Обзор ядерных технологий — 2023

Доклад Генерального директора

IAEA
Международное агентство по атомной энергии
Атом для мира и развития

GC(67)/INF/4

Обзор ядерных технологий

Доклад Генерального директора

GC(67)/INF/4

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Сентябрь 2023 года
IAEA/NTR/2023

Содержание

Обзор ядерных технологий 1
Предисловие Генерального директора 6
Резюме 7
A. Ядерная энергетика 11
A.1. Прогнозы развития ядерной энергетики 11
A.2. Действующие атомные электростанции 14
A.3. Новые ядерно-энергетические программы или расширение существующих 16
A.4. Развитие ядерно-энергетических технологий 18
A.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы 19
A.4.2. Реакторы малой и средней мощности и малые модульные реакторы, а также микрореакторы 21
A.4.3. Реакторы на быстрых нейтронах 23
A.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики 24
B. Ядерный топливный цикл 27
B.1. Начальная стадия топливного цикла 27
B.2. Конечная стадия топливного цикла 31
C. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами 32
C.1. Вывод из эксплуатации 32
C.2. Восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными материалами природного происхождения 36
C.3. Обращение с радиоактивными отходами 38
D. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике 41
E. Исследовательские реакторы, ускорители частиц и ядерные контрольно-измерительные приборы 47
E.1. Исследовательские реакторы 47
E.2. Ускорители частиц 50
E.3. Ядерные приборы 52
F. Продовольствие и сельское хозяйство 54
F.1. Оперативное реагирование на кризисы, связанные с безопасностью пищевых продуктов 54
F.2. Достижения в области облучения пищевых продуктов: расширение использования ускорителей заряженных частиц и новая технология мягкого излучения 58

G. Радиоизотопы и радиационная технология 64
G.1. Разработки в области тераностических радиофармацевтических препаратов 64
H. Здоровье человека 67
H.1. Искусственный интеллект для целей оконтуривания и планирования лучевой терапии 67
I. Морская среда 71
I.1. Новые загрязнители, вызывающие озабоченность 71
I.2. Новые радиоиндикаторы циркуляции океана как способ улучшения понимания и моделирования переноса загрязнителей, а также изменения океана и климата 74
Приложение 78

Резюме

- В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий. Ниже прилагается доклад нынешнего года, в котором освещаются заметные события, происшедшие в 2022 году.
- В «Обзоре ядерных технологий — 2023» рассматриваются следующие отдельные области: ядерная энергетика, ядерный топливный цикл, вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами, исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике, исследовательские реакторы, ускорители частиц и ядерные контрольно-измерительные приборы, продовольствие и сельское хозяйство, радиоизотопы и радиационные технологии, здоровье человека и морская среда.
- Проект доклада был представлен на сессии Совета управляющих в марте 2023 года в документе GOV/2023/3. Настоящий окончательный вариант был подготовлен в свете обсуждения, проведенного на сессии Совета управляющих, и с учетом замечаний, полученных от государств-членов.

Предисловие Генерального директора

Где бы ни использовались ядерные технологии — для производства надежной и низкоуглеродной энергии или для решения проблем, связанных с продовольствием, здоровьем, водоснабжением и окружающей средой, — они играют важную роль в решении многих из наших самых насущных проблем.

В 2022 году на фоне глобального климатического кризиса произошли потрясения на энергетических рынках, что вновь заставило государства-члены обратить свои взоры к ядерной энергетике, способной содействовать достижению нулевого уровня выбросов и обеспечивать энергетическую безопасность. В то же время все больше стран используют ядерные технологии для неэнергетических применений, в том числе для защиты водных ресурсов, более рационального ведения сельского хозяйства и спасения жизней благодаря более эффективной борьбе с раком.

На Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата 2022 года (КС-27) в Шарм-эль-Шейхе, Египет, МАГАТЭ впервые на таком мероприятии представило свой павильон, посвященный демонстрации преимуществ ядерных технологий для смягчения последствий изменения климата, а также мониторинга его последствий и адаптации к ним. Кроме того, для дальнейшего углубления понимания потенциала ядерной энергии в декарбонизации энергетики помимо электричества на КС-27 была запущена инициатива «Atoms4NetZero». На базе этих усилий Агентство будет продолжать взаимодействовать с государствами-членами и международным сообществом в целом, выступая на КС-28 в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты, по проблеме климатического кризиса и той значительной роли, которую ядерная энергетика и ее мирные применения играют в борьбе с ним.

На протяжении десятилетий ядерная наука и технология играли ведущую роль, помогая странам удовлетворять свои потребности в развитии. Безусловно, их возможности, в том числе в других областях, еще не исчерпаны. «Обзор ядерных технологий — 2023», где освещаются ключевые события, происшедшие в области ядерных технологий в 2022 году, поможет государствам-членам принимать взвешенные решения при выборе того, как грамотно реагировать на текущие и новые вызовы.

РИС. П-1. Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси выступает на Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата 2022 года (КС-27) в Шарм-эль-Шейхе, Египет.

Резюме

1. Второй год подряд Агентство пересматривает в сторону повышения свои ежегодные прогнозы в отношении потенциального роста ядерной энергетики в предстоящие десятилетия, чтобы учесть смену тональности глобальной дискуссии об энергетике и окружающей среде на фоне растущей обеспокоенности ситуацией с энергетической безопасностью и изменением климата. Продолжающееся распространение возобновляемых источников энергии переменной мощности может вызывать нестабильность электрических сетей, которую атомные электростанции (АЭС) способны компенсировать, стабильно поставляя в сети экологически чистую электроэнергию. Агентство пересмотрело оптимистический прогноз в сторону повышения до 873 гигаватт (ГВт) в 2050 году, что на 10% больше цифры из аналогичного сценария, представленного в предыдущем году. В зависимости от уровня глобальной электрификации доля ядерной энергетики в общей структуре энергопроизводства к 2050 году может составить до 14% против текущих 9,8%.

2. К концу 2022 года общая эксплуатируемая мощность мировой ядерной энергетики составляла 393,8 гигаватт электрической мощности (ГВт (эл.)), которые вырабатывались на 438 действующих энергоблоках, расположенных в 32 странах. В 2022 году в пяти странах к сети было подключено более 7,4 ГВт (эл.) новых мощностей. Согласно отчетам, представленным Агентству соответствующими странами, парк АЭС в совокупности произвел около 2486,8 тераватт-часов электроэнергии с низким уровнем выбросов, подачу которой можно регулировать в зависимости от спроса.

3. Из-за энергетического кризиса 2022 года в ряде случаев принятие решений относительно останова реакторов было отложено, в связи с чем операторы и регулирующие органы приняли меры для обеспечения безопасной и надежной долгосрочной эксплуатации (ДСЭ). Сохраняющийся и растущий спрос на безопасную, чистую, надежную и экономически эффективную генерацию электроэнергии представляет собой мощный стимул для того, чтобы операторы продлевали срок службы АЭС на несколько десятилетий за счет модернизации станции и мер по совершенствованию основного оборудования и систем для обеспечения ДСЭ.

4. Из 50 государств-членов, выразивших заинтересованность в использовании ядерной энергетики, 24 находятся на этапе подготовки к принятию решения и занимаются планированием. Остальные 26 стран работают над внедрением ядерной энергетики. К 2035 году число стран, эксплуатирующих АЭС, может увеличиться примерно на 30%: к нынешним 32 странам могут присоединиться еще 10–12 стран. Чтобы удовлетворить растущий интерес к ядерной энергетике, необходимо должным образом развивать ядерную инфраструктуру.

5. Водоохлаждаемые реакторы (WCR) по-прежнему играют значительную роль в коммерческой ядерной отрасли, и в настоящее время на них приходится более 95% всех действующих гражданских энергетических реакторов в мире. Вектор глобального развития ядерной энергетики направлен на ускоренное внедрение усовершенствованных реакторов, особенно реакторов малой и средней мощности и модульных реакторов (РМСМ/ММР), и на расширенное использование АЭС для применений, не связанных с выработкой электроэнергии, таких как централизованное теплоснабжение, производство водорода и опреснение.

6. Когенерация электроэнергии и тепла для неэлектрических применений ядерной энергии — это надежная и проверенная технология, обладающая широкими рыночными перспективами и потенциалом развития, интерес к которой продолжает расти во всем мире. Несколько стран рассматривают возможность производства водорода и опреснения морской воды с использованием либо электроэнергии, либо тепловой энергии, вырабатываемой ядерными реакторами.

7. Одним из технологических достижений, привлекающих внимание тех, кто отвечает за энергетическое планирование и выработку политики, является ожидаемое к 2030 году появление и начало эксплуатации нескольких первых в своем роде конструкций РМСМ/ММР. В результате несколько стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, начали рассматривать возможность внедрения РМСМ/ММР или продолжают следить за развитием этих технологий. В настоящее время в 18 государствах-членах на разных стадиях разработки и внедрения находятся более 80 проектов основных технологических решений РМСМ/ММР. Предприятия отрасли и регулирующие органы прилагают немало усилий для содействия проектированию, разработке и скорейшему внедрению таких реакторов, в том числе в рамках Платформы МАГАТЭ по ММР и Инициативы по гармонизации и стандартизации в ядерной области.

8. С появлением мощных вычислительных возможностей и инструментов анализа данных ядерная отрасль начинает внедрять искусственный интеллект (ИИ), методы машинного обучения (МО) и глубокого обучения для модернизации систем эксплуатации и систем, используемых для нужд краткосрочного и долгосрочного технического обслуживания, а также передовые методы производства. Технология блокчейн может иметь различные применения на всех этапах ядерно-энергетической цепи поставок.

9. В области термоядерного синтеза в дополнение к научным экспериментам государства-члены ускоряют разработку технологий, которой начали заниматься частные компании, благодаря чему существенно выросли инвестиции в ее развитие и был достигнут ряд прорывных результатов, а крупномасштабные международные и национальные проекты по термоядерному синтезу успешно продвигаются вперед. Эффективность как моделирования динамики плазмы с использованием ИИ, так и управления экспериментами по термоядерному синтезу в реальном времени удалось значительно повысить, что позволяет рассчитывать на скорое получение энергии термоядерного синтеза.

10. В первых экспериментах с термоядерной плазмой в рамках проекта ИТЭР получены ценные результаты. В июне 2022 года степень реализации проекта составила 77%. Однако в связи с последствиями пандемии COVID-19 и техническими проблемами, такими как необходимость ремонта некоторых ключевых компонентов, в выполнении первоначального плана работ ожидаются задержки.

11. Устойчивый рост спотовой цены на уран оживил отрасль добычи урана, и несколько первичных производителей стали пытаться возобновить свои операции, которые были законсервированы из-за низкой спотовой цены. В последние два года благодаря положительным сигналам на рынке урана геологоразведочная деятельность активизировалась.

12. Скорость накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в мировых хранилищах составляет приблизительно 7 тыс. тонн тяжелого металла (тТМ) в год, при этом в хранилищах находится около 320 тыс. тТМ. В странах с давно существующими ядерными программами, реализующих стратегии открытого топливного цикла, главные трудности по-прежнему связаны с необходимостью увеличения емкости хранилищ ОЯТ и сроков его хранения перед захоронением. В странах, реализующих стратегии замкнутого ядерного топливного цикла, ОЯТ может перерабатываться и использоваться для производства топлива.

13. Все более важную роль в осуществлении проектов по выводу из эксплуатации ядерных установок играют цифровые технологии, которые помогают в планировании и практической работе, включая более качественную визуализацию сценариев вывода из эксплуатации как для операторов, так и для внешних заинтересованных сторон. Технологии дополненной реальности и виртуальной реальности активно изучаются на предмет использования в деятельности по выводу из эксплуатации и обучению операторов.

14. Новая тенденция в области восстановления окружающей среды — включение в концепцию уменьшения вреда такого элемента, как повышение ценности загрязненного участка. В условиях циклической экономики восстановление также является важнейшим этапом горнодобывающих работ, поскольку позволяет очистить участок для продуктивного использования в будущем.

15. В 2022 году в области обращения с радиоактивными отходами по-прежнему наблюдался устойчивый прогресс, особенно в реализации программ глубинного геологического захоронения (ГГЗ) и дальнейшем безопасном внедрении технологий обращения с отходами перед захоронением.

16. Растут масштабы возврата изъятых из употребления высокоактивных источников поставщикам для переработки и захоронения. В 2023 году планируется вывезти более 30 высокоактивных источников более чем из десяти государств-членов. Многие страны ведут успешную работу в сфере обращения с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками (ИЗРИ), однако захоронение ИЗРИ по-прежнему сопряжено с трудностями, особенно в странах с менее масштабными ядерными программами.

17. Во всем мире продолжается рост интереса к исследовательским реакторам. В дополнение к 233 действующим исследовательским реакторам велось строительство еще одиннадцати. Доля исследовательских реакторов, находящихся в эксплуатации не менее 40 лет, приближается к 70%. Некоторые организации, которые занимаются эксплуатацией наиболее востребованных исследовательских реакторов, рассматривают возможность продления срока их активной эксплуатации до 80–100 лет.

18. Более масштабные приложения ИИ оказывают революционное воздействие на мир физики высоких энергий. По мере того как адронные ускорители частиц модернизируются до более высокой яркости, количество частиц, производимых за одно столкновение, увеличивается. Как следствие, трековые детекторы должны работать на более высокой скорости счета, потенциально с более высоким фоновым счетом, поскольку воздействие идет на редкие исследовательские каналы обнаружения.

19. Тенденции использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для обнаружения и отслеживания излучения в настоящее время все больше определяются новыми параметрами, тяготеющими к увеличению полезной нагрузки, безопасности и продолжительности полета, прочности и точности наведения. На рынке появились новые БПЛА для обнаружения излучения и гамма-спектрометрии, представляющие собой комплексное решение для составления радиологических планов и для других применений.

20. Кризисные и чрезвычайные ситуации последнего времени, такие как пандемия COVID-19, конфликты и стихийные бедствия, вызванные изменением климата, высветили уязвимость мировых систем поставок продовольствия к кризисным ситуациям, а также со всей очевидностью указали на необходимость повышения устойчивости путем реформирования систем контроля пищевых продуктов и повышения качества технической поддержки. Применение новых и перспективных ядерных аналитических методов для анализа пищевых продуктов на местах может способствовать эффективному реагированию на ситуации, влияющие на поставки продовольствия и продовольственную безопасность.

21. В настоящее время примерно в 70 странах мира проводится облучение по меньшей мере одного вида пищевых продуктов для повышения безопасности, обеспечения качества и продления срока хранения таких продуктов. Благодаря экономическим и практическим преимуществам расширяется применение облучательных установок на базе ускорителей заряженных частиц, например с использованием низкоэнергетических пучков (мягкие электроны или мягкое рентгеновское излучение). Такие альтернативные технологии дополняют имеющиеся мощности гамма-установок и позволяют более широко применять облучение пищевых продуктов.

22. В тераностике радионуклид для диагностики рака используется в сочетании с другим радионуклидом для лечения. В свете последних достижений в области молекулярной визуализации и терапевтических применений врачам необходимы дополнительные, новые радиоизотопы. Благодаря развитию технологий производства радионуклидов растет число перспективных радионуклидов для радиофармацевтического применения, что позволит улучшить результаты лечения пациентов.

23. Будучи единственным радиоактивным изотопом в составе молекулы воды, тритий является ценным индикатором процессов гидрологического цикла — он помогает оценить пополнение подземных вод и степень подверженности загрязнению. Из-за низкой концентрации трития в природной воде стандартные методы измерения требуют значительного обогащения проб тритием для получения точных и достоверных результатов, что отнимает много времени. Новая система обогащения тритием, разработанная Агентством, обещает радикально расширить возможности государств-членов по измерению сверхнизких концентраций трития в пробах воды для целей гидрологического мониторинга.

24. Около половины всех онкологических больных на том или ином этапе лечения нуждаются в лучевой терапии. Искусственный интеллект (ИИ) может помочь в решении глобальной проблемы нехватки работников здравоохранения. ИИ может повысить качество и уровень стандартизации, а также позволит экономить время, особенно затрачиваемое на оконтуривание — важнейший этап лучевой терапии, в ходе которого очерчиваются границы органов, здоровых тканей и опухоли. Гибридный интеллект, сочетающий в себе сильные стороны естественного разума и искусственного интеллекта, может быть использован для решения сложных задач при оконтуривании, требующих ручной корректировки или проверки.

25. Предупреждающие сигналы «тихой пандемии» новых загрязнителей, вызывающих озабоченность (НЗВО), сложно не заметить. НЗВО — это детектируемые в окружающей среде химические вещества, которые не подпадают под действие программ регулирующего надзора. Методы пассивного отбора проб позволяют обнаружить тысячи химических веществ, присутствующих в морской среде, и облегчают идентификацию ранее неизвестных соединений. Новейшие методы отбора проб воды и аналитического скрининга могут внести вклад в решение ряда проблем, связанных со сложными смесями НЗВО в морской среде.

26. Для отслеживания движения морской воды и для изучения морских и прибрежных экосистем используются радиоиндикаторы. Они позволяют вести мониторинг радиоактивных и нерадиоактивных загрязняющих веществ, таких как микропластик и метилртуть, а также помогают выявлять и определять уровень содержания биотоксинов в морепродуктах, оценивать воздействие подкисления океана на кальцифицирующие организмы и изучать метаболические процессы в условиях повышения температуры. Последние достижения в области масс-спектрометрии открыли новые возможности для обнаружения и анализа долгоживущих радионуклидов в сверхнизких концентрациях.

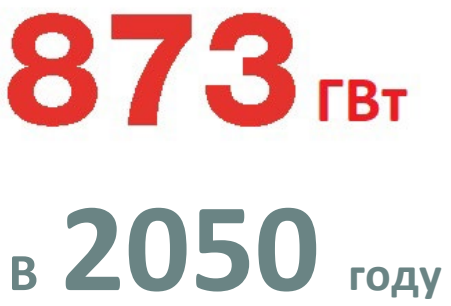
A. Ядерная энергетика

A.1. Прогнозы развития ядерной энергетики

Положение дел

1. Второй год подряд Агентство пересматривает свои ежегодные прогнозы в отношении потенциального роста ядерной энергетики в предстоящие десятилетия, чтобы отразить смену тональности глобальной дискуссии об энергетике и окружающей среде на фоне растущей обеспокоенности ситуацией с энергетической безопасностью и изменением климата.

2. В своей новой оценке развития мощностей АЭС в глобальном масштабе для генерации электроэнергии Агентство пересмотрело оптимистический прогноз в сторону повышения до 873 гигаватт (ГВт) в 2050 году, что на 10% больше цифры из аналогичного сценария, представленного в предыдущем году. Реализация этого прогноза потребует широкомасштабного перехода к долгосрочной эксплуатации (ДСЭ) в рамках существующего парка АЭС и строительства почти 600 ГВт новых мощностей в ближайшие три десятилетия. Для этого потребуется своевременный и не выходящий за рамки бюджета ввод в строй мощностей со стороны предприятий отрасли, облегчение доступа к финансированию и прогресс в области согласования нормативных требований и стандартизации промышленных подходов. Такие шаги приобретают особое значение в контексте новых технологий, например, реакторов малой и средней мощности и модульных реакторов (ММР) и других усовершенствованных реакторов, которые должны сыграть ключевую роль в декарбонизации энергетического сектора за счет снабжения низкоуглеродным теплом или водородом тех секторов, которые не могут быть электрифицированы.



3. В зависимости от уровня глобальной электрификации доля ядерной энергетики в общей структуре энергопроизводства может составить до 14%, выше текущего показателя в 9,8%. Согласно пессимистической оценке, установленная мощность АЭС к 2050 году останется стабильной на уровне около 400 ГВт, при этом доля вырабатываемой на АЭС электроэнергии может снизиться до 6,9% из-за растущей доли других источников.

В зависимости от уровня глобальной электрификации доля ядерной энергетики может составить

до 14% в общей структуре энергопроизводства по сравнению с сегодняшними 9,8%.

В случае реализации низкого сценария установленная мощность АЭС к 2050 году останется стабильной на уровне около 400 ГВт, при этом доля вырабатываемой на АЭС электроэнергии может снизиться до 6,9%.

