходов, подлежащих захоронению, и добывать меньше сырья, — отмечает менеджер по технологии обращения с радиоактивными отходами и выводу из эксплуатации шведского подразделения компании “Циклайф” Арне Ларссон. — Мы можем повторно использовать материалы и оборудование существующих установок, зданий и сооружений, а также способствовать тому, чтобы площадка могла вновь использоваться в других полезных целях».

Для вывода из эксплуатации были остановлены более 200 ядерных энергетических реакторов по всему миру, и ожидается, что в ближайшие десятилетия будут остановлены и выведены из эксплуатации сотни реакторов, работающих в настоящее время. В современных ядерных установках планы вывода из эксплуатации и обращения с отходами учитываются уже на этапе проектирования — еще до того, как был заложен их первый кирпич. При этом в конструкциях ядерных реакторов, построенных в 1960-х и 1970-х годах, принципы экономики замкнутого цикла не учитывались.

Однако даже старые установки можно эффективно выводить из эксплуатации, соблюдая эти принципы: до 90 процентов нерадиоактивных материалов на атомной электростанции, таких как металлы, бетон и даже рабочая одежда, могут быть использованы повторно или утилизированы. Высокорadioактивными являются только около трех процентов материалов — в основном это



отработавшее топливо, более 95 процентов которого все равно может быть переработано для получения нового топлива и побочных продуктов.

«Внедрение принципов экономики замкнутого типа может в значительной степени способствовать минимизации отходов, повышению эффективности и укреплению устойчивости, — отметил исполняющий обязанности руководителя Секции МАГАТЭ по выводу из эксплуатации и экологической реабилитации Владимир Михаль. — При выводе ядерных установок из эксплуатации образуется значительное количество материалов, которые можно утилизировать и повторно использовать в других целях».

## От шести ядерных установок до центра возобновляемой энергетики

Уже сейчас утилизация широко применяется во время работ по выводу из эксплуатации. После демонтажа крупные металлические элементы могут быть переплавлены в «новый» металл и возвращены в экономику. Детали оборудования можно повторно использовать на других действующих ядерных установках, а полученные после сноса зданий материалы, такие как бетон, можно использовать в качестве наполнителя при восстановлении площадки или в других строительных проектах, включая строительство домов и дорог. Например, когда в 2009 году был выведен из эксплуатации австралийский исследовательский реактор «Моата» в Сиднее, более 85 процентов материалов были использованы повторно или утилизированы.

Оставшиеся после вывода из эксплуатации материалы, которые не могут быть дезактивированы и очищены для повторного использования или утилизации, хранятся как радиоактивные отходы в хранилищах различных типов до тех пор, пока они не перестанут представлять опасность для людей или окружающей среды (см. стр. 22).

Существует несколько примеров перепрофилирования ядерных площадок, среди которых — атомные электростанции, исследовательские реакторы и другие установки, которые использовались в медицине или промышленности. Площадки АЭС могут быть перепрофилированы в установки по переработке и хранению отходов или исследовательские центры для подготовки эксплуатационного персонала. Площадки могут становиться промышленными зонами, а в зданиях

можно вдохнуть новую жизнь, используя их в других традиционных отраслях, что будет привлекать бизнес и создавать рабочие места.

Во французском городе Гренобль в 2012 году были успешно дезактивированы и демонтированы шесть ядерных установок, включавших три исследовательских реактора, одну лабораторию и два хранилища радиоактивных отходов. Сейчас площадка используется как центр исследований и разработок в области экологически чистых энергетических технологий и возобновляемых источников энергии, и основное внимание здесь уделяется электромобилям, аккумуляторам и водороду.

МАГАТЭ предоставляет странам, организациям и частным лицам пространство для сотрудничества и обмена знаниями и технологиями в области вывода из эксплуатации. На платформе электронного обучения МАГАТЭ размещены лекции по выводу из эксплуатации, восстановлению окружающей среды, обращению с радиоактивными отходами и отработавшим топливом.

В 2007 году была создана Международная сеть по выводу из эксплуатации (МСВЭ) МАГАТЭ — площадка для сотрудничества и взаимодействия специалистов, занимающихся выводом из эксплуатации. Кроме того, МАГАТЭ поддерживает создание потенциала в государствах-членах и содействует проведению миссий экспертов и оказанию услуг независимой экспертизы и консультирования по программам вывода из эксплуатации и другим смежным видам деятельности, таким как обращение с радиоактивными отходами и отработавшим топливом.

«Экономика замкнутого цикла — это перспективный подход, позволяющий внедрить в промышленности принципы устойчивости и безотходного производства, снизить воздействие на окружающую среду и сохранить ресурсы для будущих поколений», — отметил г-н Михаль.

**Во французском городе Гренобль раньше находилось шесть ядерных установок. После их успешного вывода из эксплуатации площадка используется как центр исследований и разработок в области возобновляемой энергии.**

(Фото: Unsplash)

# Обращение с радиоактивными отходами, образующимися в процессе вывода из эксплуатации



В рамках вывода из эксплуатации радиоактивные материалы и предметы (от защитной одежды до частей реактора) проходят процесс определения характеристик и сортировки: это делается для предотвращения/минимизации образования отходов, повторного использования и переработки материалов.

Радиоактивные материалы и предметы подлежат регулируемому контролю. Однако большинство материалов, образующихся в процессе вывода из эксплуатации, освобождаются от регулирующего контроля по причине крайне низкого уровня радиоактивности.

Радиоактивные материалы, которые не подходят для переработки, сортируются и упаковываются для временного хранения перед захоронением на специальных объектах — это последний этап обращения с радиоактивными отходами.

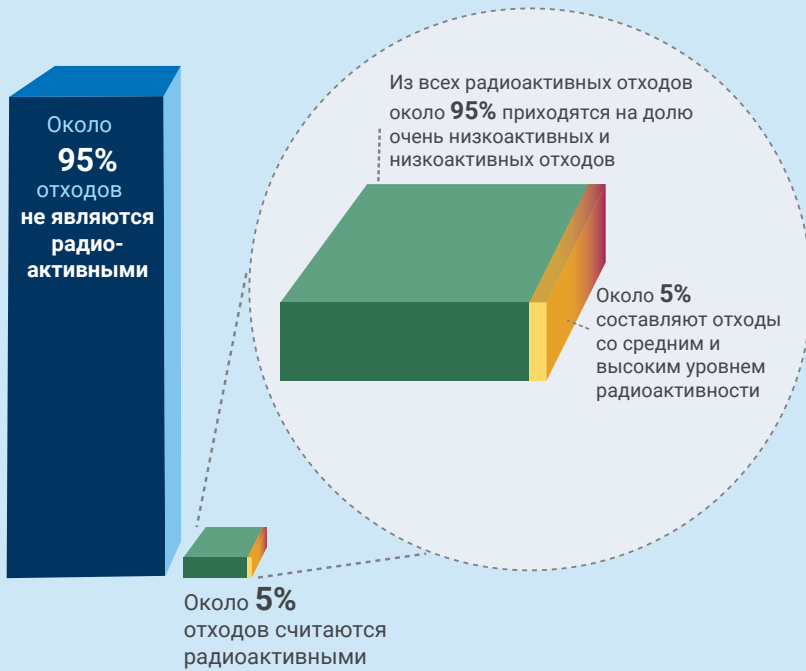
## Иерархия отходов



Приоритетной задачей является минимизация образования радиоактивных отходов.

Иерархия отходов — ключевой элемент устойчивого вывода из эксплуатации и управления отходами — определяет приоритеты деятельности по обращению с отходами. Учет в проекте требований по выводу ядерной установки из эксплуатации позволяет предотвратить и минимизировать образование отходов.

## Типы отходов, образующихся при выводе из эксплуатации



В ходе вывода из эксплуатации образуются разнообразные отходы, сильно различающиеся по количеству и степени радиоактивности. Лишь около 5% материалов, образующихся в процессе вывода из эксплуатации атомной электростанции, являются настолько радиоактивными, что с ними необходимо обращаться как с радиоактивными отходами (см. классификацию на рисунке ниже).

Чтобы уменьшить количество радиоактивных отходов, компоненты объекта часто подвергаются дезактивации.