4. На 27-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (КС-27) в Шарм-эль-Шейхе, Египет, в ноябре 2022 года состоялись дискуссии на высоком уровне о вкладе атомной энергетики в доступное, устойчивое и надежное энергоснабжение, а также о ее роли в формировании энергетических систем без выбросов углекислого газа, которые служат необходимой основой для внедрения возобновляемых источников энергии (рис. A.1). По-прежнему сохраняются сложности с финансированием перехода к экологически чистой энергии, и, в частности, с финансированием ядерных проектов, хотя в 2022 году произошли некоторые положительные изменения, например, включение ядерной энергетики в таксономию устойчивого финансирования Европейского Союза (ЕС), а также в другие таксономии по всему миру.

РИС. A.1. Генеральный директор Агентства Рафаэль Мариано Гросси вместе с Генеральным директором Организации Объединенных Наций по промышленному развитию Гердом Мюллером и Исполнительным секретарем Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций Ольгой Алгаеровой во время проходившего на КС-27 параллельного мероприятия «Взаимный эффект от низкоуглеродных технологий для устойчивых энергосистем с нулевым уровнем выбросов». (Фото: МАГАТЭ)

Тенденции

5. Отмечается значительный и растущий интерес к технологиям усовершенствованных и инновационных реакторов, в том числе к ММР и различным областям их применения. Ожидается, что ММР, вместе с усовершенствованными водоохлаждаемыми реакторами большой мощности, в течение следующих трех десятилетий будут составлять основную часть прироста мощностей, позволяющих вырабатывать низкоуглеродную энергию для борьбы с изменением климата, и обеспечат надежность поставок энергии по доступным ценам. Ядерная отрасль будет и далее работать над решением ряда задач, включая сокращение затрат, создание потенциала и обеспечение более широкой гармонизации и стандартизации на уровне регулирующих органов и на уровне отрасли в целях повышения конкурентоспособности и ускоренного развертывания новых ядерных энергетических мощностей. Для поддержки таких усилий государств-членов Генеральный директор МАГАТЭ в 2022 году дал старт Инициативе по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО), которая открывает для всех заинтересованных сторон в ядерной области (правительств, регулирующих органов и промышленности) уникальную возможность взаимодействовать для достижения общей цели — внедрения в глобальном масштабе усовершенствованных реакторов с учетом требований ядерной и физической безопасности, уделяя при этом особое внимание технологии ММР (рис. A.2).

РИС. A.2. Генеральный директор Агентства Рафаэль Мариано Гросси открывает учредительное заседание Инициативу по гармонизации и стандартизации в ядерной области (ИГСЯО), состоявшееся в июне 2022 года в Центральных учреждениях Агентства в Вене, Австрия

6. В то же время многие страны, которые приняли решение о досрочном поэтапном отказе от ядерной генерации, пересматривают этот вариант и переходят к незапланированной ДСЭ.

A.2. Действующие атомные электростанции

Положение дел

7. К концу 2022 года общая эксплуатируемая мощность мировой ядерной энергетики составляла 393,8 ГВт (эл.), которые вырабатывались на 438 действующих энергоблоках, расположенных в 32 странах. В 2022 году выработка электроэнергии была временно приостановлена на 27 реакторах (суммарная эксплуатируемая мощность более 22,8 ГВт (эл.)).

8. В 2022 году к энергосети было подключено более 7,4 ГВт (эл.) новых мощностей, включая 5,6 ГВт (эл.) дополнительных эксплуатируемых мощностей в Азии и 1,6 ГВт (эл.) в Европе. В Китае в 2022 году начали поставлять электроэнергию два энергоблока: в январе был подключен к сети 6-й энергоблок АЭС «Фуцин» (1075 МВт (эл.)) — второй из двух энергоблоков на площадке с демонстрационными реакторами «Хуалун-1» (HPR1000); в мае был подключен к сети 6-й энергоблок АЭС «Хунъяньхэ» в провинции Ляонин — на основе реактора с водой под давлением (PWR) третьего поколения ACPR-1000 общей мощностью 1061 МВт (эл.). В Республике Корея в июне к сети был подключен энергоблок на АЭС «Ханул» с реактором типа PWR (APR-1400) мощностью 1340 Мвт (эл.).

9. В марте в провинции Синд на юге Пакистана на АЭС «Карачи» был подключен к сети новый энергоблок с реактором HPR1000, поставленным Китаем. В октябре в Объединенных Арабских Эмиратах начал работу 3-й блок АЭС «Барака», в результате чего выработка станции увеличилась на 1345 МВт (эл.). В марте в Финляндии к энергосети был подключен 3-й блок АЭС «Олкилуото» с реактором EPR мощностью 1600 Мвт (эл.).

10. На конец 2022 года в 18 странах велось строительство АЭС общей мощностью 59,3 ГВт (эл.) (58 энергоблоков). Установленная мощность строящихся атомных электростанций в последние годы оставалась в основном без изменений, за исключением Азии, где наблюдается постоянный рост, при этом с 2012 года там было подключено к энергосистеме 56,1 ГВт (эл.) действующих мощностей (55 энергоблоков).

11. Около 66% общемировой мощности действующих реакторов (258,7 ГВт (эл.), 291 энергоблок) находится в эксплуатации более 30 лет, в то время как более 26% (101,5 ГВт (эл.), 128 энергоблоков) находится в эксплуатации более 40 лет и 3% (11 ГВт (эл.), 13 энергоблоков) — более 50 лет. Старение парка АЭС подчеркивает необходимость во вводе новых или модернизированных мощностей, чтобы компенсировать запланированный вывод из эксплуатации и способствовать усилиям по обеспечению устойчивости и глобальной энергетической безопасности, а также достижению целей по борьбе с изменением климата. Правительства, энергопредприятия и другие заинтересованные стороны вкладывают средства в программы ДСЭ и управления старением все большего числа АЭС, чтобы обеспечить их устойчивую работу и постепенный переход к новым мощностям.

12. Несмотря на устаревание, действующие ядерные энергетические реакторы продолжают демонстрировать высокие показатели общей надежности и производительности. Коэффициент использования установленной мощности — это отношение фактически выработанной электроэнергии к ее количеству, которое могло бы быть произведено при работе на номинальной мощности энергоблока в течение всего года. Высокий коэффициент свидетельствует о хороших эксплуатационных показателях.

Тенденции

13. В течение последнего десятилетия наблюдался стабильный рост ядерных энергетических мощностей, объем которых с 2012 по 2022 год увеличился на 20,3 ГВт (эл.). За этот период к энергосистеме было подключено 68 энергоблоков совокупной мощностью 67,8 ГВт (эл.). Более 83% этого прироста мощностей приходится на Азию, где к энергосистеме было подключено 56,2 ГВт (эл.) мощностей (55 энергоблоков). Согласно полученным Агентством данным, в 2022 году парк АЭС в совокупности произвел около 2486,8 тераватт-часов (ТВт·ч) электроэнергии с низким уровнем выбросов, подачу которой можно регулировать в зависимости от спроса.

14. Энергетический кризис 2022 года привел к тому, что принятие ряда решений об остановке АЭС (в Бельгии, Швеции и Соединенных Штатах Америки) было заморожено, побуждая операторов и регулирующие органы к реализации мер по обеспечению безопасной и надежной ДСЭ.

A.3. Новые ядерно-энергетические программы или расширение существующих

Положение дел

15. Из 50 государств-членов, выразивших заинтересованность в использовании ядерной энергетики, 24 находятся на этапе подготовки к принятию решения и занимаются планированием. Остальные 26 стран работают над внедрением ядерной энергетики и делятся на две группы:

- 16 находятся на этапе принятия решения — это страны, которые рассматривают возможность внедрения ядерной энергетики, в том числе те страны, которые выполняют предварительные технико-экономические обоснования или активно подготавливают инфраструктуру, не приняв при этом решения (Алжир, Замбия, Индонезия, Казахстан, Марокко, Нигер, Сальвадор, Сенегал, Судан, Таиланд, Тунис, Уганда, Филиппины, Шри-Ланка, Эстония, Эфиопия);
- 10 находятся на этапе после принятия решения — это страны, которые приняли решение и создают инфраструктуру, либо подписали контракт и начнут строительство в ближайшем будущем, либо уже приступили к строительству (Бангладеш, Гана, Египет, Кения, Иордания, Нигерия, Польша, Саудовская Аравия, Турция, Узбекистан).

16. В Бангладеш продолжается строительство первой АЭС, с запланированной поставкой топлива на площадку в 2023 году и переходом к коммерческой эксплуатации двух энергоблоков в ближайшие годы. В Турции в 2022 году продолжалось строительство четырех энергоблоков АЭС «Аккую». Ввод в эксплуатацию четырех энергоблоков ожидается в 2023–2026 годах. В июле был залит первый бетон 1-го энергоблока АЭС «Эль-Дабаа» в Египте, а в ноябре 2022 года — 2-го энергоблока. Кроме того, в 2021 году Управление по атомным электростанциям (УАЭС) подало заявку на получение лицензии на строительство 3-го и 4-го энергоблоков. Продолжается подготовка площадки к строительству. Обе ключевые организации (УАЭС и Управление ядерного и радиологического регулирования Египта) продолжают наращивать организационный потенциал в соответствии с потребностями программы. В Польше был завершен выбор технологического решения и поставщика для сооружения к 2042 году энергоблоков с реакторами PWR общей установленной мощностью 6000–9000 МВт (эл.).

17. В Саудовской Аравии было опубликовано приглашение к участию в тендере (ПУТ) на закупку первых двух энергоблоков АЭС мощностью 1000–1600 МВт (эл.). Иордания приступила к этапу технико-экономического обоснования для того, чтобы определить предпочтительную технологию и поставщика и принять инвестиционное решение касательно использования ММР для производства электроэнергии и опреснения морской воды. ПУТ для проекта ММР запланировано на 2026 год. Гана продолжала работать над развитием национальной инфраструктуры для ядерно-энергетической программы, включая дальнейшее наращивание потенциала ключевых организаций. Гана расширила свой выбор технологий реакторов для включения ММР, и на заявку о поиске потенциальных поставщиков для разработки решения мощностью порядка 1000 МВт (эл.) откликнулись пять поставщиков. Начало строительства первой АЭС запланировано на 2023 год, а ввод в эксплуатацию — на 2029 год. Кения объявила, что рассмотрит вопрос о сооружении исследовательского реактора и ММР вместо крупномасштабных АЭС. В Узбекистане начата работа по изучению характеристик и лицензированию площадок для АЭС с общей установленной мощностью 2400 ГВт (эл.). Ввод в эксплуатацию первой АЭС планируется в период 2026–2030 годов. В 2022 году был подписан документ с изложением национальной позиции Филиппин в отношении программы ядерной энергетики, который основывается на итогах проведенного правительством исследования. Это решение открыло путь для выполнения дальнейших исследований и оценки имеющихся вариантов, которые связаны с использованием реакторов большой мощности, включая возможное восстановление АЭС «Батаан», либо ММР. Эстония рассматривает для своей ядерно-энергетической программы возможность использования ММР, и организация-исполнитель программы подготовила для правительства промежуточный доклад, в котором оцениваются условия и рентабельность ядерно-энергетической программы на основе ММР. Для многих из этих стран включение в энергобаланс ядерной энергетики позволит внести значительный вклад в достижение целей по смягчению последствий изменения климата. Некоторые из них (Египет, Иордания и Турция) включили ядерную энергетику в свои определяемые на национальном уровне вклады, представленные в соответствии с Парижским соглашением в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата.

18. В 2022 году Шри-Ланка провела у себя одну миссию Агентства по комплексной оценке ядерной инфраструктуры (ИНИР) (миссию этапа 1). Агентство получило также просьбы об организации следующих миссий ИНИР: миссии ИНИР этапа 1 — от Эстонии, повторной миссии ИНИР этапа 1 — от Казахстана и миссии ИНИР этапа 3 — от Турции. В декабре 2021 года Агентство получило просьбу о проведении миссии ИНИР этапа 3 в Бангладеш, которую планируется осуществить в начале 2024 года. Кроме того, в 15 государствах-членах действуют комплексные планы работы, и на фоне ослабления ограничений, связанных с пандемией COVID-19, соответствующая работа была возобновлена.

Тенденции

19. К 2035 году число стран, эксплуатирующих АЭС, может увеличиться примерно на 30%: к нынешним 32 странам могут присоединиться 10–12 стран-новичков. Для столь значительного роста требуется дальнейшее повышение готовности инфраструктуры этих стран при поддержке Агентства, что позволит обеспечить ответственное внедрение ядерной энергетики.

20. Одним из технологических достижений, привлекающих внимание тех, кто отвечает за энергетическое планирование и выработку политики, является ожидаемое к 2030 году появление и начало эксплуатации нескольких первых в своем роде проектов ММР. В результате несколько стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, включили ММР в свой перечень рассматриваемых технологий или продолжают следить за развитием событий в этой области. К ним относятся такие страны-новички, как Гана, Замбия, Кения, Индонезия, Иордания, Польша, Саудовская Аравия, Судан, Уганда, Филиппины и Эстония, а также страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы, — Болгария, Румыния, Чешская Республика и Южная Африка. Это обусловлено достижениями в технологиях ММР и преимуществами, которые могут иметь ММР по сравнению с крупными АЭС, а именно меньшими начальными капитальными затратами, совместимостью с небольшими электросетями, неэлектрическими применениями и возможностью добавления новых модулей.

21. В то же время деятельность десяти государств-членов, приступающих к развитию своих ядерно-энергетических программ на основе АЭС эволюционной конструкции, свидетельствует о неизменном интересе к технологиям АЭС большой мощности. Государства-члены сообщают о своих планах использовать типовые проекты, уже находящиеся в эксплуатации, и воспользоваться опытом, накопленным регулирующими органами и операторами в стране происхождения.

22. Независимо от того, будет ядерно-энергетическая программа основана на АЭС большой мощности или ММР, с вопросы национальной инфраструктуры ядерной энергетики должны быть надлежащим образом учтены, включая требования ядерной безопасности, физической безопасности и гарантий.

A.4. Развитие ядерно-энергетических технологий

Положение дел

23. Вектор глобального развития ядерной энергетики направлен на ускоренное внедрение усовершенствованных реакторов, включая такие инновационные решения, как ММР, и на расширенное использование АЭС для применений, не связанных с выработкой электроэнергии, таких как централизованное теплоснабжение, производство водорода и опреснение. Кроме того, со стороны нетрадиционных заинтересованных сторон наблюдается явный интерес к использованию возможностей ядерной энергетики для декарбонизации промышленного сектора, особенно в контексте энергоемких промышленных производств. В некоторых частях мира заинтересованные стороны рассматривают такие варианты применения ядерной энергии, как плавучие АЭС, которые будут работать в режиме когенерации, микрореакторы для нишевых применений (в отдаленных регионах и на небольших островах, для замены дизельных

генераторов и т.д.) и ядерные энергетические установки для космических применений. В связи со все большим распространением возобновляемых источников энергии с переменным характером генерации, которые создают нагрузку на энергосистемы, набирает обороты использование усовершенствованных реакторов в качестве экологически чистого решения для обеспечения гибкости энергосистем. Наконец, с появлением мощных вычислительных возможностей и инструментов анализа данных ядерная отрасль начинает внедрять искусственный интеллект (ИИ), в том числе методы машинного обучения (МО) и глубокого обучения для модернизации систем эксплуатации, а также систем, используемых для нужд краткосрочного и долгосрочного технического обслуживания.

Тенденции

24. В дополнение к усилиям государств-членов в области разработки усовершенствованной реакторной технологии все большее число частных компаний и стартапов разрабатывают новые модели реакторов, которые привлекают государственное и частное финансирование. Такие компании предлагают прорывные бизнес-модели и инновационные методологии, например, использование «цифровых двойников» (виртуальных копий), прогрессивных технологий производства, методов на основе ИИ и МО для широкого спектра видов деятельности, которые могут изменить представление о подходе к проектированию, лицензированию и эксплуатации ядерных систем. ИИ способен улучшить интеграцию вычислений и экспериментальных данных, собираемых в ходе маломасштабных экспериментов или с датчиков в процессе эксплуатации. Такая интеграция в случае ее оптимизации позволяет ученым, специализирующимся на вычислительной науке, разрабатывать физические модели беспрецедентной точности и помогает ученым-экспериментаторам свести к минимуму стоимость и количество проверочных экспериментов для не имеющих аналогов систем. Она также позволяет операторам отслеживать состояния системы, которые не могут быть непосредственно измерены приборами. Методологии и инструменты с использованием ИИ могут применяться для прогнозного анализа на основе физических законов, который может быть востребован для оптимизации проектных решений, технологий производства и строительства, повышения эффективности эксплуатации, улучшения новых конструкций реакторов, обнаружения дефектов с помощью моделирования и создания усовершенствованных систем контроля. Кроме того, ИИ может принести ядерной отрасли дополнительные преимущества в плане обеспечения надежности, безопасности и общей эффективности.

A.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы

Положение дел

25. Существенную роль в коммерческой ядерной отрасли с момента ее формирования играют водоохлаждаемые реакторы (WCR): их суммарный опыт эксплуатации составляет более 19 000 реакторо-лет, а в настоящее время в общемировом парке эксплуатируемых гражданских энергетических реакторов их доля составляет более 95%. По состоянию на конец 2022 года 54 из 57 сооружаемых ядерных реакторов относятся к типу реакторов, охлаждаемых легкой или тяжелой водой. Крупные изменения в сегменте WCR в 2022 году включают подключение к сети новых энергоблоков в Китае, Объединенных Арабских Эмиратах, Пакистане, Республике Корея и Финляндии.

26. В ряде стран также все чаще рассматриваются, изучаются и сооружаются усовершенствованные варианты существующих проектов WCR в целях постепенного внедрения усовершенствованных полузамкнутых или замкнутых топливных циклов, обеспечивающих более высокую эффективность. Несколько государств-членов ведут научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в области сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (SCWR). Завершено концептуальное проектирование канадского реактора SCWR (канального реактора с тяжеловодным замедлителем), а также китайского CSR1000. В Европе была разработана концепция высокоэффективного легководного реактора, а в сотрудничестве с Китаем были выполнены работы по планированию, проектированию и расчетному обоснованию внутриреакторного испытательного устройства для аттестации топлива. В Российской Федерации продолжаются концептуальные исследования по инновационному водо-водяному энергетическому реактору со сверхкритическими параметрами теплоносителя, включая возможность использования активной зоны на быстрых нейтронах. Последние разработки ориентированы на небольшие модульные версии конструкций SCWR с акцентом на улучшенные параметры ядерной безопасности, физической ядерной безопасности, экономичности и устойчивости.

27. Государства-члены целенаправленно концентрируют свои усилия на разработке комплексных энергетических систем, объединяющих возобновляемые источники энергии, особенно солнечной и ветровой, которые являются переменными источниками энергии, и АЭС для обеспечения базовой нагрузки и повышения стабильности энергосистемы, а также для неэлектрических применений.

Тенденции

28. Большинство усовершенствованных реакторов типа WCR обеспечивают выдачу мощности в пределах 1000–1700 МВт (эл.), а на стадии проектирования эволюционных конструкций WCR большой мощности закладываются еще более высокие значения. Среди государств-членов по-прежнему сохраняется тенденция к проектированию многоблочных площадок с энергоблоками, оснащенными реакторами одного или нескольких типов. Около 30 стран, в которых в настоящее время нет действующих АЭС, рассматривают возможность строительства энергоблоков с реакторами WCR большой или малой мощности.

29. Сохраняющийся и растущий спрос на безопасную, чистую, надежную и экономически эффективную генерацию электроэнергии представляет собой мощный стимул для того, чтобы операторы продлевали срок службы АЭС на несколько десятилетий за счет модернизации станции и мер по совершенствованию основного оборудования и систем для обеспечения ДСЭ.

A.4.2. Реакторы малой и средней мощности и малые модульные реакторы, а также микрореакторы

Положение дел

30. В 18 государствах-членах на разных стадиях разработки и внедрения находятся более 80 проектов ММР, основанных на наиболее распространенных технологических решениях. За последние три года были достигнуты значительные успехи в плане их внедрения. В декабре 2019 года в Российской Федерации была подключена к энергосети плавучая АЭС «Академик Ломоносов» с двумя водо-водяными реакторами типа КЛТ-40С, а в мае 2020 года была начата промышленная эксплуатация этой станции, способной генерировать 70 МВт (эл.). В Китае в качестве попытки реализовать на практике инновационную технологию сверхвысокотемпературного реактора в декабре 2021 года был подключен к энергосети демонстрационный энергоблок с реактором HTR-PM (модульный высокотемпературный реактор с шаровыми твэлами), который в декабре 2022 года был выведен на первоначальную полную мощность 210 МВт (эл.).

конструкций ММР

в 18 государствах-членах

31. В Аргентине на продвинутой стадии сооружения находится реактор CAREM-25, в основе которого лежит проект интегрального реактора типа PWR, имеющего естественную циркуляцию; его физический пуск ожидается в 2026 году. В июле 2021 года в Китае началось сооружение реактора ACP100, спроектированного в качестве многоцелевого реактора, его промышленную эксплуатацию планируется начать к концу 2026 года. В Якутии, Российская Федерация, ведется строительство ММР на базе реактора РИТМ-200Н; проект получил разрешение природоохранных органов и, как ожидается, будет введен в коммерческую эксплуатацию в 2028 году. В августе 2022 года началось строительство первой плавучей АЭС на базе реактора РИТМ-200, также в Российской Федерации разрабатывается оптимизированный плавучий энергоблок на базе реактора РИТМ-400. В Соединенных Штатах Америки в июле 2022 года Комиссия по ядерному регулированию одобрила заявку на сертификацию первоначального проекта конструкции АЭС «НьюСкейл пауэр». В декабре 2022 года компания «НьюСкейл» подала заявку на утверждение стандартной конструкции энергетического модуля увеличенной мощности в шестимодульной конфигурации, который планируется продемонстрировать в Айдахской национальной лаборатории в 2029 году. Франция разрабатывает NUWARD — проект реактора PWR с интегральной компоновкой, который способен вырабатывать 340 МВт (эл.) за счет использования двух независимых реакторных блоков мощностью по 170 МВт (эл.) каждый, что обеспечивает гибкость эксплуатации. Заливка фундамента для первого в своем роде реактора NUWARD начнется во Франции до 2030 года. NUWARD является опытным ММР для совместного обзора, проводимого в Европе под руководством Французского управления по ядерной безопасности при участии Государственного управления по ядерной безопасности Чешской Республики и Управления по радиационной и ядерной безопасности Финляндии. В Соединенном Королевстве в Управлении по ядерному регулированию проводится общая оценка проекта ММР разработки компании «Роллс-Ройс» — трехпетлевого реактора типа PWR, имеющего расчетную мощность 470 МВт (эл.), начало сооружения которого запланировано на 2026 год. Существуют также проекты ММР, в основу которых положена технология кипящего реактора с естественной

циркуляцией теплоносителя. Комиссия по ядерному регулированию США и Комиссия по ядерной безопасности Канады рассматривают заявку на выдачу лицензии на строительство реактора BWRX-300 мощностью 300 МВт (эл.), который был разработан в Соединенных Штатах Америки и который планируется установить на АЭС «Дарлингтон» в Онтарио, Канада, и на площадке в Клинч-Ривер, штат Теннесси, Соединенные Штаты Америки. Канадский план действий по малым модульным реакторам предусматривает также запланированное внедрение так называемого микромодульного реактора (MMR) — модульного высокотемпературного реактора с газообразным теплоносителем (MHTGR), выдающего мощность 15 МВт (тепл.) для когенерации электроэнергии и технологического тепла в Чок-Риверских лабораториях. В Республике Корея процесс лицензирования для получения совместного УСК в сотрудничестве с Саудовской Аравией проходит проект системно-интегрированного модульного усовершенствованного реактора (SMART) мощностью 110 МВт (эл.) Корейский консорциум приступил к разработке ММР инновационной конструкции — реактора типа PWR мощностью 170 МВт (эл.), который будет обладать улучшенными характеристиками безопасности и экономической эффективности.

32. К семейству технологий, используемых для создания ММР, относятся также реакторы на солевых расплавах (MSR). В настоящее время в Дании, Индонезии, Канаде, Китае, Нидерландах, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Франции и Японии осуществляются проекты по разработке MSR, находящиеся на разных этапах.

Тенденции

33. Наблюдается растущий интерес государств-членов к ММР и их применениям. Предприятия отрасли и регулирующие органы прилагают значительные усилия для содействия разработке проектов и скорейшему внедрению таких реакторов. Основные тенденции по-прежнему связаны с выбором области технологий, имеющих более высокую проработанность или уровень готовности, особенно таких, как реакторы типа WCR интегральной конструкции и реакторы типа MHTGR. Примерно до 2030 года наибольшее число заявок на лицензирование будет касаться проектов ММР на основе этих технологий, следующая большая группа — проекты инновационных реакторов с использованием неводных теплоносителей. В 2022 году в Канаде, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Чешской Республике и Японии продолжалась разработка технологий, относящихся к одной из разновидностей ММР — так называемым микрореакторам. Рассчитанные на выдачу мощности в меньшем диапазоне до 10 МВт (эл.), микрореакторы рассматриваются в качестве оптимального решения для обеспечения когенерации тепловой и электрической энергии в отдаленных районах и на небольших островах, а также для замены дизельных генераторов.

34. Растущее число стран занимается разработкой проектов реакторов морского базирования. В Республике Корея продолжается разработка плавучего энергоблока BANDI-60 на основе реактора типа PWR, имеющего электрическую мощность 60 МВт (эл.). Стартап, занимающийся проектированием реакторов в Дании, разрабатывает компактный жидкосолевой реактор, способный выдавать мощность порядка 100 МВт (эл). ММР морского базирования предназначены для нишевых рынков, включая такие сферы, как распределенное энерго- и теплоснабжение удаленных населенных пунктов, опреснение морской воды и создание гибридных энергетических систем в сотрудничестве с судоходными и судостроительными предприятиями.

35. В контексте этого весьма быстро развивающегося направления следует отметить Платформу МАГАТЭ по ММР, которая была учреждена в 2021 году Генеральным директором МАГАТЭ и служит единым источником информации для государств-членов и других заинтересованных сторон по вопросам разработки, внедрения проектов ММР и регулирующего

надзора за ними, обеспечивая координированное и последовательное предоставление помощи со стороны Агентства, в том числе в рамках недавно запущенного Портала по ММР.

A.4.3. Реакторы на быстрых нейтронах

Положение дел

36. В 2022 году в трех государствах-членах находились в эксплуатации пять быстрых реакторов с натриевым теплоносителем (SFR): один реактор в Китае, один в Индии и три в Российской Федерации. Кроме того, в Индии вводится в эксплуатацию прототип быстрого реактора-размножителя мощностью 500 МВт (эл.), а в Китае сооружаются два однотипных энергоблока с реакторами SFR — CFR-600. Хотя во всех пяти действующих и трех строящихся реакторах в качестве теплоносителя используется жидкий натрий, все большее внимание привлекает технология теплоносителя на основе тяжелых жидких металлов, особенно применительно к ММР. В Российской Федерации продолжается сооружение опытного демонстрационного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (LFR) БРЕСТ-ОД-300 (рис. A.3), обеспечивающего мощность 300 МВт (эл.), и многоцелевого реактора на быстрых нейтронах. В настоящее время в ряде стран также разрабатывается ряд других перспективных технологий теплоносителей, например, на основе гелия и расплавов солей. Из шести концепций инновационных реакторов, разработанных Международным форумом «Поколение IV», три реактора (с натриевым, тяжелым жидкометаллическим и гелиевым теплоносителем) представляют собой системы на быстрых нейтронах, а два (жидкосолевой реактор и сверхкритический водоохлаждаемый реактор) могут иметь либо быстрый, либо промежуточный спектр нейтронов.

РИС. A.3. Площадка реактора БРЕСТ-ОД-300 в сентябре 2022 года. (Фото: РОСАТОМ)

Тенденции

37. Реакторы типа SFR по-прежнему являются основным вариантом для внедрения в среднесрочной перспективе; Российская Федерация разрабатывает реактор БН-1200 большой мощности 1200 МВт (эл.), Китай планирует изготовить реактор CFR-1000 мощностью

1 ГВт (эл.), а компания «ТерраПауэр» в Соединенных Штатах Америки разрабатывает реактор Natrium, который будет работать в связке с накопителем расплава солей, что позволит достигать пиковой мощности 500 МВт (эл.). Natrium способен заменить собой обычную угольную электростанцию, а также может использоваться вместе с другими возобновляемыми источниками энергии. Ряд стран разрабатывают реакторы типа LFR: Соединенное Королевство и Соединенные Штаты Америки — реактор компании «Вестингауз» мощностью 450 МВт (эл.), Италия и Румыния — европейский демонстрационный быстрый реактор со свинцовым теплоносителем (ALFRED) мощностью 120 МВт (эл.), Швеция — реактор SEALER-55, а в Китае реализуется несколько проектов LFR, относящихся к типу ММР. Итальянско-британский стартап «Ньюклео», основанный в конце 2021 года, занимается разработкой реакторов LFR сверхмалого (30 МВт (эл.)) и малого класса (200 МВт (эл.)). Хотя Франция отложила разработку усовершенствованного технологического реактора с натриевым теплоносителем для промышленной демонстрации, НИОКР по SFR и соответствующему топливному циклу продолжаются, а также в этой стране проектируется быстрый реактор на солевых расплавах (MSFR), в котором может быть применен ураново-плутониевый цикл. ЕС осуществляет проект реактора MSFR — SAMOSAFER с целью разработки и демонстрации новых барьеров безопасности для более контролируемого поведения при тяжелых авариях.

A.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики

Положение дел

38. Когенерация электроэнергии и тепла для неэлектрических применений ядерной энергии — это надежная и проверенная технология, интерес к которой продолжает расти во всем мире. Она имеет широкие рыночные перспективы и большой потенциал развития, так как в настоящее время лишь небольшая часть тепла, вырабатываемого ядерными реакторами, используется непосредственным образом. В общей сложности приблизительно 70 ядерных реакторов используются в настоящее время для неэлектрических применений, которые в широком смысле можно подразделить на опреснение морской воды, централизованное теплоснабжение, производство технологического тепла и производство водорода. Общее количество используемой тепловой энергии в этих областях составляет более 2 ТВт·ч) эквивалента электрической энергии в год. Большинство этих ядерных реакторов служат для обеспечения централизованного теплоснабжения, а около половины из них производят также технологическое тепло. Около десяти из них в настоящее время используются для выработки энергии, необходимой для опреснения морской воды, а несколько реакторов подготавливаются к работе в пилотном режиме в качестве демонстрационной установки по производству водорода.

Примерно 70 ядерных реакторов
используются в настоящее время для
неэлектрических применений,
вырабатывая более 2 ТВт·ч
эквивалента электрической энергии
ежегодно

39. Недавно Китай приступил к реализации крупной программы по развитию централизованного теплоснабжения на основе использования АЭС, присоединившись тем самым к группе существующих пользователей этой технологии, в которую входят Болгария, Венгрия, Российская Федерация, Румыния, Словакия, Украина, Чешская Республика и Швейцария. После того как в 2020 году была запущена сеть централизованного теплоснабжения, подключенная к АЭС «Хайян» в провинции Шаньдун, в 2022 году был официально начат проект

на основе АЭС «Хунъяньхэ», который позволит избежать выбросов, эквивалентных сжиганию 12 100 тонн угля, а также сократить выбросы серы, углекислого газа, пыли, оксида азота и золы. Кроме того, на АЭС «Циньшань» в провинции Чжэцзян началась реализация демонстрационного проекта по централизованному теплоснабжению, цель которого — к 2025 году обеспечить теплом за счет ядерной энергии площадь в 4 млн $м^2$, на которой находится основная городская агломерация уезда Хайань и весь район города Шупу.

40. Ряд стран рассматривают планы по внедрению опреснительных установок на основе АЭС, готовясь присоединиться к числу тех, кто имеет опыт использования этой технологии. Несколько опреснительных установок уже работают на АЭС в Японии и Российской Федерации, в то время как Индия, которая имеет многолетний опыт эксплуатации опреснительных установок в связке с ядерными реакторами, планирует в ближайшие годы расширить свои мощности по опреснению морской воды с использованием ядерной энергии.

41. В ряде стран, включая Канаду, Китай, Республику Корея, Российскую Федерацию, Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки, Францию, Швецию и Японию, изучается возможность производства водорода с использованием электричества либо тепла от ядерных реакторов. Ведутся НИОКР, ставящие своей целью увязать высокотемпературные методы производства водорода с работой усовершенствованных реакторов (таких как недавно запущенный в эксплуатацию в Китае реактор HTR-PM), а также существующего парка реакторов. В частности, в Соединенных Штатах Америки осуществляется пять различных проектов по сопряжению с существующими АЭС; четыре из них предусматривают использование электроэнергии для питания низкотемпературных электролизеров, в то время как в рамках еще одного проекта на АЭС «Прейри-Айленд» для повышения эффективности производства водорода будет также использоваться тепло, вырабатываемое на АЭС (рис. A.4). Российская Федерация намеревается запустить стендовый испытательный комплекс для экологически чистого производства водорода на Кольской АЭС, а Франция объявила, что к 2030 году планирует начать сооружение малого модульного реактора и использовать существующий парк АЭС для производства чистого водорода.

РИС. А.4. АЭС «Прейри-Айленд» в Миннесоте, Соединенные Штаты Америки, где компания «Эксел энерджи» и ее партнеры осуществляют пилотный проект по производству водорода методом высокотемпературного парового электролиза. (Фото: Shutterstock)

Тенденции

42. Растущий интерес во всем мире вызывает потенциал ядерной энергетики в плане обеспечения потребителей не только электричеством, но и теплом. Это происходит на фоне активизации усилий по борьбе с изменением климата, а также в связи с тем, что во многих регионах мира растут цены на ископаемое топливо. Исходя из того, что большинство выбросов в настоящее время обусловлены деятельностью за рамками электроэнергетического сектора, а также учитывая, что почти вся энергия для неэлектрических применений в настоящее время производится на основе ископаемого топлива, предметом особого интереса является ядерная энергия — как один из немногих источников не только электроэнергии, но и тепла, которые не сопряжены с выбросами углекислого газа, могут быть развернуты в крупных масштабах без географических ограничений и доступны в круглосуточном режиме. Кроме того, интересными возможностями обладают ММР и микрореакторы, которые имеют меньшие размеры и мощность, ведь некоторые центры потребления тепла недостаточно велики для того, чтобы использовать то количество тепла, которое вырабатывается установками гигаваттного класса. Наконец, некоторые современные реакторы, такие как HTR-PM, открывают уникальные возможности по производству высокотемпературного тепла, которое, в свою очередь, может эффективно использоваться для ряда промышленных применений.

B. Ядерный топливный цикл

B.1. Начальная стадия топливного цикла

Текущее состояние

43. В третьем квартале 2022 года спотовая цена на уран составляла около 52 долл. США за фунт U_3O_8. Это значительное увеличение по сравнению с третьим кварталом 2021 года, когда цена составляла около 32 долл. США за фунт U_3O_8. Кроме того, спотовая цена на уран выросла примерно на 42% с 2021 года и более чем на 64% за последние два года (рис. B.1). Такой устойчивый рост спотовой цены на уран оживил отрасль добычи урана, и несколько первичных производителей стали пытаться возобновить свои операции, которые были законсервированы из-за низкой спотовой цены. Речь идет о руднике «Макартур Ривер» в Канаде и руднике «Лангер-Хайнрих» в Намибии.

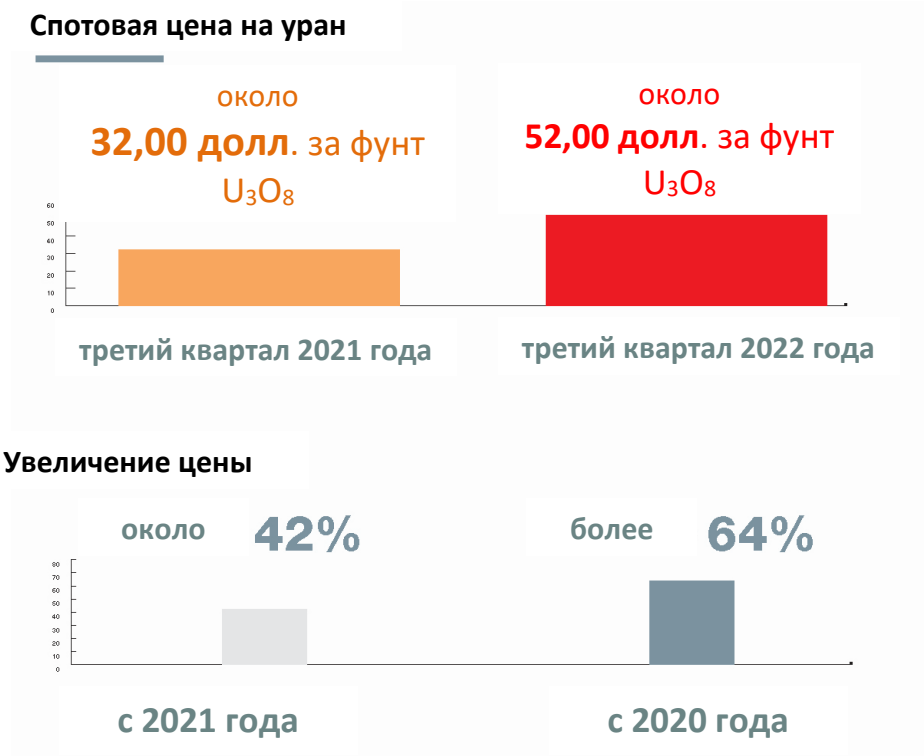


РИС. B.1. Динамика спотовых цен на уран с 2018 года. (Источник: UxC)

44. Казахстан, страна с самыми высокими показателями годового производства урана, объявила о том, что она увеличит объем производства на своих предприятиях по добыче урана методом подземного выщелачивания примерно с 70% до 90% от номинальной мощности. Рудник «Ханимун» в Австралии также объявил о возобновлении добычи и переработки методом СПВ. В 2020 году геологическая разведка урана достигла минимума , когда было израсходовано около 39,2 млн долл. США. В последние два года благодаря положительным сигналам на рынке урана геологоразведочная активность стала расти, и в 2021 году на разведку урана было потрачено уже около 71 млн долл. США.

45. Производство ядерного топлива — это отработанная технология, которая с течением времени непрерывно совершенствуется благодаря автоматизации и цифровизации, сокращению объема эксплуатационных отходов и повышению уровня радиационной защиты работников. Это позволило повысить экономические показатели (продление топливных циклов с 12 месяцев до 18 и 24 месяцев, увеличение глубины выгорания), надежность (уменьшение числа случаев повреждения топлива, создание новых видов топливных сборок, позволяющих свести к минимуму их деформацию, улучшение сейсмических характеристик, легирование твэлов, облицовка оболочки и двойная облицовка, повышение коррозионной стойкости) и устойчивость (рециклирование и многократное рециклирование топлива для легководных реакторов (ЛВР) и реакторов на быстрых нейтронах). В настоящее время существующих мощностей по производству ядерного топлива во всем мире достаточно, чтобы удовлетворить ожидаемый спрос на ядерную энергию.

46. Несколько государств-членов, некоторые из которых вносят свой вклад в ПКИ «Испытание и моделирование инновационного и устойчивого к авариям топлива (АТФ-ТС)», продолжают осуществлять программы НИОКР по внедрению аварийно-устойчивых и передовых видов топлива (АТФ), а также инновационных видов топлива с использованием передовых технологий производства, таких как технологии послойного синтеза (например, 3D-принтеров для формирования карбида кремния ядерного класса, используемого в керамическом микрокапсулированном топливе).