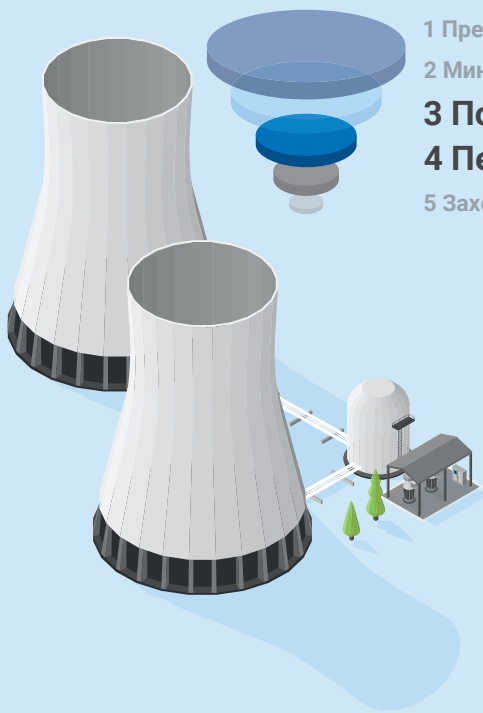


## Классы и типы радиоактивных отходов

ОНАО	НАО	САО	ВАО
<p><b>Очень низкоактивные отходы</b></p> <p>Бетон, почва, щебень...</p>	<p><b>Низкоактивные отходы</b></p> <p>Средства индивидуальной защиты, ветошь, вспомогательные системы для дезактивации и демонтажа конструкций...</p>	<p><b>Среднеактивные отходы</b></p> <p>Компоненты первого контура реактора, сильно загрязненные металлы...</p>	<p><b>Высокоактивные отходы</b></p> <p>Отработавшее топливо, фрагменты оболочки отработавшего топлива, остекленные отходы переработки топлива...</p>
<p>Захоронение возможно в приповерхностных сооружениях с земляной засыпкой.</p>	<p>Захоронение в приповерхностных сооружениях; требуют изоляции и удержания в течение нескольких сотен лет.</p>	<p>Захоронение на большой глубине в геологических хранилищах; требуют изоляции и удержания в течение нескольких тысяч лет.</p>	<p>Захоронение в глубинных геологических формациях на глубине нескольких сотен метров; требуют изоляции и удержания в течение нескольких тысяч лет.</p>
<p>Пункты захоронения радиоактивных отходов обеспечивают изоляцию и удержание с помощью множественных барьеров и функций безопасности.</p>			



## Повторное использование и переработка материалов, освобожденных от регулирующего контроля



- 1 Предотвращение образования отходов
- 2 Минимизация образования отходов
- 3 Повторное использование**
- 4 Переработка**
- 5 Захоронение



**Значительный объем материала** повторно используется или перерабатывается после дезактивации или переплавки.

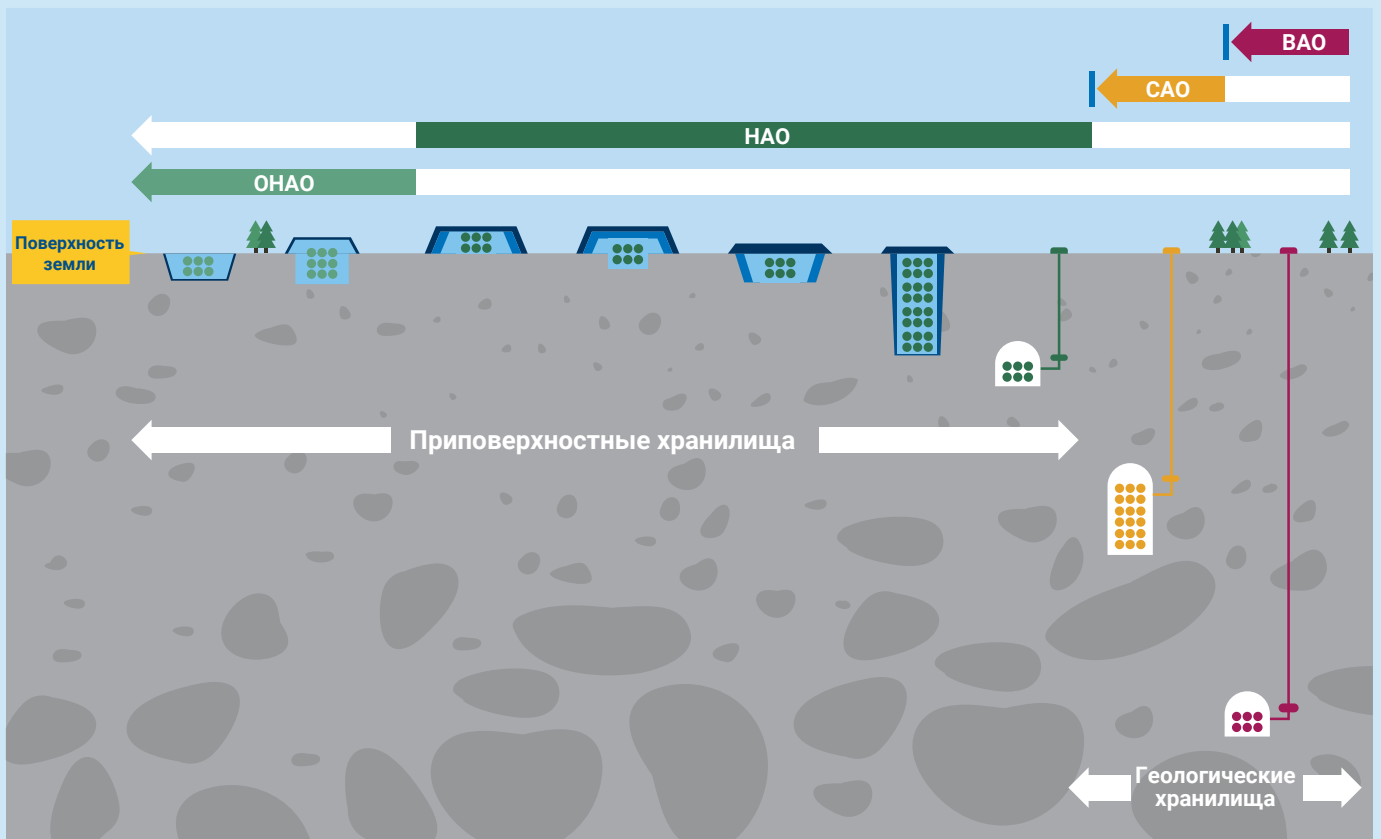
Металл может быть обеззаражен и переработан, например, для производства стали.



Бетонные обломки и щебень могут быть использованы повторно, например, для строительства дорог.



## Варианты захоронения в зависимости от класса радиоактивных отходов



## Как осуществляется безопасное обращение с радиоактивными отходами?



Благодаря наличию нескольких уровней защиты, население и окружающая среда ограждены от опасностей и рисков, связанных с воздействием ионизирующего излучения (в том числе от радиоактивных отходов).



Доступ к объектам, где осуществляется обращение с радиоактивными отходами, строго контролируется.



Следуя строгим процедурам, оператор обеспечивает безопасность обращения с радиоактивными отходами под надзором независимых регулирующих органов и несет за это главную ответственность.



Обращение с радиоактивными отходами поручено квалифицированному и опытному персоналу.



Регулирующие органы выдают официальные разрешения на деятельность по обращению с отходами и эксплуатацию соответствующих объектов с учетом обоснования безопасности и всесторонних оценок безопасности.

Исследования, разработки и демонстрация **безопасного захоронения радиоактивных отходов** проводятся уже в течение нескольких десятилетий.



## Как безопасное обращение с радиоактивными отходами способствует достижению Целей ООН в области устойчивого развития (ЦУР)?



- ▲ Безопасное обращение с радиоактивными отходами, управление выбросами в окружающую среду, выводом из эксплуатации и восстановительными мероприятиями защищает экосистемы суши и морские экосистемы.
- ▲ Безопасное обращение с радиоактивными отходами, управление выбросами в окружающую среду, выводом из эксплуатации и восстановительными мероприятиями способствует возвращению в оборот и повторному использованию материалов, объектов и площадок.
- ▲ Ядерные технологии отвечают критериям устойчивости, когда они безопасны на протяжении всего своего жизненного цикла, предусматривающего безопасное обращение с радиоактивными отходами, управление выбросами в окружающую среду и вывод из эксплуатации.
- ▲ Устойчивое использование ядерных технологий напрямую способствует достижению девяти ЦУР.

# Отрасль вывода из эксплуатации ядерных объектов ожидает бурный рост

Джоанн Бердж и Эмма Мидгли

По мере того как многие атомные электростанции (АЭС) по всему миру приближаются к концу срока эксплуатации, формируется новая отрасль, предприятия которой специализируются на выводе из эксплуатации ядерных объектов. По окончании срока службы необходимо выводить из эксплуатации не только АЭС, но и многие другие объекты ядерного топливного цикла, такие как исследовательские центры, объекты по переработке отработавшего топлива и по обращению с отходами. Всего до 2050 года на вывод из эксплуатации во всем мире будет израсходовано несколько сотен миллиардов долларов, и предприятия и инвесторы уже занимают позиции на этом рынке.

Всего в мире сегодня эксплуатируются около 420 ядерных энергетических реакторов. Ожидается, что к 2050 году начнется процесс вывода из эксплуатации около 200 из них. Помимо работ по выводу из эксплуатации реакторов (такие проекты могут длиться более 20 лет), опыт в области вывода из эксплуатации также необходим при проектировании новых ядерных объектов. В настоящее время в мире строится более 50 реакторов. В каждом случае перед началом строительства необходимо было разработать план вывода из эксплуатации. Одним словом, отрасль вывода из эксплуатации имеет отличные долгосрочные перспективы.

Ожидается, что основными поставщиками услуг для отрасли вывода из эксплуатации станут компании, занимающиеся ядерной техникой, строительством, демонтажем и обращением с отходами. Они будут выполнять задачи по дезактивации и демонтажу ядерных объектов, а также по восстановлению площадок для безопасного использования в будущем на основе принципов устойчивости и с учетом социально-экономических факторов. При демонтаже ядерных объектов необходимо сводить к минимуму воздействие на окружающую среду, как того требуют принципы циклической экономики, в том числе рециклировать металлические элементы, провода и кабели, а также отделять чистый бетон от бетона со стальной арматурой. Для выполнения этих сложных задач ядерной отрасли требуются высококвалифицированные кадры, численность которых необходимо увеличивать, чтобы не допустить кадрового голода в будущем.