47. Ряд государств-членов уже рециклируют топливо в существующих реакторах и планируют делать это в реакторах, которые будут построены в будущем, в то время как в других странах ведутся НИОКР, связанные с рециклированием топлива и использованием инновационных видов топлива для ММР. Ведутся НИОКР по урандиоксидному и смешанному оксидному уран-плутониевому (МОХ) топливу и АТФ для ММР с легководным и тяжеловодным теплоносителем; металлокерамическому топливу для плавучих и наземных ММР с легководным теплоносителем; топливу TRISO для высокотемпературных охлаждаемых газом/солевым расплавом/теплопроводом ММР; металлическому или керамическому топливу для быстрых ММР с охлаждением жидким металлом/газом/теплопроводом; и топливу на солевых расплавах для ММР с охлаждением расплавленной солью.

Тенденции

48. Согласно глобальным прогнозам, спрос на уран в течение следующих пяти лет возрастет примерно со 160 млн фунтов U_3O_8 в год до примерно 190 млн фунтов. В 2022 году годовой объем мирового производства урана, по прогнозам, составит около 133 млн фунтов, а остальная часть предложения будет восполнена за счет постоянно сокращающихся вторичных источников. В ожидании дальнейшего роста спотовой цены на уран прогнозируется, что отделы закупок АЭС будут стремиться к форвардным закупкам концентрата урановой руды и вновь заключать долгосрочные контракты с поставщиками урана. Это может привести к дальнейшему увеличению спотовой цены на уран, которая, как ожидается, к 2027 году возрастет примерно с 52 долл. США за фунт U_3O_8 до примерно 65 долл. США за фунт U_3O_8.

49. Ожидается, что в ближайшие пять-десять лет откроются новые урановые рудники, в том числе в Австралии, Бразилии, Канаде, Мавритании и Намибии. Однако прогнозируемые объемы производства на этих новых предприятиях будут недостаточны для восполнения дефицита предложения, который в настоящее время покрывается за счет вторичных источников. В этой связи ожидается, что в ближайшие годы активность по разведке урана возрастет, в том числе на традиционных и нетрадиционных типах месторождений. Учитывая, что разработка и ввод в эксплуатацию нового уранового рудника после выявления и подтверждения месторождения занимает много времени (10–15 лет), начинать разведку и выявление новых запасов урана необходимо уже сейчас.

50. Чтобы обеспечить поступление урановых ресурсов на рынок тогда, когда они потребуются, для будущих поставок урана необходимы своевременные исследования и инновации в целях дальнейшего совершенствования разведки урана и разработки новых, более экономически эффективных методов добычи. Что касается устойчивости урановой промышленности и извлечения урана из месторождений с более низким содержанием и более сложными условиями добычи, то для перевода малоперспективных месторождений урана в производственный режим необходимы инновации. В 2022 году одним из примеров таких инноваций в уранодобывающей отрасли стали положительные результаты технико-экономических обоснований, связанных с разработкой рудников подземного выщелачивания на богатых месторождениях несогласного залегания. Кроме того, обогащение или повышение сортности низкосортной урановой руды сулит определенные перспективы и делает ранее нерентабельные месторождения более привлекательными. Другой значимой инновацией являются ныне разрабатываемые методы биовыщелачивания, предназначенные для подземного выщелачивания урана на месторождениях песчаникового типа. Наконец, для некоторых способов добычи урана перспективными оказались методы кучного выщелачивания, используемые в других областях горнодобывающей промышленности.

51. После аварии на АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 году усилия многих государств-членов были направлены на повышение безопасности топлива, используемого в существующих крупных легководных реакторах, и топлива, которое будет использоваться в реакторах будущих поколений, включая реакторы ММР. Многие государства-члены осуществляют интенсивные программы по задействованию АТФ, включая изготовление испытательных свинцовых стержней и испытательных свинцовых сборок, облучение и послереакторные исследования, оценку характеристик топлива, термогидравлику системы, а также разработку и валидацию кодов для расчета тяжелых аварий.

52. У некоторых государств-членов имеются планы по развитию инфраструктуры лицензирования топлива для содействия увеличению глубины выгорания и обогащения за пределы унаследованных ограничений в середине 2020-х годов, а также для безопасного и экономичного применения 24-месячного цикла для существующих легководных реакторов с увеличенным средним выгоранием и без физических изменений производственных установок и транспортных контейнеров (т.е. только через изменения в процедуре лицензирования). Для удовлетворения внутреннего и глобального спроса необходимо через устойчивые объемы содействовать коммерциализации и получению экономии за счет масштаба применительно к передовым топливным технологиям.

53. Другими факторами развития ядерного топлива являются инновационные конструкции реакторов, такие как реакторы поколения IV и ММР (от уменьшенных версий сборок для легководных реакторов до совершенно новых конструкций топлива поколения IV). Для успешного внедрения всех типов топлива для ММР потребуется полная готовность технологий производства топлива от стадии НИОКР до стадии промышленного производства. Кроме того, для производства многих типов ядерного топлива инновационных концепций, таких как некоторые виды АТФ и топлива для ММР, потребуется ВНОУ. В настоящее время цепочку поставок для производства топлива ВНОУ имеет только Российская Федерация, хотя планы по созданию инфраструктуры для ВНОУ для усовершенствованных реакторов имеют также Соединенные Штаты Америки.

B.2. Конечная стадия топливного цикла

Текущее состояние

54. Скорость накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в мировых хранилищах составляет приблизительно 7 тыс. тонн тяжелого металла (тТМ) в год, при этом его количество в хранилищах составляет приблизительно 320 тыс. тТМ. В странах с давно существующими ядерными программами, реализующих стратегии открытого топливного цикла, главные трудности по-прежнему связаны с необходимостью увеличения емкости хранилищ ОЯТ и сроков его хранения перед захоронением (рис. B.2).

РИС. B.2. Участники ПКИ Агентства «Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива – этап III» в 2019 году в рамках технической экскурсии на АЭС «Атуча» в Аргентине посетили строящееся новое хранилище .

55. В некоторых странах по истечении периода первоначальной выдержки ОЯТ часто перевозят на сухое хранение. Продолжается работа по созданию централизованных промежуточных хранилищ. В одних странах перевозка отработавшего ядерного топлива является обычной процедурой, а в других — только ведется подготовка к будущим процедурам перевозки. Государства-члены продолжают работы по удалению и перемещению своего отработавшего ядерного топлива в рамках проектов вывода своих АЭС из эксплуатации.

56. В июле 2022 года после закрытия перерабатывающего предприятия «Магнокс» Великобритания прекратила операции по переработке, что привело к значительному сокращению глобальных перерабатывающих мощностей. В Индии, Российской Федерации и Франции продолжается разработка в коммерческом масштабе новых технологий рециклирования топлива для существующих установок и топлива для усовершенствованных реакторов. В декабре 2022 года реактор БН-800 в Российской Федерации был почти на 100% загружен МОХ-топливом, что стало шагом к реализации концепции «сбалансированного ядерного топливного цикла», которая предусматривает переработку ОЯТ, рециклирование регенерированного ядерного материала для получения ядерного топлива и трансмутацию младших актинидов в реакторах на быстрых нейтронах. Было принято решение о создании в Северске, Российская Федерация, Опытно-демонстрационного энергокомплекса по переработке топлива LFR, который должен начать функционировать в 2024 году. В Министерстве энергетики США имеются различные программы, которые связывают национальные лаборатории с университетами и коммерческими организациями в целях разработки масштабируемых решений на основе таких технологий, как водная переработка и пиропроцессинг. Канадская компания «Террестриал энерджи», проектирующая IMSR, сотрудничает с Австралийской организацией по ядерной науке и технике (АНСТО), чтобы определить, подходит ли разработанный АНСТО метод переработки «синрок» для кондиционирования солевого расплава отработавшего топлива из IMSR.

Тенденции

57. Для того чтобы и далее обеспечивать безопасное хранение ОЯТ и его последующую перевозку в пункты захоронения или на заводы по переработке, по-прежнему принципиально важно понимать, как ОЯТ ведет себя в различных системах хранения и каковы механизмы старения и деградации конструкций, систем и элементов хранилищ. По мере того как в некоторых государствах-членах развиваются программы по захоронению отработавшего топлива, увеличивается количество подготовительных мероприятий, таких как разработка программ характеризации.

58. Осуществляемая Агентством координация исследований в данной области позволяет обобщать эксплуатационный опыт и результаты исследований государств-членов и стимулирует обмен информацией. Продолжение таких усилий особенно важно, если учесть, что более высокая эффективность работы реакторов была достигнута за счет производства отработавшего топлива с более высокой начальной степенью обогащения и более глубокого выгорания, что ведет к увеличению тепловыделения и повышению риска охрупчивания оболочки, а это может повлиять на последующие этапы обращения с отработавшим топливом.

59. Поскольку создаются новые виды топлива как для существующего парка реакторов, так и для реакторов усовершенствованных конструкций, включая ММР, которые могут привести к потенциально иным процедурам при обращении с отработавшим топливом, необходимо будет искать инновационные решения по обращению с отработавшим топливом, чтобы обеспечить их своевременное внедрение.

60. Несмотря на общее сокращение мировых мощностей по переработке отработавшего топлива, растет интерес к разработке передовых технологий переработки как для существующего топлива, так и для содействия внедрению и устойчивости усовершенствованных реакторов. Интеграция новых и инновационных топливных циклов с существующими топливными циклами важна для преодоления текущих проблем с энергоснабжением и обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики с соблюдением требований ядерной и физической безопасности.

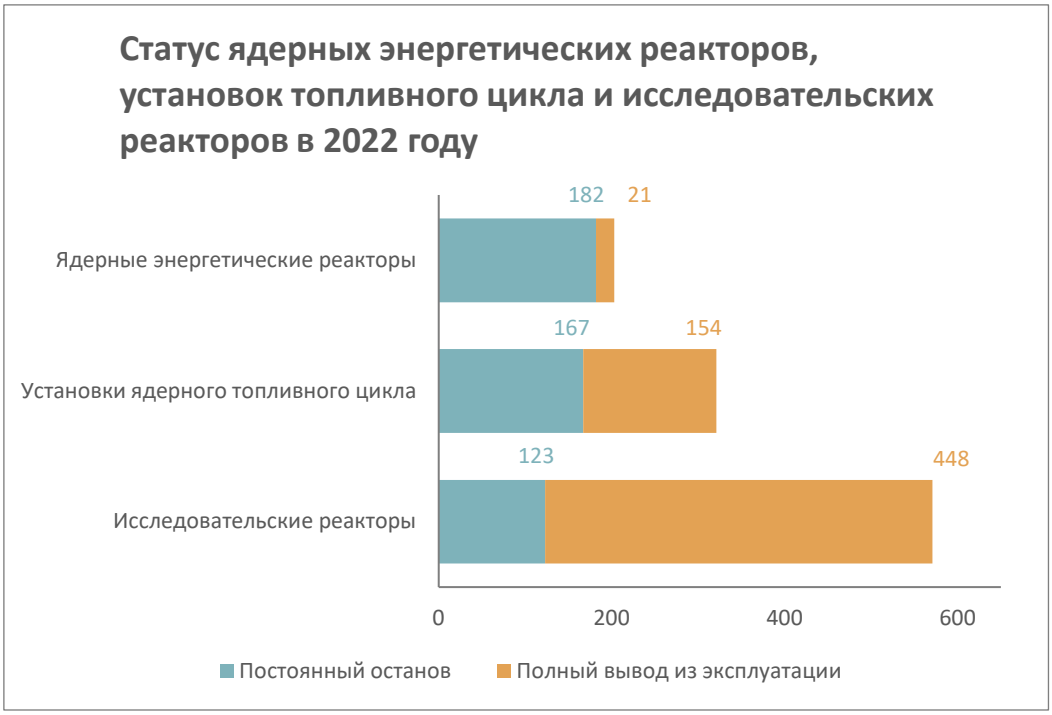
C. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами

C.1. Вывод из эксплуатации

Положение дел

61. В 2022 году были окончательно остановлены пять энергетических реакторов: «Дул-3» в Бельгии, усовершенствованные газоохлаждаемые реакторы (AGR) «Хинкли-Пойнт B-1», «Хинкли-Пойнт B-2» и «Хантерстон B-2» в Великобритании, а также PWR «Пэлисэйдс» в Соединенных Штатах Америки. Всего в мире были окончательно остановлены 203 ядерных реактора, из них 21 реактор был полностью выведен из эксплуатации. Самые масштабные программы по выводу из эксплуатации энергетических реакторов осуществляются в Германии, где в состоянии постоянного останова или в процессе вывода из эксплуатации находятся 27 реакторов, Японии, где на этих стадиях находятся 24 реактора, и Соединенных Штатах Америки, где в состоянии постоянного останова или в процессе вывода из эксплуатации находятся 28 реакторов, из которых 18 остаются в безопасной консервации, а 8 в настоящее

время демонтируются. В Соединенном Королевстве окончательно остановлены 36 газоохлаждаемых реакторов первого и второго поколения, большинство из которых после завершения эксплуатации готовятся к безопасному закрытию.



62. Работы по выводу из эксплуатации крупных объектов ядерного топливного цикла ведутся по всему миру, в том числе на нескольких объектах в Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Франции. Одно из важных направлений текущей работы — минимизация серьезных факторов риска, в том числе удаление отходов прежней деятельности, которые обычно хранятся в бассейнах или бетонных траншеях, в рамках подготовки к демонтажу установки. В Соединенном Королевстве на перерабатывающем заводе «Магнокс» идет подготовка к мероприятиям по послеэксплуатационной очистке. Полным ходом идет работа по удалению отходов прежней деятельности из бассейнов и бункеров. Во Франции на заводе в Ла-Аг продолжаются работы по удалению и кондиционированию отходов прежней деятельности, включая удаление отходов графита и магния, хранящихся в бетонных бункерах, и дезактивацию камер, доступ людей в которые ограничен или невозможен из-за уровня радиоактивности. Демонтаж всех перчаточных боксов для работы с плутонием на этом объекте был завершен, и в настоящее время основное внимание уделяется демонтажу всего основного технологического оборудования — диссольверов, смесителей-отстойников и испарителей.

63. В 2022 году на различных АЭС был достигнут значительный технический прогресс, например на АЭС «Богунице V-1» в Словакии была завершена резка и упаковка 2 корпусов реакторов, 12 парогенераторов и других компонентов первого контура (рис. С.1); на АЭС «Суперфеникс» во Франции была завершена резка большой вращающейся пробки; на АЭС «Вермонт янки» в Соединенных Штатах Америки был завершен демонтаж активной зоны реактора; на АЭС «Хосе Кабрера» в Испании был завершен снос последнего большого здания — машинного зала.

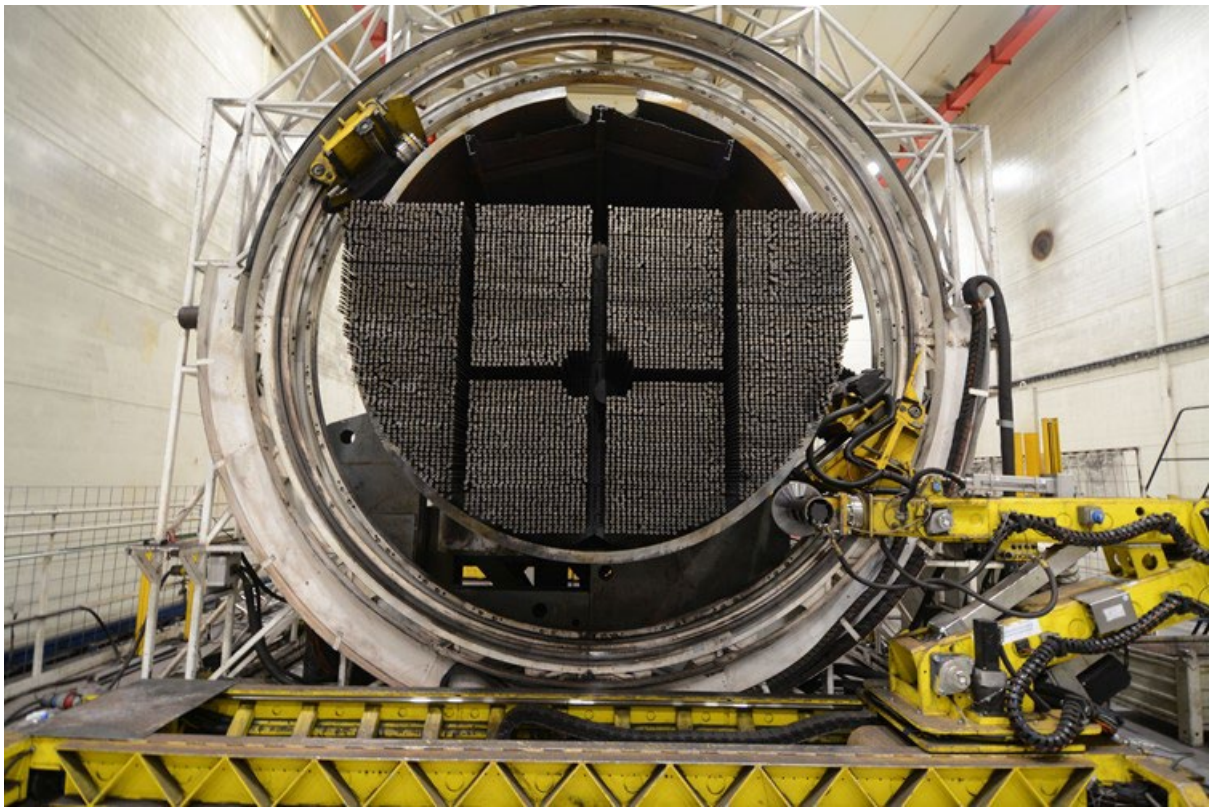


РИС. С.1. Резка парогенератора на АЭС «Богунице V-1». (Фото: компания «Ядрова а вирадёвация сполочность», Словакия)

64. В рамках реализуемой Японским агентством по атомной энергии программы, посвященной конечной стадии топливного цикла, были реализованы важные элементы первого этапа вывода из эксплуатации реактора-размножителя на быстрых нейтронах «Мондзю»: 530 топливных сборок из активной зоны реактора, а также расположенное вне корпуса реактора хранилище топлива в октябре 2022 года были перемещены в бассейн выдержки отработавшего топлива. Удаление натрия в сыпучем виде из теплоносителя первого контура было завершено в апреле 2022 года.

65. 22 июля 2022 года Управление по ядерному регулированию Японии одобрило измененный план монтажа установки для сброса воды, очищенной с помощью усовершенствованной системы водоочистки (ALPS), который был представлен Токийской электроэнергетической компанией в декабре 2021 года. Сброс планируется начать в 2023 году, в настоящее время ведется монтаж оборудования для сброса. Что касается извлечения обломков топлива из корпусов реакторов, то было решено сначала провести пробное извлечение из 2-го энергоблока. Изготовление оборудования для этой задачи, такого как роботизированные руки-кронштейны и манипуляторы, уже завершено (рис. С.2), и в настоящее время принимаются меры для повышения их функциональности, а также ведется детальное исследование зон проникновения в защитные оболочки, где будет установлено оборудование.

РИС. С.2. Испытательный зал для роботизированных рук-кронштейнов и манипуляторов, которые будут применяться на АЭС «Фукусима-дайити». (Фото: Министерство экономики, торговли и промышленности, Япония)

Тенденции

66. Прогнозируя динамику установленной мощности АЭС на период до 2050 года, Агентство предлагает два сценария: «высокий» и «низкий». Высокий сценарий предполагает выведение из эксплуатации порядка 25% текущей установленной мощности, срок службы многих установок будет продлен, кроме того, начнется строительство большого числа новых объектов. Согласно низкому сценарию из эксплуатации будет выведено до 75% текущих установленных мощностей, их заменят новые объекты. Таким образом, в настоящее время существует значительная неопределенность относительно темпов выведения мощностей из строя в период до 2050 года.

67. Темпы выведения ядерных установок из эксплуатации в последние годы примерно соответствуют темпам ввода в эксплуатацию новых установок. Если говорить о выводе из эксплуатации АЭС, то здесь важную роль играет останов AGR второго поколения в Соединенном Королевстве по экономическим причинам: ожидаемые доходы от дальнейшей эксплуатации недостаточны, чтобы оправдать расходы на продление срока службы установок.