Для накопления знаний и развития отрасли МАГАТЭ организовало Международную сеть по выводу из эксплуатации, в рамках которой организации и частные лица, занимающиеся выводом из эксплуатации и демонтажем ядерных объектов, обмениваются

опытом и извлеченными уроками. МАГАТЭ помогает странам в планировании и осуществлении вывода из эксплуатации, предоставляя консультации по вопросам безопасности, юридическим и техническим вопросам, а также способствуя обмену знаниями путем проведения учебных курсов и семинаров-практикумов. Агентство играет важную роль в развитии широкого международного сотрудничества, а также в проведении технических обзоров для выявления передовой практики и обобщения опыта.

«В Сеть входят организации и частные лица, занимающиеся выводом из эксплуатации и демонтажем ядерных объектов, — говорит Татьяна Килочицкая, специалист МАГАТЭ по выводу из эксплуатации. — Она помогает распространять информацию, касающуюся процесса вывода из эксплуатации, и обмениваться передовой и инновационной практикой, что способствует развитию сотрудничества и координации деятельности в отрасли вывода из эксплуатации в мировом масштабе».

Одной из организаций, делящихся своим опытом на благо других, является компания, работающая на площадке Селлафилд в Соединенном Королевстве. На площадке находятся различные ядерные объекты, такие как ядерные энергетические реакторы, объекты по переработке топлива и обращению с отходами. Атомная электростанция «Колдер Холл» на площадке в Селлафилде заработала в 1950-х годах и стала первой коммерческой АЭС в мире. Учитывая скопление стареющих ядерных объектов на небольшой площади, специалистам по выводу из эксплуатации пришлось разрабатывать инновационные и уникальные решения, в том числе с использованием методов цифровизации и робототехники.

«Перед нами стоят очень сложные задачи по выводу из эксплуатации ядерных объектов, — рассказывает Майк Гай из компании “Селлафилд лимитед”. — Дело в том, что на ограниченной площади в непосредственной близости друг от друга расположено много разных ядерных объектов. Особую сложность представляют задачи по обращению с отходами, включая отходы, которые хранятся под водой, и удалению отходов из очень больших и сложных камер».

Работы по выводу из эксплуатации на площадке в Селлафилде начались в 1980-х годах и, как ожидается, будут продолжаться в течение всего этого столетия и даже дольше. В Селлафилде компания получает уникальные знания и опыт, которыми делится с международным сообществом специалистов по выводу из эксплуатации. Она уже внедрила новые



процессы для упрощения и ускорения обращения с радиоактивными отходами на объектах ядерного наследия и поделилась своими знаниями о демонтаже конструкций, чтобы помочь инженерам проектировать объекты, которые легче поддаются демонтажу.

Кроме того, инвестиции в логистические цепи, в которые включена компания «Селлафилд Лимитед», демонстрируют потенциальные финансовые выгоды для компаний, приходящих в ядерную отрасль. В 2021 году Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Соединенного Королевства — государственный орган, осуществляющий надзор за выводом из эксплуатации на площадке в Селлафилде, — израсходовало около 55% своего годового бюджета, составляющего 4 млрд долл. США, на услуги, предоставляемые компаниями-партнерами.

## Ускоренный вывод из эксплуатации

Опыт, полученный за несколько лет осуществления программ по выводу из эксплуатации, все чаще используется для сокращения сроков реализации таких проектов. Сокращение количества лет, затрачиваемых на различные проекты, позволяет добиться значительной экономии бюджета, поскольку расходы на оплату труда составляют немалую его часть. В рамках проектов по выводу из эксплуатации коммерческих энергетических реакторов, которые недавно были запущены в Соединенных Штатах Америки, продолжительность основного этапа демонтажа (не включая деятельность, связанную с прекращением действия лицензии) планируется сократить до пяти-семи лет, что составляет примерно половину текущей среднемировой продолжительности этого этапа работ.

Оптимизируя взаимосвязь между основной проектной деятельностью и процессами демонтажа и обращения с отходами, можно сократить сроки реализации проектов. Принципиальное значение имеют грамотное управление проектом и конструктивные отношения между владельцем объекта и участниками цепей поставок. Генеральные подрядчики масштабных проектов, таких как на площадке в Селлафилде, обычно стремятся развивать долгосрочные партнерские отношения с поставщиками: контракты нередко заключаются на длительные сроки вплоть до десяти лет.

Оперативное получение разрешения на вывод из эксплуатации также помогает сократить продолжительность времени, необходимого для освобождения объекта от регулирующего контроля. В Германии в последнее время организаторы проектов стараются получить разрешение на вывод из эксплуатации ко времени постоянного останова объекта. Для этого перед окончательным остановом объекта должно быть проведено скрупулезное планирование и соответствующие оценки в области безопасности.

Проекты по выводу из эксплуатации генерируют большие объемы материала, обращение с которым должно быть эффективным. Наличие возможности переработать или повторно использовать большое количество этого материала и быстро утилизировать материал, с которым необходимо обращаться как с отходами, также крайне важно для снижения общих затрат по проекту и ускорения работ по выводу из эксплуатации.

**Работы по выводу из эксплуатации на площадке в Селлафилде в Соединенном Королевстве, как ожидается, будут продолжаться в течение многих десятилетий.**  
(Фото: «Селлафилд лтд.»)





# Осуществление ядерных гарантий при выводе из эксплуатации

Дженнифер Вагман

**М**АГАТЭ помогает сдерживать распространение ядерного оружия с помощью комплекса технических мер, известных как гарантии. В рамках осуществления гарантий проводится проверка выполнения странами международных юридических обязательств не использовать ядерные материалы и технологии не по назначению. Эти обязательства распространяются и на проекты по выводу из эксплуатации. По состоянию на март 2023 года окончательно прекратили свою работу в общей сложности более 200 ядерных установок — они либо достигли конца своего запланированного срока службы, либо были закрыты решением национального директивного органа. Страны несут юридические обязательства по выполнению соглашения о гарантиях на протяжении всего процесса вывода из эксплуатации, а в некоторых случаях и после него.

Поскольку вывод из эксплуатации — процесс сложный и длительный, МАГАТЭ разработало руководящие принципы, обеспечивающие осуществление гарантий до тех пор, пока объект не получит статус выведенного из эксплуатации с точки зрения гарантий.

Эти руководящие принципы МАГАТЭ предусматривают выполнение двух главных задач гарантий: проверить, что весь ядерный материал был вывезен с объекта в известное место; убедиться, что все важное оборудование либо вывезено с объекта, либо приведено в нерабочее состояние.

На этапе вывода из эксплуатации странам рекомендуется взаимодействовать с МАГАТЭ и периодически представлять планы соответствующей деятельности и обновлять информацию о конструкции, отражая изменения на объекте. По мере вывоза с площадки ядерного материала и основного оборудования МАГАТЭ проводит переоценку мер и деятельности по гарантиям, осуществляемых на объекте, и при необходимости пересматривает их, консультируясь с соответствующей страной. Подробная проработка этого процесса в сотрудничестве со странами известна как «учет требований гарантий при проектировании».

«Учет требований гарантий при проектировании предполагает своевременное и экономически эффективное сотрудничество, в ходе которого мы обеспечиваем полное понимание обязательств по гарантиям всеми заинтересованными сторонами заблаговременно», — говорит Джереми Уитлок, старший технический консультант Департамента гарантий МАГАТЭ. Уитлок работает с представителями отрасли, регулирующих органов и других заинтересованных сторон, помогая им учесть требования гарантий на этапе проектирования новых или внесения конструктивных изменений в существующие ядерные установки, включая те, которые находятся на стадии вывода из эксплуатации. «Чтобы помочь странам в выводе из эксплуатации ядерной установки, мы разработали руководство, в котором изложены требования по гарантиям и соответствующие действия. Оно поможет странам и операторам установок принимать необходимые шаги и работать с МАГАТЭ, чтобы обеспечить вывод из эксплуатации в желаемые сроки», — добавил он.

В рамках процесса вывода из эксплуатации ядерного реактора гарантии МАГАТЭ должны соблюдаться во время так называемой «кампании», в ходе которой отработавшее топливо перемещается на другой объект для хранения или долгосрочного захоронения. Для проведения этой кампании, как правило, устанавливается дополнительное оборудование для наблюдения и/или мониторинга, а зарегистрированные данные регулярно анализируются.

«Проверяя перемещение ядерного материала на объект хранения, МАГАТЭ обеспечивает непрерывность знаний об этом материале в течение времени. Это позволяет получить надежные гарантии того, что переключения ядерного материала с мирного использования не произошло», говорит Лай Сан Чу, инспектор по ядерным гарантиям МАГАТЭ. На этапе подготовки к окончательному выводу из эксплуатации Чу отвечает за проверку отработавших топливных изделий, наблюдает за их передачей и проверяет обновленную информацию о конструкции.



После удаления всего ядерного материала оператор установки приступает к демонтажу основного оборудования. Наконец, оператор удаляет самую важную часть основного оборудования — активную зону реактора, которая утилизируется на предприятии по переработке отходов. Затем страна направляет окончательную обновленную информацию о конструкции в МАГАТЭ, чтобы официально уведомить Агентство о том, что объект выведен из эксплуатации.