В Германии окончательный останов трех последних действующих установок был перенесен с конца 2022 года на апрель 2023 года из-за разразившегося энергетического кризиса.

68. Несмотря на неопределенность в отношении будущих темпов закрытия объектов, количество объектов, находящихся в стадии активного демонтажа, продолжает расти, при этом наблюдается тенденция к проведению демонтажа объектов вскоре после постоянного закрытия. Среди факторов, влияющих на эту тенденцию, — проводимая государствами политика, стремление владельцев установок минимизировать расходы, связанные с эксплуатацией установки в течение длительного времени, и отсутствие определенности относительно стоимости последующего демонтажа и связанного с ним обращения с материалами.

69. Все более важную роль в осуществлении проектов по выводу из эксплуатации ядерных установок играют цифровые технологии, в частности технологии виртуальной и дополненной реальности, которые помогают в планировании и практической работе. Цифровые технологии успешно применяются на самых разных этапах процесса вывода установки из эксплуатации: в частности, они обеспечивают улучшенные средства сбора, анализа и отображения информации, необходимой для планирования стратегий демонтажа; позволяют использовать роботов для обеспечения безопасности персонала, содействуют подготовке операторов путем моделирования запланированных действий в виртуальной среде с реалистичными элементами; способствуют более точной оценке будущего объема отходов (и, как следствие, затрат) и помогают более качественно визуализировать сценарии вывода из эксплуатации как для операторов, так и для внешних заинтересованных сторон. Цифровые технологии принесут атомной отрасли в целом гораздо больше пользы, когда знания, полученные на этапе вывода из эксплуатации, будут переданы проектировщикам и операторам АЭС, а также организациям технической поддержки.

C.2. Восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными материалами природного происхождения

Восстановление окружающей среды

70. Восстановление окружающей среды может быть медленным процессом, и поэтому в некоторых случаях прогресс идет постепенно. Однако в других случаях сохраняются проблемы, затрудняющие продвижение вперед. С 1989 года Управление по охране окружающей среды Министерства энергетики Соединенных Штатов Америки завершило работы по очистке территории на 92 объектах ядерного наследия по всей стране, последним из таких объектов стала Брукхейвенская национальная лаборатория. Осталось пятнадцать объектов, требующих наиболее сложных и затратных работ. Усилия по устранению негативных последствий добычи урана в Европе и Центральной Азии продолжают приносить плоды. В частности, в ближайшем будущем для определения характеристик объектов, загрязненных в результате прежней деятельности по добыче урана в Центральной Азии, планируется применять новую технологию, предусматривающую использование беспилотников с установленными на них высокочувствительными детекторами гамма-излучения. Для подготовки специалистов в таких областях, как вывод из эксплуатации и восстановление окружающей среды, консорциум под руководством Университета Порту (Португалия) под эгидой программы Европейской комиссии «Эразмус+» разрабатывает программу магистратуры по этим предметам.

Обращение с радиоактивным материалом природного происхождения

71. Многие страны сталкиваются с проблемами в области обращения с остатками радиоактивного материала природного происхождения (РМПП) (рис. C.3). Требуется поддержка для внедрения инфраструктуры, необходимой для удовлетворения их потребностей. Узкие места возникают из-за отсутствия стратегий в отношении использования остатков РМПП и вариантов

утилизации РМПП, когда он объявляется отходами. Отсутствие аккредитованных лабораторий во многих государствах-членах — еще одно препятствие, усугубляющее проблемы, связанные с перевозкой этих материалов для утилизации в другой стране.

РИС. С.3. Остатки после добычи меди с присутствием РМПП

Тенденции

Восстановление окружающей среды

72. Новая тенденция в области восстановления окружающей среды — включение в концепцию уменьшения вреда повышения ценности загрязненного участка. Переработка старых отходов может свести к минимуму необходимость дорогостоящих восстановительных мероприятий за счет геохимической и геотехнической стабилизации остатков. Это позволяет сократить обязательства и расходы на окончательное закрытие, а также способствует появлению

«зеленых» проектов, востребованных на рынке. В условиях циклической экономики восстановление является важнейшим этапом горнодобывающих работ, поскольку позволяет очистить участок для продуктивного использования в будущем. В качестве примера можно привести начатую в Соединенных Штатах Америки программу, в рамках которой выделяются значительные ресурсы для развития экологически чистой энергетики на участках, ранее задействованных в горнодобывающей деятельности, что позволяет трансформировать их в центры развития чистой энергетики.

73. Применительно к текущим и будущим проектам крайне важно планировать мероприятия по закрытию уже на подготовительном этапе. Однако для полноценного использования этих возможностей на уровне участка необходима расширенная модель циклической экономики, в рамках которой признаются доказавшие свою эффективность подходы к обеспечению устойчивости, которые должны охватывать экологические, экономические и социальные аспекты в рамках процесса принятия решений на основе широкого участия. В связи с этим наблюдается тенденция к применению технологий ИИ и МО для поддержки принятия решений в сложных ситуациях, в том числе в области восстановления окружающей среды.

Обращение с радиоактивным материалом природного происхождения

74. Принципы цикличности также применяются в деятельности, связанной с обращением с РМПП. Специалисты из различных отраслей изучают процессы, которые могут повысить ценность остатков РМПП. В качестве примеров активной работы в этом направлении, в частности, можно привести использование фосфогипса в сельском хозяйстве в качестве почвенного мелиоранта и строительного материала, а также использование ильменитового песка в промышленном производстве цемента и керамики. Для максимально полного раскрытия экономического потенциала остатков, образующихся в промышленных процессах, связанных с РМПП, необходимы инвестиции в технологические инновации, проведение надлежащей политики на национальном уровне, инвентаризация таких материалов и создание нестандартных механизмов финансирования, что позволит также обеспечить соответствие Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года.

C.3. Обращение с радиоактивными отходами

Положение дел

75. В 2022 году в области обращения с радиоактивными отходами по-прежнему наблюдался устойчивый прогресс, особенно в реализации программ глубинного геологического захоронения (ГГЗ) и дальнейшем безопасном внедрении технологий обращения с отходами перед захоронением.

76. Хотя технологии кондиционирования и обработки подавляющего большинства потоков радиоактивных отходов разработаны и внедряются, бывает сложно определить, какие методы оптимальны как с технической, так и с финансовой точки зрения. Для выбора технологии необходимы знания об отходах и их характеристиках, информация о применимых критериях приемлемости отходов и понимание нормативных требований. Пакистанская комиссия по атомной энергии разработала средства для определения характеристик как отходов АЭС, так и отходов, образующихся при выводе из эксплуатации. Помимо средств для определения характеристик, продолжается разработка критериев приемлемости отходов для пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов (НСАО). В нескольких странах с небольшими объемами отходов разрабатываются централизованные решения по обращению с ними перед захоронением. В Хорватии было принято решение создать центр по обращению с радиоактивными отходами в Черкежовце, а в Эстонии был выведен из эксплуатации объект типа «Радон», при этом все отходы был перевезены на объект в Палдиски.

77. После реализации комплексной программы по обеспечению безопасных условий на Чернобыльской АЭС на Украине возобновилась деятельность по переработке и захоронению радиоактивных отходов (работы на этих объектах были остановлены в феврале 2022 года).

78. Благодаря предложенной Агентством Глобальной инициативе по обращению с радием-226 несколько государств-членов уже нашли варианты использования изъятых из употребления источников радия. В Исландии источники радия-226 были кондиционированы для перевозки с целью переработки в радиофармацевтические препараты, применяющиеся для таргетного альфа-облучения злокачественных клеток (рис. С.4).

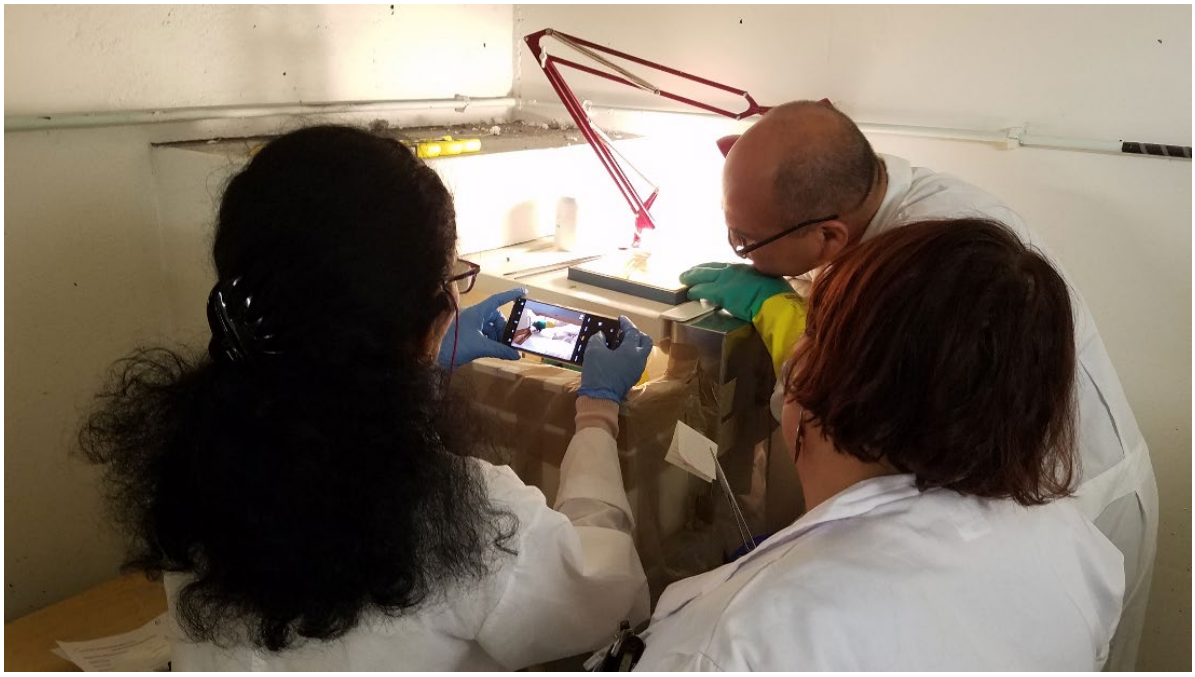


РИС. С.4. Использованные радиевые иглы проходят кондиционирование в Исландии для дальнейшей переработки.

79. В 2020 году Канада начала процесс модернизации своей политики в отношении радиоактивных отходов, к которому старалась привлекать широкий круг заинтересованных сторон, а в феврале 2022 года представила проект политики в отношении радиоактивных отходов и вывода из эксплуатации для проведения общественного обсуждения. Национальная комплексная стратегия Канады в области обращения с радиоактивными отходами, в которой особое внимание уделяется грамотному обращению с отходами (у всех потоков отходов, включенных в национальный инвентарный перечень, должно быть запланированное решение по захоронению), была опубликована для проведения общественного обсуждения в августе 2022 года. В мае 2022 года Ядерные лаборатории Канады объявили, что проект в Порт-Грэнби находится на долгосрочном техническом обслуживании и под мониторингом после помещения 1,3 млн тонн низкоактивных отходов в наземное хранилище в виде насыпи, которое было закрыто в конце 2021 года.

80. Продвигается реализация программ ГГЗ высокоактивных отходов. Финская организация по обращению с отходами «Посива» завершила прокладку первых пяти туннелей для захоронения отходов в рамках подготовки к началу окончательного захоронения отработавшего топлива, запланированного на 2025 год. В январе 2022 года правительство Швеции выдало Шведской компании по обращению с ядерным топливом и отходами разрешение на начало строительства хранилища отработавшего топлива в Форсмарке, а также установки по

герметизации в Оскарсхамне. Проведенный затем на веб-сайте муниципалитета Эстаммар опрос общественного мнения показал, что строительство объекта ГГЗ поддерживают более 80% респондентов — больше, чем когда-либо. В рамках проекта «Сижео» во Франции планировалось подать заявку на получение разрешения на строительство до конца 2022 года. В Красноярском крае, Российская Федерация, ведутся полномасштабные и лабораторные исследования горного массива для строительства лаборатории ГГХ, их завершение запланировано на 2023 год.

81. Что касается выбора места для сооружения объекта ГГЗ, в сентябре 2022 года Национальное объединение по захоронению радиоактивных отходов Швейцарии рекомендовало участок в районе Нордлих-Лагерн и планирует обратиться за разрешением в 2024 году. Организация по обращению с ядерными отходами Канады продолжает взаимодействовать с выразившими заинтересованность территориальными общинами и намерена рекомендовать участок для размещения объекта ГГЗ в 2024 году.

Тенденции

82. Во многих государствах-членах вводятся в действие или уточняются национальная политика и стратегии в области обращения с радиоактивными отходами. В государствах — членах ЕС это делается для выполнения обязательств, предусмотренных статьей 14.3 директивы Совета 2011/70/EURATOM от 19 июля 2011 года.

83. Растут масштабы возврата изъятых из употребления высокоактивных источников поставщикам для переработки и захоронения. В 2023 году планируется вывезти более 30 высокоактивных источников примерно из десяти государств-членов. Многие страны ведут успешную работу в сфере обращения с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками (ИЗРИ), однако захоронение ИЗРИ по-прежнему сопряжено с трудностями, особенно в странах с менее масштабными ядерными программами. В 2023 году Малайзия планирует завершить свой первый проект по скважинному захоронению ИЗРИ. За этим проектом с большим интересом наблюдают многие государства-члены, чьи отходы в основном относятся к ИЗРИ. В частности, эту технологию захоронения рассматривают Болгария, Гана и Грузия.

84. Сведение к минимуму радиоактивных отходов по-прежнему является приоритетом. Технологии термической обработки и суперкомпактирование остаются мировым отраслевым стандартом для значительного сокращения объема твердых НСАО. Специалисты государств-членов в настоящее время активно изучают использование геополимеров в качестве замены обычному портландцементу. Во Франции компании Électricité de France и Veolia создали совместное предприятие Waste2Glass, которое занимается переработкой отходов (кроме высокоактивных) в стабильную и долговечную стекловидную форму. В Соединенном Королевстве исследовательский центр в Харуэлле в сотрудничестве с компанией Augean, занимающейся обращением с опасными отходами, работает над применением технологии обработки водой под сверхвысоким давлением для дезактивации труб из исследовательского центра, что позволило бы отправить их на переработку вместо захоронения в качестве радиоактивных отходов.

85. В деле обращения с отходами прежней деятельности также наблюдается прогресс. На площадке «Ханфорд» в Соединенных Штатах Америки впервые началась крупномасштабная обработка радиохимических отходов. С 1950-х годов образовалось более 50 млн галлонов отходов, которые в настоящее время хранятся в подземных резервуарах в ожидании окончательной утилизации. В Нидерландах строится новое многофункциональное хранилище для радиоактивных отходов прежней деятельности, образовавшихся при производстве медицинских изотопов. Места в хранилище будет достаточно для удовлетворения потребностей

в хранении отходов до 2050 года. В Соединенном Королевстве началась реализация рассчитанной на 20 лет программы по перемещению отходов в виде магниевой стружки, образовавшихся при переработке топлива «Магнокс», из бункеров глубиной шесть метров в специально построенные контейнеры для отходов из нержавеющей стали для перемещения в современное хранилище.

86. Что касается международного сотрудничества в области обращения с радиоактивными отходами, то между компаниями «ЧЭЗ» (Чешская Республика) и «Ядрова а вирадёвация сполочность» (Словакия) был подписан меморандум о сотрудничестве с целью обмена опытом в области минимизации отходов и управления старением. Ассоциация по вопросам многонациональных хранилищ радиоактивных отходов (Ассоциация ЕОСПЗ) продолжила свои усилия по поиску решений на многонациональной основе для государств-членов с небольшими объемами долгоживущих НАО и САО. Европейская совместная программа по обращению с радиоактивными отходами продолжала привлекать участников к развитию сотрудничества в области безопасного обращения с радиоактивными отходами. В рамках созданной ЕС Платформы по внедрению технологии геологического захоронения радиоактивных отходов продолжается активное осуществление положений доклада о концепции развития до 2025 года, которая предусматривает, что к 2025 году в Европе будут безопасно эксплуатироваться первые пункты геологического захоронения отработавшего топлива, высокоактивных отходов и других долгоживущих радиоактивных отходов.

D. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике

Положение дел

87. В реализации проекта ИТЭР достигнут ощутимый прогресс (рис. D.1). В июне 2022 года степень реализации проекта составляла 77%. Завершена сборка и установка в шахту токамака сборочного узла первого сектора вакуумной камеры, который включает в себя две связанные катушки тороидального поля и элементы теплового экрана; на площадку ИТЭР доставлен третий сектор вакуумной камеры. После завершения работ по монтажу верхней крышки криостата все элементы криостата теперь готовы. Достигнут значительный прогресс в подготовке вспомогательных систем установки: доставлена и готова к вводу в эксплуатацию система охлаждающей воды; завершено строительство криогенного комплекса и в настоящее время ведутся его функциональные испытания; кроме того, в зданиях преобразовательных систем для питания магнитов установлено 100% оборудования, необходимого для получения первой плазмы. С другой стороны, недавние результаты анализа первых в своем роде ключевых компонентов ИТЭР свидетельствуют о необходимости проведения масштабных ремонтных работ. Кроме того, Организация ИТЭР занимается решением вопросов нормативного регулирования, возникающих со стороны Управления по ядерной безопасности Франции.

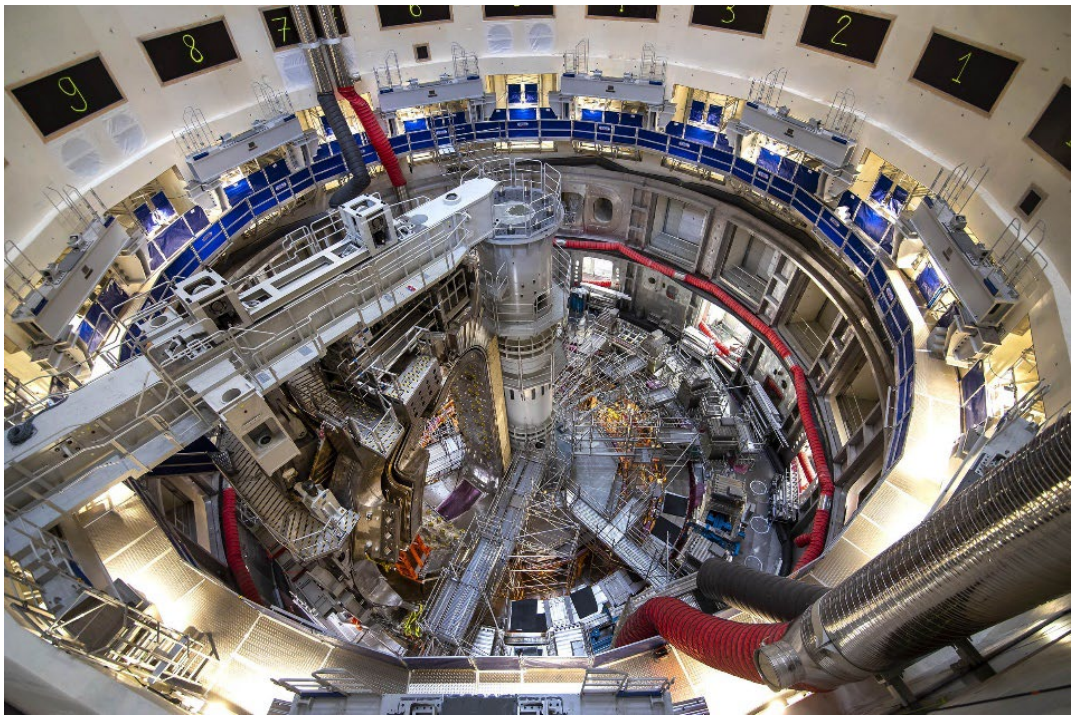


РИС. D.1. Работы в самом сердце здания токамака ИТЭР. В этой шахте глубиной 30 метров ведется сборка оборудования ИТЭР. Сборка производится в направлении снизу вверх. (Фото: Организация ИТЭР)

88. Отмечается дальнейший прогресс в создании консорциума для сооружения в Испании Международной установки по облучению материалов для термоядерного синтеза (ИФМИФ) — Источника нейтронов для исследований в рамках проекта DEMO, которая имеет важнейшее значение для разработки и валидации (подтверждения соответствия) материалов, применяемых в области термоядерного синтеза. Завершено планирование работ по проекту, в настоящее время привлекается финансирование для покрытия расходов на строительство. Аналогичным образом, в рамках осуществляемого в Японии проекта по валидации инженерно-технических решений и техническому проектированию для ИФМИФ продолжались работы по техническому проектированию ИФМИФ и сбору данных, необходимых для принятия решений в отношении сооружения, эксплуатации, применения и вывода из эксплуатации будущего источника нейтронов для термоядерных исследований, в частности, были завершены процедуры валидации инженерно-технических решений для трех основных участков ИФМИФ: испытательного участка, участка литиевой мишени и ускорительного участка.