После того как ядерный материал будет помещен под соответствующие гарантии в хранилище или пункте долгосрочного захоронения, МАГАТЭ проверяет отсутствие ядерного материала на объекте, выводимом

из эксплуатации, а также подтверждает, что все основное оборудование было удалено или приведено в нерабочее состояние. После принятия решения о том, что для целей гарантий объект выведен из эксплуатации, МАГАТЭ прекращает на этом объекте обычные инспекции и деятельность по проверке информации о конструкции.

«Работая со страной и оператором установки для обеспечения полного понимания ими особенностей вывода из эксплуатации объекта, находящегося под гарантиями, мы помогаем обеспечить безопасное завершение работы установки в соответствии со всеми международными обязательствами страны», — говорит Керрин Свон, аналитик по гарантиям МАГАТЭ.

**Инспекция по гарантиям на предприятии УРЕНКО, Алмело, Нидерланды.**

(Фото: Д. Кальма, МАГАТЭ)





# Планирование на 60 лет вперед

## Первая атомная электростанция в ОАЭ и планы по ее выводу из эксплуатации в будущем

Артем Власов

Более полувека назад в Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) были разведаны нефтегазовые месторождения, и с тех пор экономика страны серьезно изменилась. Всего за несколько десятилетий от рыбной ловли и торговли жемчугом она доросла до роли глобального центра туризма, торговли, бизнеса и финансов. Стремясь стимулировать экономический прогресс и в то же время сокращать выбросы углекислого газа, ОАЭ диверсифицируют свою структуру энергопроизводства, в том числе путем реализации ядерно-энергетической программы.

Первая в ОАЭ и в арабском мире АЭС «Барака» начала вырабатывать электроэнергию в 2020 году. В настоящее время эксплуатируются три реактора, еще один находится на завершающем этапе строительства. Ожидается, что в ближайшие годы, когда АЭС будет полностью введена в эксплуатацию, она будет вырабатывать до 25% электроэнергии в стране, потенциально обеспечивая ей более полумиллиона домохозяйств в ОАЭ. Однако, как и любая другая АЭС, в конце срока эксплуатации, примерно через 60–80 лет, она подлежит демонтажу. Сегодня каждая страна, приступающая к реализации ядерно-энергетической программы, должна уже на этапе проектирования ядерной установки подготовить предварительные планы ее вывода из эксплуатации, с тем чтобы впоследствии площадка могла быть использована по другому назначению. «Вывод из эксплуатации — процесс многогранный. Планирование вывода из эксплуатации, включая подготовку финансовых ресурсов, должно начинаться на ранних стадиях проектирования ядерной установки и продолжаться на этапе эксплуатации. Детальное планирование вывода

из эксплуатации обычно начинается за несколько лет до окончательного останова; оно включает мероприятия по обеспечению организационной и технической готовности и направлено на плавный переход от эксплуатации к этапу вывода из нее, — рассказывает Татьяна Килочицкая, специалист МАГАТЭ по выводу из эксплуатации. — У ОАЭ, успешно запустивших первую собственную атомную электростанцию, уже есть предварительный план вывода из эксплуатации, который будет задействован, когда срок службы станции подойдет к концу».

### Плюсы тщательного планирования

Энергетическая компания Навах, являющаяся оператором АЭС «Барака», подала в орган по ядерному регулированию ОАЭ — Федеральное управление по ядерному регулированию (ФУЯР) — первоначальную заявку на получение лицензии на эксплуатацию, в которую был включен и план вывода из эксплуатации. План предусматривает, что выводом из эксплуатации будет заниматься Навах, а начнется этот процесс через пять лет после окончательного останова последнего реактора. По данным Ядерно-энергетической корпорации Эмиратов (ЭНЕК), которая развивает ядерную энергетику в ОАЭ, вывод из эксплуатации каждого из четырех энергоблоков, как прогнозируется, займет примерно 13 лет.

При выводе из эксплуатации регулярно возникают проблемы, связанные с неопределенностью относительно совокупных расходов на проведение работ, в том числе расходов на долгосрочное обращение с радиоактивными отходами, образовавшимися в результате вывода из





эксплуатации, и отработавшим ядерным топливом. Например, сооружение геологического хранилища для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов и отработавшего топлива может стоить несколько миллиардов долларов. ОАЭ готовы к решению этой задачи и предприняли шаги по созданию целевого фонда для вывода из эксплуатации, который пополняется из ежегодных взносов и из которого будут покрываться расходы по выводу из эксплуатации АЭС и связанным с этим мероприятиям. Для того чтобы этот фонд мог выполнять стоящие перед ним задачи, предполагается, что сумма ежегодных взносов будет пересматриваться на регулярной основе, а план вывода АЭС из эксплуатации будет актуализироваться как минимум каждые три года в течение срока службы станции.

«Одним из ключевых элементов успешного вывода из эксплуатации является адекватный доступ к экспертным знаниям и технологиям в период вывода из эксплуатации», — отметила Килочицкая. ОАЭ принимают меры для подготовки квалифицированного и компетентного персонала, который будет заниматься выводом из эксплуатации, захоронением радиоактивных отходов и радиационной защитой людей и окружающей среды. Поскольку технологии, такие как робототехника и искусственный интеллект, постоянно развиваются, ожидается, что новые достижения расширят спектр возможностей для более эффективного вывода из эксплуатации, обеспечив более быстрые методы демонтажа, более высокую эффективность дезактивации и более надежную защиту работников.

## Подготовка к устойчивому будущему

МАГАТЭ помогает странам в планировании и осуществлении вывода из эксплуатации, предоставляя

консультации по вопросам безопасности, юридическим и техническим вопросам, а также способствуя обмену знаниями путем проведения учебных курсов и семинаров-практикумов. Агентство играет важную роль в развитии широкого международного сотрудничества, а также в проведении технических обзоров для выявления передовой практики и обобщения опыта.

«Политика ОАЭ в области ядерной энергетики разрабатывалась в постоянном взаимодействии с МАГАТЭ», — подчеркнула Килочицкая. ОАЭ сотрудничают с экспертами МАГАТЭ для обеспечения высокого уровня ядерной и физической безопасности и прозрачности на протяжении всего срока эксплуатации АЭС «Барака», это относится и к планам по ее выводу из эксплуатации.

АЭС «Барака» будет играть ключевую роль в реализуемой ОАЭ стратегии достижения нулевого уровня выбросов к 2050 году, которая направлена на резкое увеличение производства экологически чистой энергии в стране. Благодаря ее строительству будет предотвращен выброс более чем 22 млн тонн парниковых газов в год, что эквивалентно выбросам почти пяти миллионов автомобилей — это соответствует четверти обязательств ОАЭ по сокращению выбросов в соответствии с Парижским соглашением, являющимся соответствующим международным соглашением в области изменения климата. АЭС «Барака» уже является крупнейшим производителем электроэнергии и крупнейшим поставщиком чистой электроэнергии в регионе.

**Первая атомная электростанция в ОАЭ еще не заработала на полную мощность, но страна уже тщательно планирует будущий вывод из эксплуатации.**

(Фото: ЭНЕК)



# Создание стимулов для следующего поколения строить карьеру в области вывода из эксплуатации

Энни Ангстрем

Одной из основных проблем, с которыми в настоящее время сталкивается отрасль вывода из эксплуатации, является привлечение в эту сферу молодых специалистов. Потребность в пополнении кадрового ресурса обусловлена двумя факторами. С одной стороны, существует насущная необходимость в увеличении численности квалифицированного персонала для вывода из эксплуатации растущего числа стареющих реакторов, срок службы которых подходит к концу. С другой — отрасли необходимо готовиться к будущему, в котором ожидается бурный рост отрасли вывода из эксплуатации, что создаст еще больший спрос на профильных ученых и инженеров.

По оценкам, от 12 до 15 процентов работающих сегодня ядерных энергетических реакторов к 2030 году достигнут конца своего срока службы, и для их вывода из эксплуатации потребуются профессиональные кадры со специализацией в самых разных областях, которые будут проводить безопасный и экономически эффективный демонтаж ядерных установок с учетом будущего использования их площадок. В то же время, по всему миру идет строительство новых ядерных установок, которые также рано или поздно будут выводиться из эксплуатации.

«Мы, молодые специалисты, стремимся применять наши знания и навыки в реализации программ вывода из эксплуатации и для повышения доверия общества к ядерной отрасли», — говорит Симона Шандалова, стипендиатка Программы стипендий МАГАТЭ имени Марии Склодовской-Кюри. Симоне 25 лет, по профессии она химик-ядерщик.

Вывод из эксплуатации ядерных объектов сопряжен с решением сложных задач, что открывает для молодых специалистов в этой области широкие карьерные возможности. В частности, они связаны с передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект, наука о данных и робототехника, а также с более традиционными областями, такими как физика, химия, инженерное дело, управление проектами, обращение с отходами и восстановление окружающей среды. Таким образом, отрасль вывода из эксплуатации может предложить как гарантии занятости, так и возможности карьерного роста для специалистов, которые будут приходить в нее сейчас и в обозримом будущем.