89. Начатый в апреле 2020 года ввод в эксплуатацию токамака JT-60SA в Японии был прерван из-за недостаточных параметров изоляции токопроводящих частей в одной из магнитных катушек. В настоящее время принимаются меры по улучшению параметров изоляции и ожидается, что работы по вводу в эксплуатацию будут возобновлены позднее в 2023 году.

90. В октябре 2022 года начался второй этап экспериментальной кампании установки Wendelstein 7-X (W7-X) — самого высокотехнологичного стелларатора в мире, расположенного в Германии (рис. D.2). Стелларатор W7-X теперь полностью оснащен набором обращенных к плазме компонентов с водяным охлаждением, делающих возможным поддержание плазменного разряда длительностью до 30 минут при мощности нагрева 10 МВт, что должно способствовать достижению режима непрерывной работы.

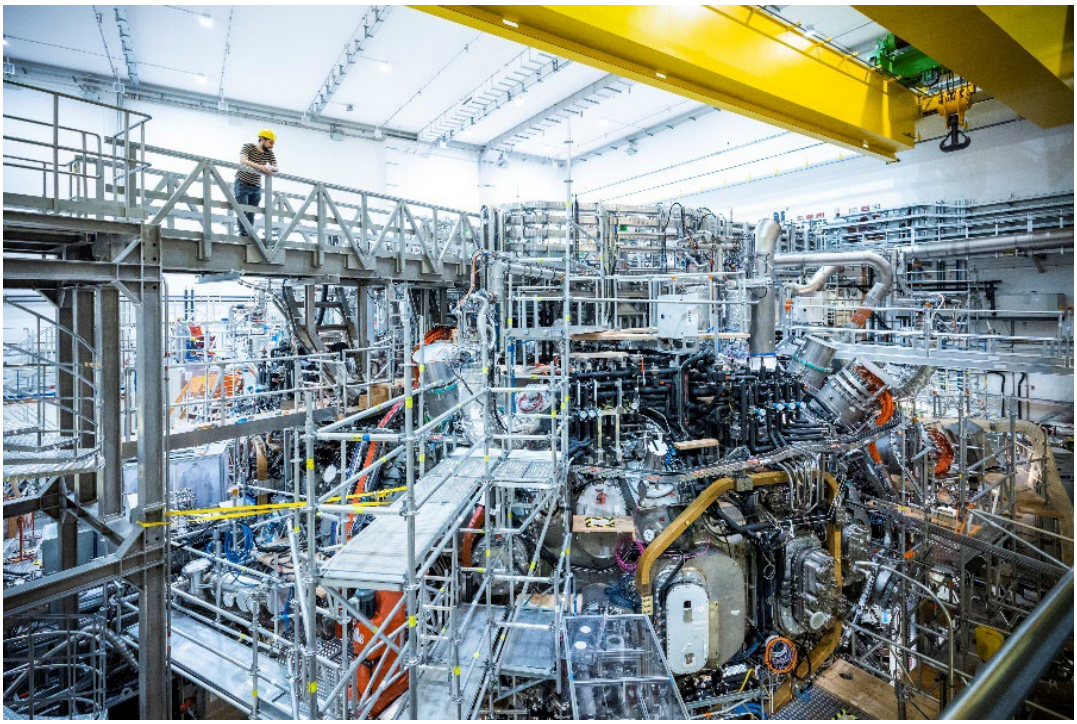


РИС. D.2. Получив удвоенную мощность нагрева, 40 новых диагностических приборов и 6,8 километров труб системы охлаждения, стелларатор W7-X готов к началу второй экспериментальной кампании.
(Фото: Институт физики плазмы им. Макса Планка)

91. В опубликованном в сентябре 2022 года исследовании[1] сообщалось, что в ходе экспериментов на корейском усовершенствованном исследовательском токамаке со сверхпроводящим соленоидом в Республике Корея (KSTAR) был достигнут режим плазменного шнура, удовлетворяющий требованиям для создания энергоустановки, включая температуру свыше 100 миллионов кельвинов и достаточный контроль плазменных нестабильностей для удержания плазмы в стабильном состоянии в течение десятков секунд. Эти результаты повысили уверенность в возможности использования конструкции токамака как перспективного решения для коммерческих термоядерных электростанций.

92. 13 декабря 2022 года Министерство энергетики США объявило о достижении исторического научного прорыва в области термоядерной энергии. Исследователям, работающим на Национальной установке по термоядерному зажиганию (НИФ) в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (ЛЛНЛ), удалось произвести около 3,15 мегаджоулей термоядерной энергии из общего количества 2,05 мегаджоулей с помощью 192 лазеров; таким образом, впервые в термоядерном эксперименте был достигнут прирост энергии в мишени порядка 1,5. Энергия, необходимая для питания лазеров, составила примерно 300 мегаджоулей.

93. Правительствами отдельных стран, частными компаниями и некоторыми государственно-частными совместными предприятиями продолжают разрабатываться концептуальные модели демонстрационных термоядерных энергетических установок (DEMO), целью которых является демонстрация возможности получить чистый выигрыш в электроэнергии от термоядерного синтеза (рис. D.3). В Китае, Европейском союзе, Республике Корея, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Японии на разных стадиях разработки находятся по меньшей мере 11 таких установок, при этом намеченные сроки

[1] Han, H., Park, S.J., Sung, C. et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions. Nature 609, 269–275 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-022-05008-1

завершения работ варьируются от 2025 до 2055 года. В Италии продолжалось строительство опытного реактора-токамака с дивертором (DTT) — нового сверхпроводящего токамака, предназначенного для изучения передовых решений в области диверторов для DEMO.

РИС. D.3. В настоящее время находятся в эксплуатации, в процессе сооружения или планирования более 130 экспериментальных термоядерных устройств, принадлежащих как государственным, так и частным организациям, а ряд организаций рассматривают варианты создания демонстрационных термоядерных энергетических установок.
(Источник: Информационная система МАГАТЭ по термоядерным устройствам)

94. В октябре 2022 года правительство Соединенного Королевства объявило о выборе площадки угольной электростанции в Уэст-Бертоне, Ноттингемшир, для реализации своей программы по созданию установки типа DEMO «Сферический токамак для производства энергии» (STEP), которая должна быть завершена к 2040 году и призвана продемонстрировать возможность выработки нетто-электроэнергии на основе реакции синтеза и производить тритий в качестве собственного топлива.

95. Также в октябре 2022 года компания «Дженерал атомикс» в Соединенных Штатах Америки объявила о планах по созданию экспериментальной термоядерной установки на основе компактного усовершенствованного токамака со стационарным режимом горения (рисунок D.4). В основу проектного решения будет положено использование усовершенствованных датчиков, алгоритмов управления и высокопроизводительных компьютеров для контроля плазмы, модулей бланкета из карбида кремния для воспроизводства трития и нагрева с помощью микроволнового излучения для запуска термоядерных реакций.

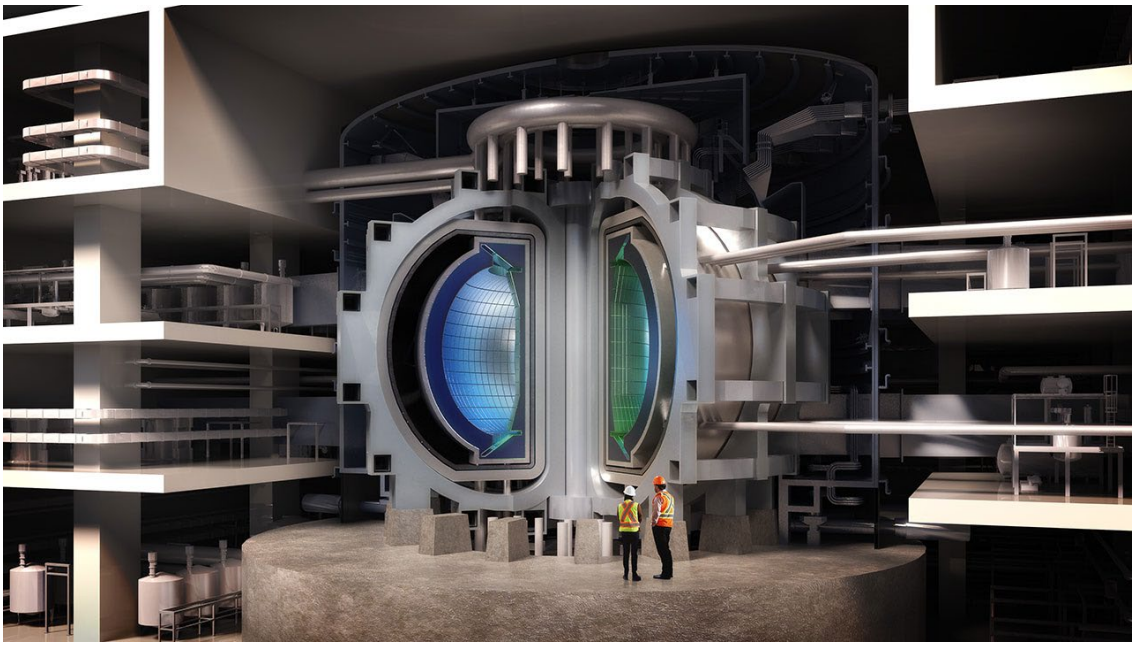


РИС. D.4. Визуализация внутренней части экспериментальной термоядерной установки компании «Дженерал атомикс». (Источник: «Дженерал атомикс»)

96. В 2022 году по-прежнему отмечался впечатляющий рост инвестиций в частном секторе. Компании частного сектора заявили, что привлекли в общей сложности около 5 миллиардов долларов США, причем в период с июня 2021 года — более 3 миллиардов долларов США. По состоянию на 2022 год насчитывалось 33 такие компании в разных странах мира, а именно в Австралии, Германии, Израиле, Италии, Канаде, Китае, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Франции и Японии (в одних только Соединенных Штатах Америки зарегистрировано более 70% компаний).

Тенденции

97. В Соединенных Штатах Америки на состоявшемся в марте 2022 года саммите Белого дома «Разработка амбициозной десятилетней концепции коммерческого использования энергии термоядерного синтеза» были выдвинуты три новые инициативы, в числе которых — новая общеорганизационная инициатива министерства энергетики (МЭ) США в области термоядерного синтеза, во исполнение которой в состав Управления МЭ по науке, курируемого заместителем министра по науке и инновациям, включен новый ведущий координатор по энергии термоядерного синтеза. Общей темой этих инициатив являлось признание того факта, что партнерство между государственным и частным сектором открывает возможность для активизации исследований, разработок и демонстрационных работ в области термоядерной энергии. Как следствие, в сентябре 2022 года Управление МЭ по науке объявило о предоставлении возможности финансирования и приеме заявок на участие в новой поэтапной программе развития термоядерного синтеза в партнерстве с частным сектором в целях успешной разработки экспериментальной термоядерной установки.

98. Удалось значительно повысить эффективность как моделирования динамики плазмы с использованием ИИ, так и управления экспериментами по термоядерному синтезу в реальном времени, что позволяет рассчитывать на скорое освоение энергии термоядерного синтеза. Одним из примеров является опубликованное в 2022 году исследование, в котором описывается, как в токамаке TCV в Швейцарии с помощью систем управления на основе ИИ удалось сформировать и поддерживать широкий спектр форм и конфигураций плазмы, оперируя 19 магнитными катушками внутри корпуса устройства (рис. D.5). В рамках недавно запущенного проекта

координированных исследований (ПКИ) Агентство и его партнеры разработали сценарии использования и методы сравнительного анализа, а также собрали на международном уровне соответствующие данные для тестирования основанных на ИИ приложений в области физики термоядерного синтеза.

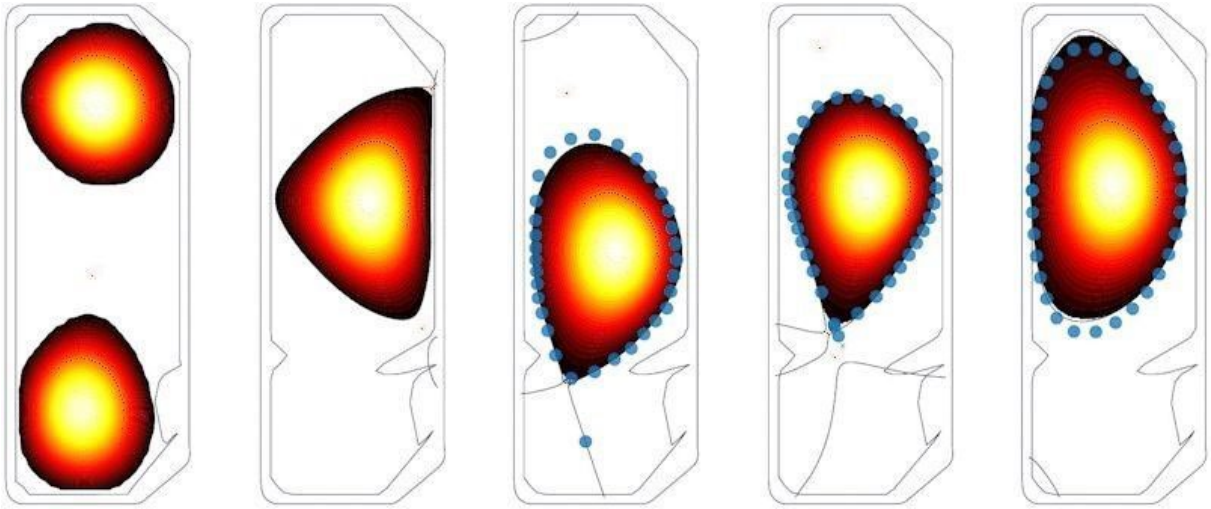


РИС. D.5. Спектр различных форм и конфигураций плазмы, сгенерированных при помощи управляющей системы на основе ИИ. Слева направо: капли, обратная треугольность, ITER-подобная форма, «снежинка», вытянутость плазмы. (Источник: компания «Дипмайнд» и Швейцарский центр изучения плазмы Швейцарского федерального технологического института в Лозанне)

99. Помимо экспериментальных исследований государства-члены ускоряют разработку технологии, привлекая заинтересованные компании частного сектора, что привело к существенному росту инвестиций и появлению в последнее время новых прорывных результатов, а также значительному прогрессу в осуществлении крупных международных и национальных проектов в области термоядерного синтеза. В этом контексте несколько государств-членов рассматривают варианты подходящей национальной нормативной базы обеспечения безопасности термоядерных систем. Существующие нормы и руководящие материалы по проектной безопасности ядерных установок, таких как АЭС или ускорители элементарных частиц, не отражают специфику термоядерных энергетических установок, как и не учитывают их потенциальные риски.

100. В настоящее время около десяти государств-членов занимаются нормативным регулированием различных экспериментальных термоядерных установок. В целом при эксплуатации таких установок для демонстрации жизнеспособности предлагаемых концепций образуются весьма незначительные количества радиоактивных материалов. Создавая условия для ранних НИОКР по созданию будущих коммерческих термоядерных установок, государства-члены применяют и при необходимости адаптируют существующие требования в части разрешительной и надзорной деятельности, которые содержатся в нормативных документах, охватывающих как вопросы радиационной защиты, так и ядерные установки/устройства. Такой подход целесообразен только в ближайшей перспективе, а в будущем потребуются дальнейшие подвижки в этой области.

101. Многие страны признают, что с учетом дополнительных сложностей, возникающих в связи с коммерческими установками термоядерного синтеза, необходимо будет разработать и принять обновленную или новую национальную нормативную базу. Такие сложности могут включать необходимость использования или формирования более масштабных количеств радиоактивных материалов и экстремальных условий эксплуатации (например, высокие температуры, вакуум,

технологии жидкометаллических теплоносителей), что потребует разработки новых материалов. Кроме того, по сравнению с процессами ядерного деления термоядерный синтез порождает различные степени опасности и связанные с ними риски, что, соответственно, может указывать на необходимость в специальной нормативной базе. Кроме того, могут существовать различные ожидания в отношении мер по управлению рисками и подходов регулирующих органов.

102. Полезным для развития технологии термоядерного синтеза в целях производства энергии может оказаться 70-летний опыт создания реакторов, основанных на процессах деления атомных ядер, что обеспечит синергетическую связь между разработками в области ядерного деления и термоядерного синтеза.

103. Разработка надлежащей национальной правовой, институциональной и регулирующей основы для термоядерного синтеза неразрывно связана с развитием этой новой технологии и ее будущим коммерческим внедрением. Совершенно очевидно, что для поддержки и ускорения использования глобальной отрасли термоядерной энергетики будет необходимо согласование на международном уровне нормативно-правовой практики в этой области.

E. Исследовательские реакторы, ускорители частиц и ядерные контрольно-измерительные приборы

E.1. Исследовательские реакторы

Положение дел

104. На конец 2022 года в 53 странах насчитывалось 233 действующих исследовательских реактора, включая временно остановленные. Они по-прежнему использовались для генерации пучков нейтронов и предоставления незаменимых услуг по облучению в научных, медицинских и промышленных целях, а также для обучения и подготовки кадров. В таблице E-1 приложения указаны наиболее распространенные виды применения исследовательских реакторов.

233 исследовательских реактора эксплуатируются в 53 странах по состоянию на конец 2022 года

105. Одиннадцать новых исследовательских реакторов, включая одну подкритическую сборку и одну систему на базе ускорителя, сооружаются в десяти странах: Аргентине, Многонациональном Государстве Боливия, Бразилии, Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине, Франции и Чешской Республике. Официальные планы по строительству новых исследовательских реакторов есть у 14 государств-членов: Бангладеш, Беларуси, Бельгии, Вьетнама, Замбии, Индии, Китая, Нигерии, Нидерландов, Соединенных Штатов Америки, Таджикистана, Таиланда, Филиппин и Южной Африки. Вопрос о строительстве исследовательских реакторов рассматривает значительное число стран: Азербайджан, Гана, Индия, Ирак, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Руанда, Сенегал, Судан, Тунис, Филиппины и Эфиопия.

106. Продолжались международные усилия по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском секторе. В 2022 году был переведен на низкообогащенный уран (НОУ) реактор ИВГ.1М в Казахстане. На сегодняшний день в общей сложности 108 исследовательских реакторов и крупных установок по производству медицинских изотопов были переведены с ВОУ на НОУ, или же было подтверждено их закрытие. К апрелю 2023 года все основные мировые производители молибдена-99, являющегося наиболее востребованным медицинским радиоизотопом, будут использовать методы производства без использования ВОУ. В общей сложности 6885 кг ВОУ были возвращены в страны происхождения или иным образом перемещены из 48 стран (включая Тайвань, Китай).

Тенденции

107. Доля исследовательских реакторов, находящихся в эксплуатации не менее 40 лет, приближается к 70%. Чтобы обеспечить непрерывную безопасную эксплуатацию в течение 60 и более лет, у многих эксплуатирующих организаций внедрены или внедряются инициативные стратегии и осуществляются программы систематического управления старением, реконструкции и модернизации. Некоторые организации, которые занимаются эксплуатацией наиболее востребованных исследовательских реакторов, рассматривают возможность продления срока их активной эксплуатации до 80 или даже 100 лет (рис. E.1). Общепринятыми частями таких программ становятся проверка конструкций, систем и элементов с точки зрения их влияния на безопасность и надежность эксплуатации, определение и понимание механизмов деструкции, а также обнаружение, мониторинг и смягчение последствий старения.