«Сорок лет назад вопросы вывода из эксплуатации не были приоритетными для проектировщиков атомных электростанций и объектов топливного цикла, соответственно, проблеме наличия квалифицированной рабочей силы на завершающем этапе срока службы таких объектов уделялось мало внимания, — говорит

Патрик О’Салливан, специалист МАГАТЭ по выводу из эксплуатации. — Сегодня привлечение молодых специалистов в области ядерной энергетики к деятельности по выводу из эксплуатации и обращению с отходами стало в большинстве программ важным приоритетом».

Для декарбонизации экономики страны инвестируют также в усовершенствованные ядерные реакторы, такие как малые модульные реакторы, которые, как ожидается, в техническом плане будет проще и дешевле выводить из эксплуатации, поскольку их можно будет отправлять обратно на завод-изготовитель для демонтажа и утилизации.

«Странам, которые намерены приложить усилия для включения ядерной энергии в свою структуру энергопроизводства, действительно следует на самых ранних этапах предусмотреть создание кадрового потенциала для последующего демонтажа АЭС», — считает Марорисанг Макугутса, заместитель президента организации «Молодое поколение Африки в ядерной сфере» (МПАЯС). МПАЯС — некоммерческая организация, занимающаяся привлечением молодых профессионалов в ядерную отрасль Африки и расширением их возможностей путем организации обучения и проведения национальных сетевых мероприятий. В настоящее время в ЮАР действуют два ядерных энергетических реактора, в Египте идет строительство первых реакторов, а Гана наряду с еще около десяти странами континента рассматривает возможность включения ядерной энергии в свою структуру энергопроизводства.

## Возможности для молодых специалистов

Вывод из эксплуатации — это заключительный этап жизненного цикла ядерной установки, однако процесс демонтажа атомной электростанции затрагивает множество областей и требует понимания всех этапов. Поэтому инженеры, ученые и другие специалисты, занимающиеся выводом из эксплуатации, обладают компетенциями, применимыми на разных этапах срока службы ядерной установки, включая проектирование, строительство и эксплуатацию.

«Для молодых специалистов, обладающих знаниями и опытом в области вывода из эксплуатации, открыто множество возможностей и в других отраслях, — уверена Лиза Ланде, специалист МАГАТЭ по развитию людских ресурсов в ядерной сфере. — Умение управлять



проектами, получать технические знания, необходимые для обращения с отходами, и понимать воздействие загрязняющих веществ на окружающую среду — все эти навыки высоко ценятся в экологическом секторе и в различных областях технологической отрасли».

Во Франции Национальный институт ядерных наук и технологий (НИЯНТ) активно мотивирует студентов, поощряя изучение передовых, инновационных решений в области вывода из эксплуатации. Главой НИЯНТ — Маркуль и директором по исследованиям Комиссариата по атомной энергии Франции (КАЭ) является Флоран Лемон. В 2022 году г-н Лемон организовал во Франции конкурс «Хакадем», в рамках которого 600 учащихся школ и вузов, приняли участие в командных соревнованиях, предлагая креативные решения по выводу из эксплуатации ядерных установок в будущем. «Многие участники конкурса не знали, что отрасль вывода из эксплуатации — multidisciplinary область, охватывающая высокие технологии, цифровизацию, химию и многое другое — рассказывает Флоран Лемон. — Благодаря конкурсу они получили представление о будущих возможностях в области вывода из эксплуатации и о ценности приобретения опыта в этой сфере».

## Инициативы МАГАТЭ по привлечению студентов и молодых специалистов

МАГАТЭ осуществляет ряд инициатив, направленных на привлечение внимания к возможностям карьерного роста в области вывода из эксплуатации и к работе по содействию созданию потенциала в ядерной области в государствах-членах.

МАГАТЭ активно сотрудничает с университетами по всему миру, в том числе в Великобритании, Республике Корея, Словакии, Франции и Чешской Республике, для проведения исследований и обмена технической информацией, опытом и передовой практикой в области вывода из эксплуатации и восстановления

окружающей среды. В рамках этого сотрудничества во Флоридском международном университете (США) МАГАТЭ предлагает учебные программы и стажировки для студентов с естественнонаучным, техническим, инженерным и математическим образованием, а также ведет работу по включению материалов МАГАТЭ на тему вывода из эксплуатации в учебные программы Университета.

В сентябре 2022 года МАГАТЭ организовало конкурс «Инновации в области вывода из эксплуатации ядерных установок — 2022», в рамках которого студентам и молодым специалистам было предложено представить оригинальные эссе на тему демонтажа ядерных объектов. В частности, были предложены следующие темы: как эффективнее решать задачи вывода из эксплуатации, как планировать и осуществлять вывод из эксплуатации с применением принципов циклической экономики, как включить стратегию вывода из эксплуатации в проект атомной электростанции.

«Вывод из эксплуатации — это задача будущего, для решения которой нужны должным образом подготовленные специалисты, — считает г-н О’Салливан. — Поэтому МАГАТЭ как напрямую, так и через свои центры сотрудничества реализует ряд инициатив, направленных на то, чтобы заинтересовать молодежь вопросами вывода из эксплуатации. Такие инициативы, в частности, предусматривают налаживание партнерских отношений с университетами, организацию учебных курсов и программ стажировок, а также поощрение участия молодежи в проводимых Агентством семинарах-практикумах и конференциях на соответствующие темы».

## «Сотрудники участвуют в работе по выводу из эксплуатации на заводе по переработке ядерного топлива в Ла-Аге, Франция».

(Фото: М. Клингенбек/МАГАТЭ)





# Вывод из эксплуатации французского завода по переработке отработавшего топлива: комментарии эксперта

Михаэль Амди Мадсен

*Сегодня около 70% выработки электроэнергии во Франции приходится на 56 атомных электростанций (АЭС). Все отработавшее топливо этих реакторов, а также некоторых реакторов из других стран, перерабатывается и частично рециклируется на заводе в Ла-Аг, расположенном на полуострове Котентан на севере страны.*

*В 2003 году первая установка по переработке в Ла-Аг, UP2-400, после 35 лет работы была остановлена и в настоящее время выводится из эксплуатации. Это масштабный проект, реализация которого, как ожидается, займет не одно десятилетие. Чтобы лучше понять, как продвигается этот проект и какие трудности возникают при выводе из эксплуатации объектов, аналогичных UP2-400, мы поговорили с Эриком Делоне, старшим вице-президентом по операциям на завершающих этапах срока службы в «Орано» — компании, которая занимается обеспечением безопасности и пригодности площадок для будущего использования. Большинство акций в компании принадлежит правительству Франции.*



**В.: Какие проблемы, затрудняющие вывод из эксплуатации UP2-400, вы могли бы выделить, и в какой степени они характерны для проектов по выводу из эксплуатации других крупных ядерных объектов, таких как АЭС?**

**О:** Главная трудность, с которой мы столкнулись при выводе из эксплуатации UP2-400, — радиоактивное загрязнение, и эта проблема свойственна большинству остановленных объектов. В случае АЭС извлечение отработавшего топлива и полная дезактивация системы позволяет снизить уровень радиоактивности на объекте более чем на 99%. Существенную радиоактивность сохраняют только корпус реактора и его внутреннее оборудование. У перерабатывающих установок, таких как UP2-400, есть своя специфика. Каждая единица оборудования и каждое помещение загрязнены в той или иной степени, и перед тем, как приступить к демонтажу, эти компоненты необходимо извлечь и провести их кондиционирование. Это означает, что функции безопасности установки по переработке необходимо поддерживать на большинстве этапов проекта по выводу из эксплуатации, в то время как на АЭС требования к безопасности можно снижать после выгрузки топлива и опорожнения бассейна выдержки отработавшего топлива.

**В.: С какими основными операционными и стратегическими рисками вывода из эксплуатации вы сталкиваетесь при реализации проекта и что делается для управления ими?**

**О:** Основными стратегическими рисками являются перерасход средств и задержки в завершении проекта, поскольку задержки порождают дополнительные расходы. Задержки могут быть вызваны различными операционными рисками, которых хватает во всех аспектах проекта. Два наиболее значимых риска связаны с нехваткой информации относительно исходного радиологического состояния высокоактивных камер и оборудования, и проблемами в области карьерного роста и удержания персонала. Для снижения первого риска мы реализовали комплекс мер по определению характеристик, благодаря чему удалось значительно снизить неопределенность относительно состояния установки и ее элементов на горизонте нескольких лет. Для решения кадровых проблем также принимались различные меры, включая участие в региональных и национальных программах обучения, проведение политики активного набора персонала, постоянное повышение квалификации наших сотрудников, чтобы способствовать кадровой многопрофильности и мобильности в организации, а также инновации в практике вывода из эксплуатации для улучшения рабочей среды.

**В.: Реализация проекта по выводу из эксплуатации установки UR2-400 началась около 20 лет назад, и можно ожидать, что она будет продолжаться еще несколько лет. Как инновации в области технологий повлияли на проект с течением времени и какие технологические разработки в будущем могли бы оказать наибольшее влияние?**

**О:** За последние 20 лет наиболее значительные технологические изменения были связаны с цифровизацией на всех уровнях проекта. Цифровые технологии развиваются в трех направлениях: мощность и эффективность, стоимость и разнообразие. Двадцать лет назад разработка виртуальных моделей была сложной и дорогостоящей, технология виртуальной реальности только начинала делать первые шаги, а смартфонов и планшетов не существовало. За последние несколько лет эти технологии развились до такой степени, что теперь они приносят реальную и измеримую пользу в нашей деятельности — они способствовали масштабным преобразованиям и совершенствованию процессов в нашей организации. В будущем робототехника позволит повысить производительность труда, укрепить безопасность работников, улучшить условия труда и поднять мотивацию персонала.