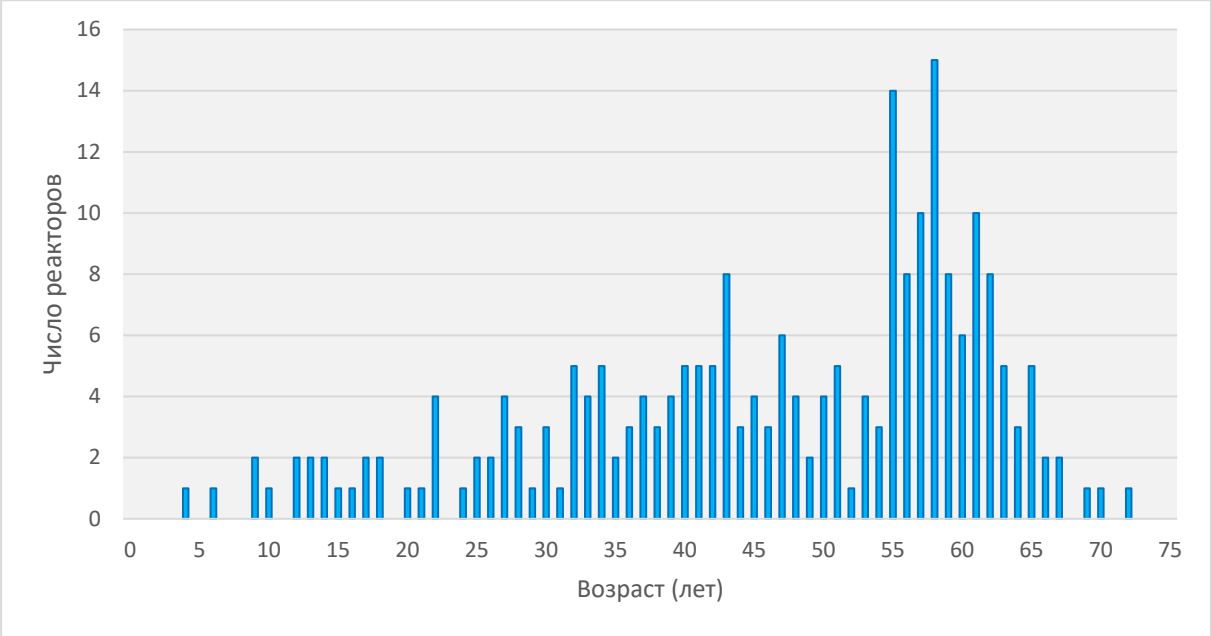


РИС. E.1. Распределение по возрасту находящихся в эксплуатации исследовательских реакторов, ноябрь 2022 года. (Источник: База данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам)

108. Многие страны используют возможности доступа к исследовательским реакторам посредством международных и региональных инициатив сотрудничества, таких как международные центры на базе исследовательских реакторов и реакторные интернет-лаборатории.

109. После некоторого снижения активности в связи с пандемией COVID-19 государства-члены стали наращивать свои усилия по повышению степени использования эксплуатируемых ими исследовательских реакторов. В то время как возвращение к наблюдавшимся до пандемии уровням производства радиоизотопов привело к нормализации спроса и восстановлению критически важных механизмов логистики и каналов поставок, расширение других видов применений требует тщательного изучения потенциала роста и ограничений, которые могут сдерживать этот потенциал. Например, современные разработки в области нейтронной радиографии на исследовательских реакторах нулевой или малой мощности и генераторах нейтронов открыли новые возможности для расширения применения этого метода, который используется, в частности, для НИОКР, изучения культурного наследия и промышленных применений. Недорогие высококачественные системы, первоначально разработанные в Исследовательском источнике нейтронов им. Хайнца Майера-Лейбница в Германии, теперь реализованы и на других установках. Трехмерные томографические изображения были получены благодаря новой системе нейтронной визуализации, построенной на реакторе VR-1 Чешского технического университета в Праге (рис. E.2). Реактор эксплуатируется при мощности 500 ватт, что ниже той мощности, которая ранее считалась возможной для проведения нейтронной томографии. Подобная система была установлена на исследовательском реакторе RECH-1 в Чили, а еще одна была успешно испытана на недавно созданной Агентством в Зайберсдорфе установке для нейтронных исследований на базе компактных дейтериево-дейтериевых и дейтериево-тритиевых генераторов нейтронов.

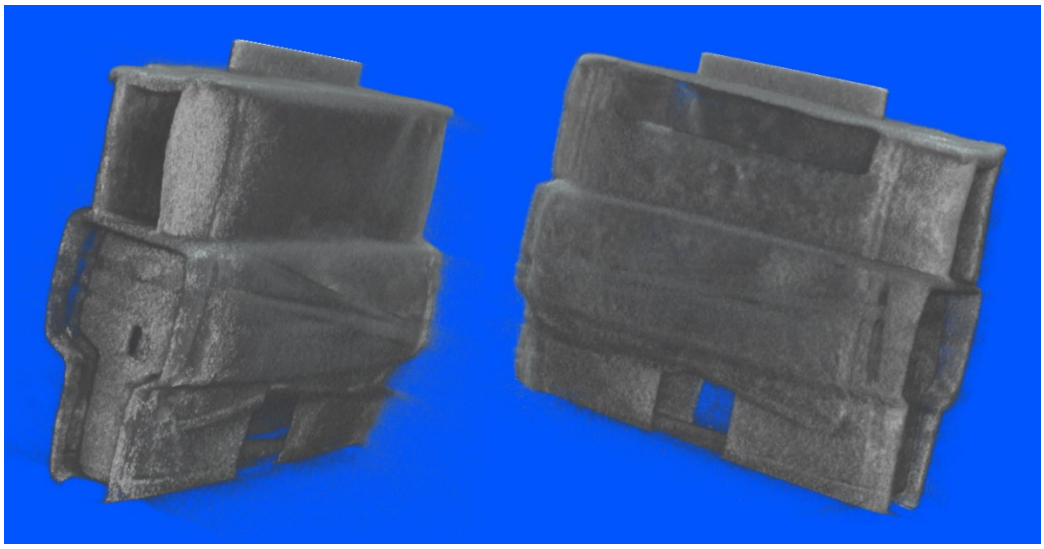


РИС. E.2. Два поперечных сечения из томограммы древнего тибетского замка, сделанной на 500-ваттном реакторе VR-1 Чешского технического университета в Праге (Изображение: Чешский технический университет в Праге, Чешская Республика; Центр им. Хайнца Майера-Лейбница, Мюнхенский технический университет, Германия)

E.2. Ускорители частиц

Положение дел

110. Бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ) — это новый метод лечения рака, сочетающий использование «разыскивающего» опухоли борного фармпрепарата и внешнего пучка нейтронов. Интерес к БНЗТ продолжает расти во всем мире, в частности, после того, как в Японии установки БНЗТ на основе ускорителей были одобрены в качестве стандартного клинического метода лечения рецидивирующего, неоперабельного рака головы и шеи (рис. E.3). В других странах есть установки, которые в данный момент уже находятся на продвинутой стадии развития, близкой к принятию в качестве стандартного клинического метода лечения, например, в Хельсинки, Финляндия, и Сямыне, Китай, а в 2022 году были объявлены новые проекты на основе ускорителей, в том числе вторая установка в Китае, в провинции Хайнань, и установка в Брюсселе, Бельгия. В настоящее время в 11 государствах-членах насчитывается более 20 установок БНЗТ на основе ускорителей, которые находятся на различных этапах реализации — от планирования до стандартной эксплуатации; уже несколько компаний предлагают на коммерческой основе ускорители, мишени для производства нейтронов и компоненты замедлителей, системы планирования лечения и позиционирования пациентов, а также фармацевтические препараты. В области информационно-просветительской работы и создания потенциала большую активность проявляет Международное общество нейтронзахватной терапии, которое регулярно выпускает сообщения, а также организует ежегодную конференцию и мероприятия, посвященные следующему поколению профессионалов в сфере БНЗТ.

РИС. E.3. Студент изображает пациента, которого позиционируют в рамках подготовки к лечению методом БНЗТ, в ходе недавнего учебного курса, организованного в медицинском центре БНЗТ региона Кансай, Япония. (Фото: Медицинский центр БНЗТ региона Кансай)

Тенденции

111. Одним из основных промышленных применений ускорителей электронов низких энергий является стерилизация предметов медицинского назначения, включая медицинские изделия одноразового использования. Исторически сложилось так, что большинство радиационных стерилизаций проводилось с использованием источников гамма-излучения, таких как кобальт-60. Однако из-за ограниченности цепи поставок и вопросов с точки зрения безопасности и сохранности в связи с использованием и обращением с кобальтом-60, многие пользователи активно ищут альтернативные решения на основе ускорителей. Непосредственная электронно-лучевая стерилизация уже много лет используется для эффективной обработки изделий низкой плотности. Кроме того, оснащение ускорителей электронов преобразователем электронов в рентгеновские лучи позволяет генерировать поток рентгеновского излучения достаточной интенсивности для других промышленных нужд. Хотя это решение требует относительно больших затрат энергии, оно сочетает в себе преимущества ускорителей (высокая мощность дозы и соответственно высокая производительность) и гамма-источников (глубокое проникновение в продукт).

112. Разработка более мощных и надежных ускорителей электронов остается главной целью сообщества пользователей, и несколько поставщиков технологий по всему миру активно работают в этом направлении. Существующие устройства пользуются большим спросом, и производители ускорителей работают на полную мощность, чтобы удовлетворить растущий

интерес. Сегодня многие компании предлагают комплексное решение (ускоритель электронов, мишень для преобразования рентгеновского излучения, экранирующие конструкции, конвейер, системы управления процессом и т.д.), которое часто может быть адаптировано к потребностям клиента, например, для увеличения производительности или обработки хрупких продуктов, или для обеспечения большей универсальности. Все эти предпринимаемые усилия постепенно меняют ландшафт технологий облучения, в результате чего увеличивается доля предлагаемых на основе ускорителей продуктов и услуг.

E.3. Ядерные приборы

Положение дел

113. ИИ и его производные продолжают находить все более широкое применение в ядерных приборах. Недавно его стали применять в процессе обнаружения полей смешанного излучения для различения импульсов, производимых разными частицами. Типичным примером является различение между фотонными и нейтронными сигналами в пластиковых сцинтилляторах. Алгоритмы классификации применяются для успешного различения импульсов после их обработки.

114. Точно так же в другой сфере медико-биологические науки уже с успехом используют применения на основе ИИ. Расшифровка структур складывания протеина с помощью рентгеновской или нейтронной кристаллографии в трех проекциях является давней научной проблемой. Помимо усовершенствованных приборов для обнаружения, которые становятся все более доступными, сообщество ИИ, включая частных поставщиков, сосредоточило свои усилия на алгоритмах глубокого обучения, которые успешно предсказывают структуры протеинов. Совсем недавно благодаря последним наработкам в области программного обеспечения для глубокого обучения в сочетании с общедоступными инструментами полностью изменилось наше понимание складывания человеческого протеома вплоть до атомных расстояний, и ожидается, что эти наработки приведут к прорывным открытиям в ближайшие годы.

Тенденции

115. Более масштабные приложения ИИ оказывают революционное воздействие на мир физики высоких энергий. По мере того, как адронные ускорители частиц модернизируются до более высокой яркости, количество частиц, производимых за одно столкновение, увеличивается. Как следствие, трековые детекторы должны работать на более высокой скорости счета, потенциально с более высоким фоновым счетом, поскольку воздействие идет на редкие исследовательские каналы обнаружения. Соответствующие алгоритмы реконструкции должны справляться с более высокой нагрузкой в виде регистрируемых детектором импульсов, кластеров и треков. В сообществе физики элементарных частиц начали использовать алгоритмы МО для оптимизации и ускорения реконструкции треков, а также для минимизации фонового вклада в результате неправильной идентификации треков. Сообщество также организовало открытые конкурсы, в которых участникам предлагается представить свои алгоритмы для решения задач режима высокой яркости Сверхбольшого адронного коллайдера. Оптимизация в этом отношении становится еще более значимой, поскольку детекторы вступают в эру постоянного считывания без участия триггера. Как и в прошлом, большая часть этих инноваций в области физики элементарных частиц также имеет большой потенциал для применения в усовершенствованных ядерных приборах.

116. Тенденции использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для обнаружения и отслеживания излучения в настоящее время все больше определяются новыми параметрами, тяготеющими к увеличению полезной нагрузки, безопасности и продолжительности полета,

прочности и точности наведения. На рынке появились новые БПЛА для обнаружения излучения и гамма-спектрометрии, представляющие собой комплексное решение для составления радиологических планов. Для целей автономной работы БПЛА разрабатываются роботизированные контейнеры, а дистанционные миссии позволяют осуществлять взлет и посадку, зарядку или замену батареи, защиту от непогоды и многое другое без участия человека. Благодаря все более высокой точности глобальных навигационных спутниковых систем исследования стали больше фокусироваться на подробном сканировании небольших объектов, таких как портовые погрузочные доки, контейнеры или строения.

117. Использование кремниевых детекторов излучения на основе фотоэлектронных умножителей позволило увеличить производительность и сделать приборы более компактными. Роль встроенных электронных компонентов для обеспечения температурной компенсации и электронной аппаратуры для считывания имеет важное значение для их внедрения в технологии БПЛА. Такие детекторы, как пластиковые сцинтилляторы, детекторы GAGG, а также детекторы, позволяющие обнаруживать гамма-излучение и нейтронное излучение, на основе ZnS(Ag)/^{6}LiF или CLYC и CLLB, все чаще встречаются в системах на базе БПЛА.

118. Применение пластиковых сцинтилляционных детекторов представляется новой тенденцией. Пластик является перспективным материалом с точки зрения низкого удельного веса (плотность около 1 г/см^{3}), разнообразия форм и высокой чувствительности обнаружения. Существующие алгоритмы обработки спектра позволяют пластиковым детекторам различать искусственные изотопы и изотопы РМПП либо идентифицировать основные, особенно промышленные, радионуклиды.

119. Также были представлены новые подходы к обработке данных в режиме реального времени и последующей обработке, например для оптимизации времени, затрачиваемого БПЛА на выполнение задач по обнаружению излучения. Например, доступны различные комбинации датчика излучения с лазерной системой обнаружения и измерения дальности (ЛИДАР), которые позволяют получать трехмерную гамма-визуализацию высокого разрешения в режиме реального времени или одновременно составлять двойной план с помощью гамма-излучения и нейтронного излучения с различением нейтронной визуализации и гамма-визуализации. Использование камеры с высоким разрешением для трехмерной фотограмметрии или ЛИДАР позволяет применять методы алгебраической реконструкции для коррекции расстояний по всем задействованным поверхностям, а также показаний детектора в трехмерном формате, как показано на рис. E.4.

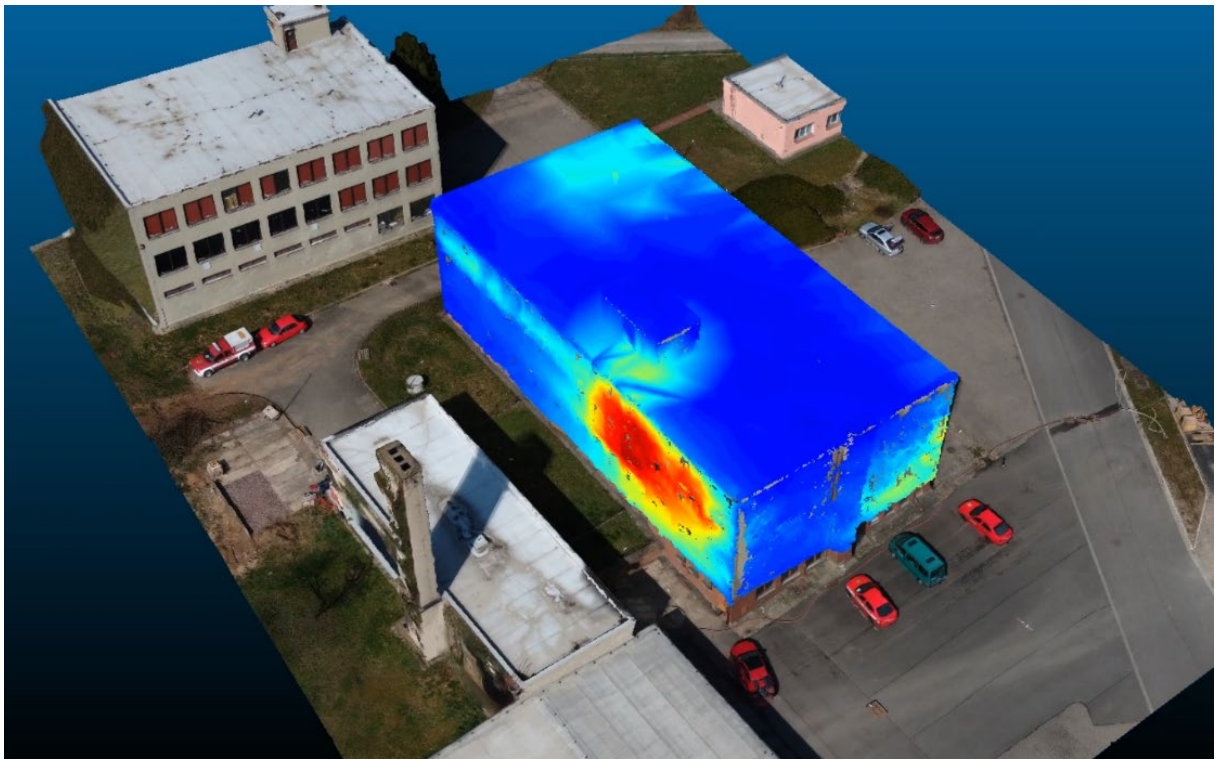


РИС. E.4. Пример составления трехмерного радиологического плана здания, содержащего радиоактивные источники/материалы, с помощью БПЛА. (Иллюстрация: МАГАТЭ)

F. Продовольствие и сельское хозяйство

F.1. Оперативное реагирование на кризисы, связанные с безопасностью пищевых продуктов

Текущее состояние

120. События последнего времени, в том числе пандемия COVID-19, конфликты и стихийные бедствия, вызванные изменением климата, высветили уязвимость мировых систем поставок продовольствия к кризисным ситуациям, а также со всей очевидностью указали на необходимость повышения устойчивости путем реформирования систем контроля пищевых продуктов и повышения качества технической поддержки. Кризисы и чрезвычайные ситуации, такие как экстремальные климатические явления, стихийные бедствия, эпидемии и пандемии, нарушают работу систем контроля пищевых продуктов, ставят под угрозу безопасность пищевых продуктов и продовольственную безопасность и открывают возможности для их фальсификации и совершения связанных с ними преступлений. Укрепление потенциала государств-членов в области готовности и оперативного реагирования имеет принципиальное значение для решения этих проблем.

121. Системы контроля пищевых продуктов обычно строятся на основе двухуровневых программ тестирования в лабораторных условиях. Для проверки продуктов, отобранных в соответствии с национальными планами по надзору за безопасностью пищевых продуктов, используются экономически эффективные и высокопроизводительные методы. Любые результаты, указывающие на возможное загрязнение выше допустимого уровня, затем

проверяются с помощью более сложных и трудоемких методов. В таких проверках широко используются ядерные методы, такие как масс-спектрометрия с изотопным разбавлением и измерение соотношений стабильных изотопов. Чтобы исключить попадание загрязненных пищевых продуктов на стол, скрининг-тесты настроены так, чтобы свести к минимуму число ложноотрицательных результатов (когда загрязнение продуктов не детектируется). Однако из-за особенностей аналитических методов и неопределенности результатов измерений иногда регистрируются ложноположительные результаты (когда незагрязненные продукты питания ошибочно определяются как загрязненные), что влечет последствия для производителей и пищевой промышленности. Полученный первоначально положительный результат проходит подтверждение на втором уровне, технологии которого практически полностью исключают ложноположительные результаты. Такая структура контроля пищевых продуктов защищает как потребителей, так и производителей и способствует ведению торговой деятельности.