**В.: Принципы устойчивого развития и циклической экономики играют в атомной промышленности все более заметную роль. Какое влияние эти принципы оказывают на деятельность по выводу из эксплуатации установки в Ла-Аг?**

**О:** Что касается принципов циклической экономики, то здесь мы сталкиваемся с такой проблемой: установки, которые мы выводим из эксплуатации, проектировались сорок, а то и пятьдесят лет назад, когда самого понятия «циклическая экономика» еще не существовало. Однако с тех пор, как в 2008 году в нашей компании было создано целое подразделение, занимающееся выводом из эксплуатации наших собственных ядерных объектов, компания «Орано» уже 15 лет занимается завершающим этапом ядерного промышленного цикла и приведением заброшенных строений в пригодное для использования состояние. Мы также уделяем особое внимание минимизации отходов на всех этапах процесса вывода из эксплуатации, все чаще используем оборудование повторно и перерабатываем материалы. Недавние изменения в области регулирования во Франции также открыли возможности для переработки металла с выведенных из эксплуатации ядерных объектов для повторного использования в ядерной промышленности.

**В.: Каковы основные социально-экономические последствия работ по выводу из эксплуатации установки в Ла-Аг и как вы видите свою ответственность перед местным населением?**

**О:** На деятельность по выводу из эксплуатации приходится примерно 20% от общего объема работ и социально-экономического воздействия площадки в Ла-Аг, на которой также расположены две действующие установки по рециклированию отработавшего топлива. Объекты компании «Орано» в Нормандии являются крупными работодателями и источниками средств к существованию для местных жителей. Каждый год «Орано» расходует более 850 млн евро, из которых более 70% остается в Нормандии. Компания также наладила партнерские отношения с Торгово-промышленной палатой региона Шербур-ан-Котентан для обучения и трудоустройства местного населения. В 2023 году на объектах «Орано» в Котентане будет работать 500 человек, из них 20% будут заниматься выводом из эксплуатации. Кроме того, 200 стажеров будут наняты на работу на срок от одного до трех лет.

**В.: Как МАГАТЭ поддерживает усилия по выводу из эксплуатации в Ла-Аг и какую пользу проекты по выводу из эксплуатации могли бы извлечь из международной совместной деятельности?**

**О:** Наш проект по выводу из эксплуатации очень интенсивный и требует от нас максимальной нацеленности на конкретные результаты. В то же время это долгосрочный проект, в котором используются инновации и опыт других организаций. Поддержка МАГАТЭ в области вывода из эксплуатации и восстановления окружающей среды заключается в организации уникальной площадки для обмена опытом и знаниями, включая тенденции и инновации, которые могут способствовать нашей деятельности, в том числе в таких областях, как цифровые технологии, робототехника, обучение и развитие компетенций. Например, мы внимательно следим за ходом работы в рамках технического совещания по новым и новейшим технологиям, способствующим реализации проектов по выводу из эксплуатации, и ожидаем, что такие инициативы позволят избежать дублирования усилий.



# Новая бизнес-модель для вывода из эксплуатации атомной электростанции

Брюс А. Уотсон



Брюс А. Уотсон занимает должность специального помощника в Отделе программ по выводу из эксплуатации, извлечению урана и утилизации отходов Управления по безопасности ядерных материалов и гарантиям Комиссии по ядерному регулированию (КЯР) США. Работая в компании — операторе атомной электростанции, он приобрел богатый опыт вывода из эксплуатации реакторов и обращения с материалами на площадках

в качестве технического руководителя проектов по прекращению действия лицензий на ядерные энергетические реакторы в США. Брюс также получил ценный международный опыт в области вывода из эксплуатации, работая в МАГАТЭ, где он участвовал в разработке руководств по безопасности при выводе из эксплуатации и учебных программ в этой области. В качестве эксперта он участвовал в нескольких миссиях МАГАТЭ по независимой экспертизе и оказанию консультационных услуг.

Будучи одним из первопроходцев в ядерной сфере, США сегодня реализуют одну из старейших и крупнейших в мире ядерно-энергетических программ. По мере старения парка реакторов появляется все больше проектов по выводу реакторов из эксплуатации. В настоящее время КЯР осуществляет надзор за 17 атомными электростанциями (АЭС), которые находятся в стадии активного вывода из эксплуатации, и 8 АЭС, содержащимися в состоянии безопасного хранения, а также контролирует вывод из эксплуатации 2 исследовательских реакторов и нескольких других

ядерных установок. Также выводятся из эксплуатации несколько связанных с обороной объектов, регулированием которых занимается Министерство энергетики. Все эти проекты формируют спрос, который стимулирует инновации, и компании ищут нестандартные пути решения соответствующих проблем.

В 2010 году в США была выработана принципиально новая бизнес-модель для вывода из эксплуатации.

До этого во всех проектах по выводу из эксплуатации лицензированных КЯР реакторов использовалась следующая бизнес-модель. Оператор АЭС продолжал нести всю полноту ответственности на протяжении всего процесса вывода из эксплуатации. Операторы могли либо провести всю работу по выводу из эксплуатации самостоятельно, либо заключить договор подряда с компанией, которая выполнила бы ее за них. В начале 1990-х годов было остановлено десять реакторов с лицензией КЯР, а их вывод из эксплуатации был завершен к 2009 году; во всех случаях использовалась эта традиционная модель.

Однако к концу 2010 года продолжительные переговоры между компаниями, специализирующимися на выводе из эксплуатации, и операторами принесли плоды и открыли новые перспективы для реализации проектов по выводу из эксплуатации. В первом случае американский оператор передал временную лицензию компании, занимающейся выводом из эксплуатации. После завершения вывода из эксплуатации лицензия на земельный участок и сухое хранилище отработавшего топлива перейдет обратно к оператору. КЯР одобрила такую схему, а вскоре после этого одобрила аналогичные договоренности между другим оператором и компанией по выводу из эксплуатации.





## Возможности и проблемы

Это решение стало результатом многолетних переговоров. Потенциальные лицензиаты должны были тщательно взвесить как возможности, так и трудности. С одной стороны, такая передача лицензии обеспечит компании, осуществляющей вывод из эксплуатации, полный доступ к целевому фонду для вывода из эксплуатации АЭС. С другой стороны, она также будет нести полную ответственность за все финансовые и регуляторные риски, возникающие в ходе работ. В конечном счете, несмотря на эти риски, проекты были реализованы. Три года спустя, в 2013 году, компании впервые договорились о постоянной, а не временной передаче лицензии в рамках сделки по продаже установки.

Во многих отношениях 2013 год был знаковым. В этом году впервые компания по выводу из эксплуатации обратилась к оператору АЭС, которая приближалась к концу срока эксплуатации, с предложением приобрести станцию, чтобы вывести ее из эксплуатации. Были проведены переговоры о продаже АЭС, которая была остановлена в том же году. Оператор и компания по выводу из эксплуатации подали заявление о передаче лицензии компании по выводу из эксплуатации на постоянной основе.

Во многих случаях компании, получившие такие лицензии, уже работают в других ядерных отраслях: они могут эксплуатировать объекты для захоронения ядерных отходов или предоставлять услуги по хранению отработавшего топлива.

## Значительное сокращение сроков планирования работ

Одним из примечательных результатов передачи лицензий в 2013 году стало значительное сокращение сроков планирования работ по выводу из эксплуатации. Например, в одном случае окончание действия лицензии АЭС было запланировано на 2073 год. То есть первоначально оператор рассчитывал, как предусмотрено нормами КЯР, что срок действия лицензии истечет через 60 лет. К этому времени станция должна быть полностью выведена из эксплуатации, а окружающая среда на ее площадке восстановлена в достаточной мере, чтобы этот земельный участок мог использоваться для других целей. Новый лицензиат планирует завершить этот процесс к 2030 году, при этом сухое хранилище отработавшего топлива по-прежнему будет иметь лицензию и принимать инспекции.

Некоторые другие операторы, чьи старые АЭС, находящиеся на безопасном хранении, приближаются к сроку вывода из эксплуатации в 2030 году, возможно, также рассмотрят возможность такой передачи лицензии, чтобы ускорить этот процесс. Одним из важных соображений является то, что в США АЭС должна быть выведена из эксплуатации, а действие лицензии прекращено в течение 60 лет после завершения эксплуатации.

В настоящее время передача лицензий стала довольно распространенным явлением в США; многие АЭС выводятся из эксплуатации по такой схеме. Тем не менее традиционная бизнес-модель, при которой операторы самостоятельно обеспечивают вывод станций из эксплуатации, по-прежнему широко применяется.

Кроме того, весьма маловероятно, что другие страны при выборе модели для вывода из эксплуатации захотят последовать примеру США. Основная причина заключается в том, что, в отличие от большинства других стран, в США АЭС являются независимыми коммерческими предприятиями. Соответственно, американские бизнес-модели не подходят для других стран.

## Ускорение аналогичных проектов по всему миру

Однако ускоренные процессы вывода из эксплуатации, которые реализуются в США, могут способствовать ускорению аналогичных проектов по всему миру. Благодаря работе международных организаций и посредством норм безопасности, семинаров-практикумов, форумов, миссий и публикаций МАГАТЭ мы делимся накопленным опытом с другими странами. МАГАТЭ делает важное дело: Агентство работает над гармонизацией процессов вывода из эксплуатации, стремясь обеспечить их безопасность и надежную нормативную базу.

МАГАТЭ играет важную роль в предоставлении информации о последовательных подходах к выводу из эксплуатации, в том числе о дозовых пределах, что способствует достижению консенсуса относительно того, когда площадка может считаться очищенной, и повышению безопасности местного населения. Документы МАГАТЭ очень полезны в этой области. Среди специалистов по выводу из эксплуатации в самых разных странах наблюдается высокий спрос на знания о том, как безопасно и эффективно осуществлять вывод из эксплуатации.



## Применение климатически оптимизированных методов ведения сельского хозяйства дает обнадеживающие результаты для повышения урожайности хлопка в Азербайджане



Изотопные методы помогают азербайджанским ученым и фермерам получать важные данные, позволяющие оптимизировать использование удобрений и повысить эффективность производства хлопка, оберегая при этом здоровье почвы. (Фото: М. Заман/МАГАТЭ)

В рамках проекта, реализуемого МАГАТЭ в партнерстве с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО), азербайджанские ученые и фермеры, внедряя методы климатически оптимизированного сельского хозяйства (КОСХ) с использованием ядерных и смежных технологий, смогли увеличить урожай хлопка более чем в два раза. Благодаря использованию нового сорта «cotton sure» и грамотному внедрению методов КОСХ, позволяющих повысить производительность сельского хозяйства устойчивым образом, урожайность в рамках пилотного проекта выросла со средних по стране трех тонн с гектара до восьми тонн с гектара.

Этот пилотный проект был реализован в 2021 году в рамках проекта технического сотрудничества МАГАТЭ. В первую очередь он был направлен на разработку рекомендаций по КОСХ применительно к производству хлопка, обучение азербайджанских ученых и прогрессивных фермеров методам КОСХ и проведение на фермах

опытных полевых испытаний. В 2022 году началась реализация еще одного проекта, направленного на совершенствование передовых методов внесения питательных веществ и управления почвенными и водными ресурсами при производстве хлопка. Он также нацелен на повышение производительности хлопка, поскольку земли Азербайджана особенно уязвимы к изменению климата и деградации почвы. С 1991 года среднегодовая температура в стране повысилась на 0,4 градуса Цельсия, при этом количество осадков уменьшилось, а экстремальные погодные явления, такие как наводнения, засухи и периоды аномальной жары, стали происходить чаще.

«В целом стратегии внесения питательных веществ в почву и управления водными ресурсами обеспечивают 60% роста продуктивности сельскохозяйственных культур, — говорит Мохаммад Заман, почвовед Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства и специалист-куратор

проекта. — Важно точно определить объем, способ и стадию роста».

Методы КОСХ предполагают использование изотопных методов для получения важных данных, позволяющих оптимизировать использование удобрений и повысить эффективность сельскохозяйственного производства, сохранив при этом здоровье почвы.

«Когда мы только начинали, почвы Азербайджана были сильно деградированы, плодородие было на очень низком уровне, в почве отсутствовал набор основных питательных веществ, необходимых для роста хлопка», — рассказывает Заман. Для решения этой проблемы специалисты МАГАТЭ разработали и предоставили хлопкоробам полный комплекс ядерных и смежных методов, касающихся самых разных аспектов растениеводства, в том числе подготовки почвы, выбора лучших сортов хлопка, внесения питательных веществ, орошения хлопковых полей и борьбы с сорняками, вредителями и болезнями.

«Применение усовершенствованных методов внесения питательных



веществ и управления почвенными и водными ресурсами наряду с использованием сорта “cotton super” позволило нам улучшить показатели продуктивности, повысить качество и увеличить прибыль», — делится Сахават Маммадов, фермер из Азербайджана, который принял участие в пилотном проекте и применяет методы КОСХ в своем хозяйстве в течение последних двух лет.

Ядерные и смежные методы помогают повысить не только продуктивность сельского хозяйства, но и устойчивость сельскохозяйственных систем к изменению климата. В Азербайджане ученые использовали метод с применением азота-15 (N-15), стабильного изотопа. Азот играет важную роль в росте растений и фотосинтезе — процессе, с помощью которого растения преобразуют углекислый газ и солнечный свет в растительную пищу. Заман пояснил, что нехватка в почве питательных веществ, таких как азот, негативно сказывается на объеме и питательной ценности урожая. С другой стороны, чрезмерное или неправильное внесение азотных удобрений приводит к росту выбросов парниковых газов и загрязнению поверхностных и грунтовых вод.

«Ожидается, что хлопок в Азербайджане станет одной из культур с наибольшим снижением урожайности из-за изменения климата и быстрой деградации почв, — говорит Заман. — Использование

изотопных методов, в том числе применение N-15, может помочь адаптироваться к новым условиям и сделать отрасль выращивания хлопка более конкурентоспособной, а также обеспечить занятость и повысить благосостояние сельского населения».

В прошлом Азербайджан был крупным производителем и экспортером хлопка: в 1980-х годах урожай достигал 830 000 тонн и обеспечивал до четверти поступлений в государственный бюджет. Однако переход к рыночной экономике и быстрый рост других отраслей в 1990-х годах привели к тому, что хлопок утратил свою ключевую роль в экономике Азербайджана, а в 2009 году его производство упало до рекордно низких 31 000 тонн.

Результаты проекта демонстрируют высокий потенциал климатически оптимизированных методов для повышения производительности сельского хозяйства. «Учитывая, что общая площадь плантаций хлопка в Азербайджане составляет 105 000 гектаров, внедрение методов КОСХ, предлагаемых МАГАТЭ, на 10% этой площади позволит получить 84 000 тонн хлопка против 31 500 тонн, что на 166% больше, чем при использовании традиционных методов выращивания хлопка, — поясняет Заман. — Применение климатически оптимизированных методов ведения сельского хозяйства в этом проекте позволило получить отличные результаты: это очень нас обнадеживает и открывает

захватывающие перспективы для Азербайджана, который сможет значительно нарастить производство хлопка и за счет этого сильно улучшить экономические показатели».

Посредством программы технического сотрудничества и с помощью Совместного центра ФАО/МАГАТЭ Агентство оказывает странам содействие в применении методов КОСХ для повышения продуктивности, адаптации сельскохозяйственных систем к изменению климата и снижения их воздействия на окружающую среду. Совместный центр ФАО/МАГАТЭ также поддерживает исследования в этой области. Ученые из Бразилии, Исламской Республики Иран, Коста-Рики, Пакистана и Чили, участвующие в реализации проекта координированных исследований, направленного на использование климатически оптимизированных ядерных решений для минимизации воздействия сельского хозяйства на климат, сообщили о двукратном сокращении выбросов парниковых газов. Климатически оптимизированные методы ведения сельского хозяйства применяются для разных целей, в том числе для разработки сбалансированного рациона питания скота в условиях регулярных засух в Анголе, для повышения эффективности водопользования и внесения питательных веществ в почву в Кении, а также для борьбы с эрозией почвы в Тунисе.

— *Артём Власов*



С помощью стабильного изотопа азот-15 ученые собирают количественные данные о том, сколько азотных удобрений требуется хлопку и насколько эффективно они усваиваются растениями. (Фото: М. Заман/МАГАТЭ)



## Применение ядерных методов для реагирования на стихийные бедствия в Латинской Америке и Карибском бассейне



**Не разрушающие испытания (НРИ) позволяют получить надежные данные о прочности и целостности материалов, не затрагивая потенциально ослабленные или опасные структуры.**

(Фото: Соглашение о сотрудничестве в целях содействия развитию ядерной науки и техники в Латинской Америке и Карибском бассейне (АРКАЛ))

Латинская Америка и Карибский бассейн второй в мире регион по степени подверженности стихийным бедствиям. Из-за уникальной тектонической структуры и погодных условий в нем нередки такие явления, как землетрясения, наводнения и ураганы. Изменение климата усугубляет уязвимость региона, и расположенные в нем страны остро нуждаются в решениях для оценки безопасности и целостности построек после стихийных бедствий, особенно в городских районах. С помощью МАГАТЭ регион стал самодостаточным в этой области.

В Аргентине, Чили, Мексике и Перу при содействии МАГАТЭ создано четыре центра реагирования, специалисты которых умеют использовать методы НРИ для оценки прочности строительных конструкций, таких как дороги и мосты, в своих и соседних странах. При возникновении чрезвычайной ситуации эти центры будут поддерживать согласованные региональные усилия по реагированию.

Методы НРИ дают возможность получить надежные данные о прочности и целостности материалов без вмешательства в потенциально ослабленные или опасные конструкции: различные виды излучения применяются для обнаружения дефектов в бетоне, трубах и сварочных швах. Эти методы, быстрые и безопасные в применении, помогают обеспечить защиту гражданского населения.

Эти четыре центра реагирования были созданы в рамках начатого в 2018 году проекта технического сотрудничества (ТС) МАГАТЭ, направленного на использование ядерных методов для повышения точности оценки городских построек и качества промышленных товаров и услуг в странах Латинской Америки и Карибского бассейна.

«Недавние землетрясения в регионе служат убедительным доказательством важной роли сетевых структур, которые улучшают координацию усилий по реагированию на

чрезвычайные ситуации в регионе, где стихийные бедствия не редкость. Благодаря созданию центров реагирования регион теперь способен самостоятельно устранять последствия стихийных бедствий», — считает Херардо Магелла, младший специалист по промышленным технологиям МАГАТЭ.

В рамках мероприятий по созданию центров МАГАТЭ и соответствующего регионального проекта ТС Агентство организовало в Буэнос-Айресе обучение и аттестацию экспертов по НРИ, которое проходило с 7 по 18 ноября 2018 года. Девять участников из Аргентины, Бразилии, Коста-Рики и Мексики прошли новую или повторную аттестацию по передовым методам цифровой радиологии с использованием рентгеновского и гамма-излучения. Теперь они обладают достаточной квалификацией для обследования строительных конструкций с применением новейших методов НРИ.

Еще 24 участника из десяти стран — Аргентины, Боливарианской Республики Венесуэла, Доминиканской Республики, Коста-Рики, Кубы, Мексики, Перу, Уругвая, Чили и Эквадора — повысили квалификацию по применению НРИ в гражданской сфере, включая визуальный контроль и ультразвуковой контроль, при котором для обнаружения дефектов в материале и измерения его толщины используются звуковые волны.

«Аттестация — очень важный стимул для расширения применения методов НРИ в области гражданского строительства в наших странах», — говорит Эдуардо Роблес, руководитель проекта в Национальном институте ядерных исследований Мексики, один из недавно аттестованных экспертов, занимающийся НРА.

Обучение и аттестация проводились Итальянским обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике (AIPnD, некоммерческая организация) в рамках практических договоренностей

с МАГАТЭ и в соответствии с международными стандартами ISO 9712 (неразрушающие испытания) и ISO 17024 (общие требования к аттестационным органам), что позволит экспертам самим проводить обучение.

«Обучение и сертификация в соответствии с ИСО, организованные МАГАТЭ, дают уверенность в выполнении международных требований и способствуют гармонизации методик во всем регионе», — считает Эрнан Харгай, начальник отдела в Национальной комиссии по атомной энергии Аргентины и координатор нового центра реагирования в этой стране.

С ним согласен Марио Баррера Мендес, координатор по контролю качества в Комиссии по ядерной энергии Чили, возглавивший новый центр реагирования: «Созданная МАГАТЭ сеть — важнейшая составляющая новых возможностей региона по реагированию на чрезвычайные ситуации. В качестве

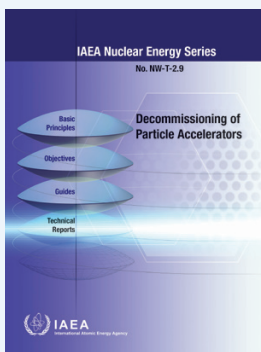
одного из четырех центров реагирования мы готовы делиться огромным объемом накопленных нами знаний по НРИ там, где это потребуются странам Латинской Америки и Карибского бассейна».

Неразрушающие испытания — это метод контроля качества, предусматривающий применение ядерных методов для исследования материалов без их повреждения. МАГАТЭ поддерживает использование технологии НРИ для обеспечения строгого контроля качества, необходимого для безопасной эксплуатации ядерных и других промышленных установок. Эта поддержка выражается в предоставлении оборудования и помощи государствам-членам, включая обучение применению технологии местного персонала. Узнайте больше о работе МАГАТЭ по НРИ.

— *Полин Софи Хеннингс*

**НРИ — это метод контроля качества, предусматривающий применение ядерных методов для исследования материалов без их повреждения.** (Фото: АРКАЛ)

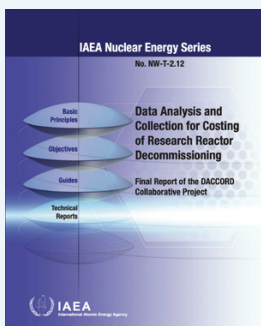




## ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

В данной публикации представлена информация об опыте и уроках реализации проектов по выводу из эксплуатации ускорителей частиц. На основе этой информации в публикации приводятся сведения практического характера для всех лиц и сторон, играющих в этом процессе определенную роль, особое внимание уделяется возникающим типичным вопросам и проблемам. Публикация предназначена для использования операторами ускорительных установок, в особенности установок, жизненный цикл которых приближается к этапу вывода из эксплуатации, или находящихся в состоянии отложенного демонтажа; регулирующими органами; руководителями работ по обращению с отходами; лицами, принимающими решения на правительственном уровне; местными органами власти; подрядчиками на проведение работ по выводу из эксплуатации; проектировщиками ускорителей частиц. Ожидается, что описанные в настоящей публикации уроки будут способствовать тому, что вопросы вывода из эксплуатации будут учитываться на стадии проектирования новых установок и что, следовательно, будет сводиться к минимуму образование радиоактивных отходов без ущерба для конструктивных характеристик и эффективности проведения строительных работ.

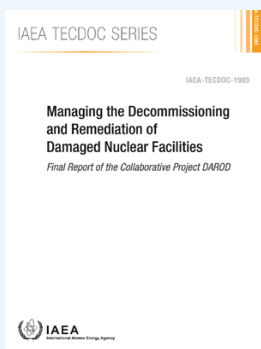
ISBN: 978-92-0-102419-0



## АНАЛИЗ И СБОР ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАТРАТ НА ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ: ИТОГОВЫЙ ДОКЛАД ПО СОВМЕСТНОМУ ПРОЕКТУ ДАККОРД

Данная публикация посвящена проекту ДАККОРД, целью которого является помощь государствам-членам в подготовке предварительных смет затрат на вывод из эксплуатации исследовательских реакторов. Этот доклад может быть особенно полезен при реализации программ в условиях ограниченного опыта вывода из эксплуатации. Проекты по расчету затрат на вывод из эксплуатации исследовательских реакторов могут быть достаточно широкими по своему охвату и опираться на многие возможные комбинации исходных данных и факторов, которые требуют должного внимания при подготовке сметы. В публикации приводится информация об удельных факторных затратах на вывод исследовательских реакторов из эксплуатации, а также изложены основные принципы, касающиеся оценки неопределенностей и непредвиденных обстоятельств и оценки эффекта от мероприятий по планированию вывода из эксплуатации и характеристизации. Рассматривается также использование программного средства CEREX-D2 («Оценка затрат на вывод из эксплуатации исследовательских реакторов в Excel»), которое было разработано Агентством для того, чтобы пользователи, не являющиеся специалистами, могли составлять предварительные сметы затрат на вывод из эксплуатации.

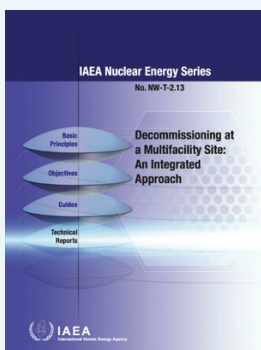
ISBN: 978-92-0-108621-1



## УПРАВЛЕНИЕ ВЫВОДОМ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕАБИЛИТАЦИЕЙ ПОВРЕЖДЕННЫХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

В рамках Плана действий по ядерной безопасности МАГАТЭ взяло на себя ведущую роль в реализации Международного проекта по управлению выводом из эксплуатации и реабилитацией поврежденных ядерных установок (проект ДАРОД). Основной целью проекта ДАРОД является предоставление практических рекомендаций по выводу из эксплуатации и реабилитации поврежденных в результате аварии ядерных установок, в основе которых лежит анализ примеров из практики и извлеченных уроков. В этой публикации обобщаются итоги проекта ДАРОД. Она предназначена для регулирующих органов, эксплуатирующих организаций, организаций технической поддержки и должностных лиц правительств, которые участвуют в процессе вывода из эксплуатации и реабилитации ядерных установок, поврежденных в результате аварии или вследствие физического износа и старения.

ISBN: 978-92-0-142621-5



## ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПЛОЩАДКАХ С НЕСКОЛЬКИМИ УСТАНОВКАМИ

В последние годы в ряде государств-членов были завершены работы по выводу из эксплуатации площадок ядерных объектов с несколькими установками. Данная публикация ставит своей целью обобщить их технический и организационный опыт, а также представить информацию и практические рекомендации, способствующие безопасному, своевременному и экономически эффективному выполнению соответствующих работ. Рассматриваются все этапы вывода из эксплуатации, от планирования и проведения демонтажа до обращения с отходами и освобождения площадки от регулирующего контроля, а также организационные схемы и аспекты финансирования. Публикация предназначена для лиц, отвечающих за принятие решений, операторов установок, подрядчиков и регулирующих органов, участвующих в процессах планирования, управления, выдачи разрешений и осуществления проектов по выводу из эксплуатации. Она может представлять особую актуальность для операторов площадок с несколькими ядерными установками, расчетный срок службы которых подходит к концу. Публикация будет также интересна тем, кто занимается проектированием и сооружением новых ядерных установок и закладывает возможности для облегчения их последующего вывода из эксплуатации.

ISBN: 978-92-0-119522-7

**ЗА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ И ДЛЯ ЗАКАЗА КНИГ ПРОСЬБА ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:**

Marketing and Sales Unit  
Международное агентство по атомной энергии  
Vienna International Centre, PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria  
Эл. почта: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)





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

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

или на наших страницах