122. Изменение условий окружающей среды приводит к изменению естественных уровней токсинов в продукции растениеводства, животноводства и рыбного хозяйства. Например, изменение климата способствует распространению выделяющих микотоксины грибов в регионах, где раньше их не было (и где производителям не нужно было принимать во внимание эту угрозу). Повышение температуры в сочетании с эвтрофикацией, вероятно, приведет к увеличению частоты и продолжительности цветения цианобактерий во многих водных экосистемах, а также к биоаккумуляции метилртути в промысловых видах рыб, что создает дополнительные риски для безопасности пищевых продуктов (рис. F.1).

РИС. F.1. В связи с изменением климата возрастает риск попадания токсинов в морепродукты из-за загрязнения, вызванного цветением цианобактерий (вредоносное цветение водорослей).

(Графика: МАГАТЭ, на основе www.climatecentral.org/climate-matters/harmful-algal-blooms)

123. Изменение климата также влияет на распространенность и распределение вредителей и переносчиков болезней, что требует новых подходов к применению пестицидов и ветеринарных препаратов. Дополнительные риски связаны с присутствием в пище остатков таких веществ.

Применение в животноводстве противомикробных препаратов усугубляет проблему устойчивости к противомикробным препаратам — бактерии, которые приобрели устойчивость, могут передаваться через загрязненные пищевые продукты.

124. Каждый из этих факторов, как по отдельности, так и в комплексе, может оказывать самое серьезное воздействие на различные компоненты подхода «Единое здоровье», особенно в том, что касается безопасности и целостности поставок пищевых продуктов и кормов. Такое воздействие еще заметнее, если нарушено функционирование обычных систем контроля, что можно было наблюдать во время пандемии COVID-19, хотя это заболевание и не имеет пищевого происхождения.

Тенденции

125. В чрезвычайных ситуациях, когда логистические цепи подвержены сбоям, а лаборатории и системы контроля пищевых продуктов работают нестабильно или не работают вовсе, главным приоритетом является обеспечение безопасности поставок пищевых продуктов. Защита здоровья потребителей и обеспечение того, чтобы медицинские службы не сталкивались с дальнейшими проблемами в сфере безопасности пищевых продуктов, помогает предотвратить обострение кризиса. Поэтому в кризисных ситуациях необходимо переходить на быстрые и простые в применении методы скрининга, что позволит поддержать стандарты безопасности пищевых продуктов и определить или подтвердить происхождение загрязненных продуктов. Затем имеющиеся ресурсы могут быть направлены на высокотехнологичные методы, которые позволяют получить информацию, необходимую для контроля и управления развитием кризисных явлений.

126. Оперативное тестирование продуктов питания возможно благодаря различным ядерным и изотопным методам, а также измерениям изотопного состава, используемым как по отдельности, так и в сочетании с дополнительными методами. Методы ядерного анализа основаны на точных параметрах, таких как масса, спин, магнитный момент, энергетические уровни ядра атома и электронов внутренней оболочки, а также изотопные измерения элементного состава.

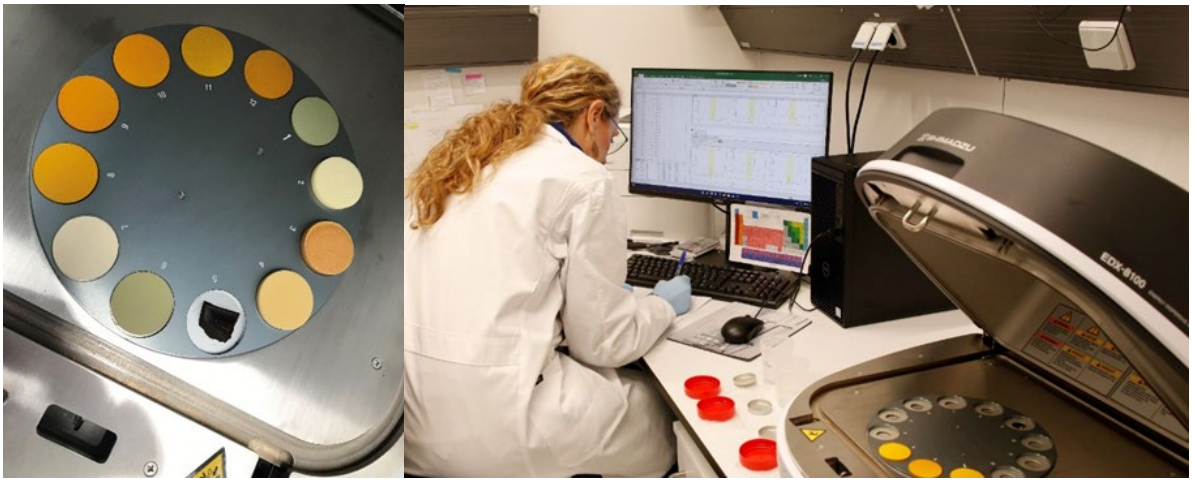


РИС. F.2. Анализ образцов куркумы методом энергодисперсионной рентгеновской флюоресценции для обнаружения токсичных элементов. Лаборатория безопасности и контроля пищевых продуктов Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства, Зайберсдорф, Австрия. (Фото: МАГАТЭ)

127. Последние достижения в полупроводниковых, фотонных и других технологиях позволили уменьшить размеры аналитических приборов, в результате чего появились настольные, ручные и портативные устройства, которые могут применяться не только в лаборатории, но и на различных этапах процесса производства и сбыта пищевых продуктов. Они позволяют действовать оперативно в кризисных ситуациях и получать данные для принятия решений.

128. Один из примеров — разработка применений энергодисперсионной рентгеновской флюоресценции (ЭДРФ) для быстрого скрининга пищевых продуктов с целью обнаружения питательных веществ в элементарной форме и токсичных металлов, таких как свинец, кадмий и мышьяк, в концентрации, установленной Всемирной организацией здравоохранения[2]. Этот метод реализован в ручном и настольном (рис. F.2) форматах и может использоваться в полевых и стационарных условиях операторами без специального образования. Он требует минимальной подготовки образца и не задействует экологически вредные реагенты. В сочетании с хемометрическими инструментами ЭДРФ может также применяться для решения проблем, связанных с мошенничеством в пищевой промышленности.

129. Другим примером является газовая хроматография/спектрометрия ионной подвижности (ГХ-СИП) — метод, в котором в качестве низкоэнергетического источника излучения используется гидрид трития. Парофазная ГХ-СИП (рис. F.3) может использоваться для обнаружения следов микроорганизмов, связанных с летучими органическими соединениями, что указывает на присутствие грибка и риск попадания в пищевые продукты микотоксинов и позволяет принять меры контроля[3]. ГХ-СИП также позволяет обнаружить в пищевых продуктах многие другие загрязняющие и опасные вещества, включая метанол — химическое вещество, которое присутствует в фальсифицированных алкогольных напитках и вызывает сильное отравление при попадании в организм, — и оксид этилена — токсичный пестицид, из-за которого в Европе с 2020 года неоднократно проводились отзывы загрязненных пищевых продуктов.

---

[2] Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, Food Chemistry: X 1, Vol. 1 (2019).

[3] Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS–GC–IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut, Food Science & Nutrition, Vol. 9, Issue 5 (2021).

РИС. F.3. В Лаборатории безопасности и контроля пищевых продуктов Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства (Зайберсдорф, Австрия) проводится анализ методом парофазной ГХ-СИП для обнаружения характерных признаков загрязнителей в пищевых продуктах.
(Фото: МАГАТЭ)

130. Эти и другие оперативные ядерные аналитические методы, такие как спектроскопия ядерного магнитного резонанса с использованием настольных приборов и анализ стабильных изотопов методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии, в сочетании с портативными методами спектроскопии, такими как поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия и инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, составляют мощный аналитический инструментарий. Применение таких инструментов для анализа пищевых продуктов на местах, что в дальнейшем позволит эффективно реагировать на чрезвычайные ситуации и кризисы, влияющие на поставки продовольствия, быстро развивается.

F.2. Достижения в области облучения пищевых продуктов: расширение использования ускорителей заряженных частиц и новая технология мягкого излучения

Текущее состояние

131. Облучение пищевых продуктов позволяет без использования химических веществ повысить безопасность продуктов питания, сохранить их качество и продлить срок хранения. Будь то гамма-фотоны, электронные пучки или рентгеновские лучи, ионизирующее излучение не портит пищевые продукты, но является губительным для микроорганизмов и вредителей. Поскольку облучение не вызывает заметного повышения температуры продукта, его контролируемое применение не ухудшает питательные качества и не оказывает существенного влияния на вкус, текстуру или внешний вид пищи. При обычном облучении пищевых продуктов пучки имеют высокую энергию и проникают сквозь объект облучения, что позволяет облучать

даже предварительно упакованные продукты; упаковка также защищает продукты от риска внешнего загрязнения после обработки.

132. Облучение по меньшей мере одного типа пищевых продуктов разрешено примерно в 70 странах; в 50 странах для облучения пищевых продуктов на постоянной основе используется более 160 облучательных установок (рис. F.4). В рамках типовой бизнес-модели коммерческие центры с облучательными установками функционируют как многофункциональные поставщики услуг: они воздействуют на различные продукты утвержденной дозой ионизирующего излучения в пределах заранее определенного диапазона, удовлетворяя потребности клиентов из таких секторов, как медицина, фармацевтика и пищевая промышленность.

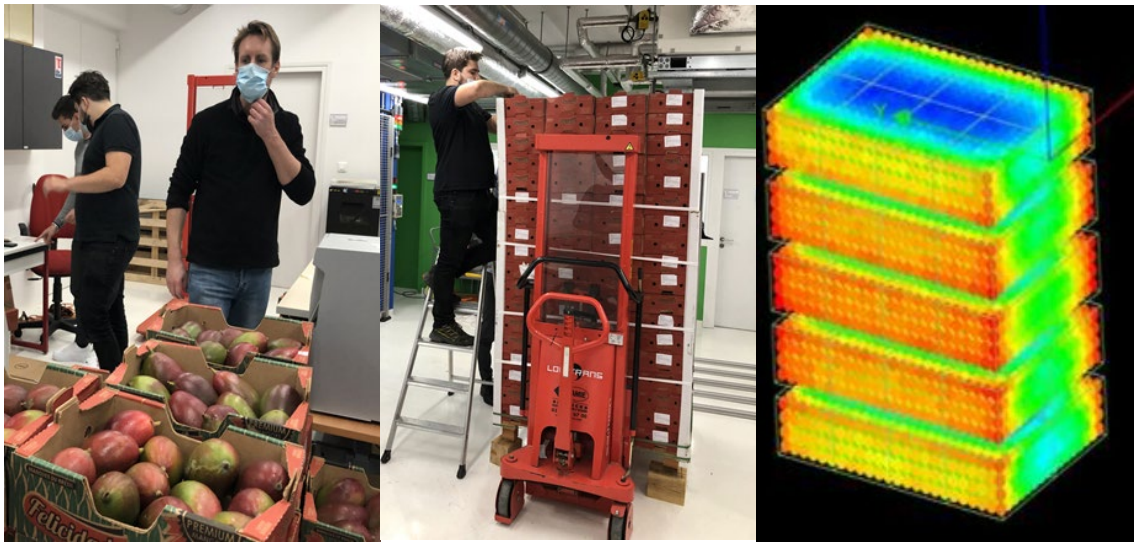


РИС. F.4. Эксперты на предприятии по облучению пищевых продуктов во Франции проводят испытания, чтобы убедиться, что рентгеновское облучение плодов манго, уложенных на поддоны, позволяет обеспечить минимальную дозу, необходимую для правильной фитосанитарной обработки (слева и в центре). На изображении справа показано распределение поглощенных доз. (Фото: Aerial, Франция)

133. В настоящее время почти все облучение пищевых продуктов проводится на специализированных установках с помощью гамма-излучения, источником которого является кобальт-60, радиоактивный изотоп, который излучает фотоны высокой энергии (1,17 и 1,33 мегаэлектронвольт (МэВ)). Около 90% коммерческих установок для облучения пищевых продуктов используют гамма-излучение, а в остальных используются ускорители заряженных частиц, которые при помощи электроэнергии генерируют пучки электронов высокой энергии (до 10 МэВ) и/или рентгеновское излучение (обычно до 5 МэВ, хотя в некоторых странах разрешено до 7,5 МэВ). Около 5% поставщиков услуг по облучению пищевых продуктов закупили ускорители, генерирующие электронные пучки и рентгеновское излучение, в дополнение к облучательным установкам с использованием кобальта-60. Диверсификация технологий приобретает все большее значение, поскольку спрос на источники на основе кобальта продолжает расти, а производство кобальта-60 занимает несколько лет. Радионуклид кобальт-60 дорожает, что делает облучение электронным пучком и даже рентгеновскими лучами привлекательной альтернативой, а также повышает интерес к технологии мягкого излучения на базе ускорителей (рис. F.5).

134. Польза облучения особенно очевидна в случае сухих пищевых продуктов, таких как специи — в них в обезвоженной среде могут выживать многие микроорганизмы, в том числе патогенные, такие как сальмонелла, Bacillus cereus и Clostridium perfringens[4]. Уровень загрязнения такими микроорганизмами может быть низким, но после добавления сухих специй в пищу они попадают во влажную и благоприятную среду, в которой способны быстро размножаться. Соответственно, продукты необходимо подвергать противомикробной обработке, чтобы минимизировать риск возникновения заболеваний у потребителей и убытки в торговле из-за порчи пищевых продуктов. Термическая обработка эффективна, однако она уничтожает летучие компоненты, которые придают специям их уникальный вкус, яркий цвет и аромат, а также полезные для здоровья свойства. Напротив, ионизирующее излучение уничтожает упомянутые выше микроорганизмы, но почти не влияет на компоненты специй, которые важны для их сенсорного восприятия, качества и оздоровительных свойств. Ионизирующее излучение также может замедлять созревание, препятствуя прорастанию таких продуктов, как чеснок, имбирь, лук и картофель.

РИС. F.5. Оборудование для мягкой обработки пищевых продуктов потоком электронов. В системе «Лаату» используются два низкоэнергетических излучателя электронов (красные ручки в центре снимка): они генерируют потоки электронов, через которые пропускают сухие вещества. Система потребляет до 80% меньше электроэнергии по сравнению с парообработкой и является экономически эффективным решением для снижения количества микроорганизмов. (Фото: Bühler)

[4] Microbiological hazards in spices and dried aromatic herbs: Meeting report (Microbiological Risk Assessment Series No. 27, FAO/WHO, Rome, 2022).

135. Поскольку ионизирующее излучение останавливает развитие и размножение вредителей, оно также используется для фитосанитарной обработки продукции, перемещаемой через границы карантинных зон. Например, такая обработка гарантирует, что экономически значимые вредители, такие как плодовая муха и долгоносик, не смогут распространиться и закрепиться на новых территориях благодаря торговле свежими фруктами и овощами.

136. Агентство и Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) помогают государствам-членам (рис. F.6) создавать и расширять мощности по облучению пищевых продуктов, что способствует сокращению пищевых потерь и отходов и облегчает торговлю как сухими специями, так и свежими и замороженными морепродуктами и фруктами. Недавний пример — организация Вьетнамом экспорта свежего манго, питайи и личи в Соединенные Штаты Америки на сумму 20 млн долл. США в год и расширение торговли с Австралией.

РИС. F.6. 31 октября 2022 года Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси и Генеральный директор ФАО Цюй Дунъюй подписали в Центральных учреждениях Агентства в Вене, Австрия, меморандум о взаимопонимании между двумя организациями в целях укрепления сотрудничества ФАО/МАГАТЭ в интересах мирного применения ядерных технологий в области продовольствия и сельского хозяйства. (Фото: МАГАТЭ)

Тенденции

137. Заметной тенденцией является более активное применение облучательных установок на базе ускорителей заряженных частиц. Это объясняется как экономическими, так и практическими преимуществами данной технологии. В отличие от гамма-облучения, такие установки можно включать и выключать, генерируя пучки излучения когда необходимо. Соответственно, они позволяют избежать характерных для радиоактивных изотопов проблем, связанных с закупкой, безопасностью и физической безопасностью (при перевозке, хранении и утилизации). Обработка гамма-лучами — это простая, надежная и зрелая технология, которая будет использоваться еще много лет, но альтернативные технологии помогают дополнить имеющиеся мощности и позволяют шире применять облучение пищевых продуктов.

138. Агентство поддерживает государства-члены в их усилиях по разработке новых и практически ориентированных технологий облучения пищевых продуктов с помощью установок на базе ускорителей заряженных частиц посредством проведения координированных исследований[5]. Новые достижения в этой области включают разработку инструментов, которые могут моделировать процесс облучения пищевых продуктов и быстро определять оптимальные параметры обработки. Учреждения в Китае и Вьетнаме разработали, сконструировали, испытали и установили новые устройства, которые помогают коммерческим центрам, предоставляющим услуги облучения высокоэнергетическим электронным пучком, моделировать и рассчитывать распределение доз для различных конфигураций загрузки. Эти устройства позволяют заранее определить оптимальные настройки, что обеспечивает быстрое тестирование на установках и, в конечном счете, сокращает время простоя и повышает производительность. Специалисты Университета Цинхуа (Китай) продвинулись в развитии этой концепции еще дальше и в сотрудничестве с технологической компанией NUCTECH разрабатывают коммерческий продукт[6]. Эти, а также аналогичные инструменты, разрабатываемые в других странах, направлены на содействие применению передовой практики и повышение производительности установок гамма- и рентгеновского облучения, а также электронно-лучевых установок.

139. В Техасском сельскохозяйственном и инженерном университете (США), который является центром сотрудничества Агентства, ведется разработка эффективных и быстрых методов расчета дозы для десятикратного сокращения численности патогенных микроорганизмов (D10) в различных средах. D10 — это доза излучения, необходимая для подавления 90% исходной жизнеспособной популяции микроорганизмов. Эффективная доза стерилизующего облучения может быть рассчитана как кратное значение D10. Финансируемая Агентством исследовательская работа в Техасском сельскохозяйственном и инженерном университете — пример того, как прикладные исследования могут развиваться в новых направлениях в зависимости от меняющихся потребностей, в данном случае — потребности в усовершенствовании методов, которые помогают избежать передачи патогенов через продукты питания и, таким образом, предотвратить пандемии пищевого происхождения.

140. Интересная тенденция в развитии технологий облучения связана с возможностью менять и настраивать энергию пучка в установках на базе ускорителей. Например, низкоэнергетические пучки (мягкие электроны или мягкие рентгеновские лучи) с энергетическим потенциалом, измеряемым в килоэлектронвольтах (кэВ), могут использоваться в относительно компактных лампах-излучателях, которые можно безопасно размещать в шкафах или других устройствах. Это делает возможным организацию облучения пищевых продуктов на производственных объектах: такие устройства для мягкого облучения могут быть встроены в технологическую линию производства пищевых продуктов. Поскольку мягкие электроны не проникают сквозь всю массу продукта, они могут эффективно обрабатывать продукты, в которых микроорганизмы находятся в основном на поверхности или рядом с ней, такие как целые яйца в скорлупе (рис. F.7 и F.8), целые отрезы сырого мяса и птицы, а также целые сухие семена (травы и специи). Если луч должен пройти через продукты небольшого размера, может также использоваться мягкое рентгеновское излучение.

---

[5] Development of Electron Beam and X Ray Applications for Food Irradiation: Final Report of a Coordinated Research Project (IAEA-TECDOC-2008, Vienna, 2022).

[6] Qin H., Yang, G., Kuang, S., Wang, Q., Liu, J., Zhang, X., Li C., Han, Z., Li, Y., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 143 (2018) 8–13.

РИС. F.7. Демонстрация проникновения мягких электронов (e-) с различными энергетическими уровнями в яичную скорлупу на различную глубину. Цель состоит в том, чтобы электроны могли уничтожить сальмонеллу, которая присутствует в основном на поверхности скорлупы свежих цельных яиц или на небольшой глубине. (Графика: МАГАТЭ, на основе работ Н. Такаоки из Токийского научно-исследовательского института промышленных технологий, Япония)

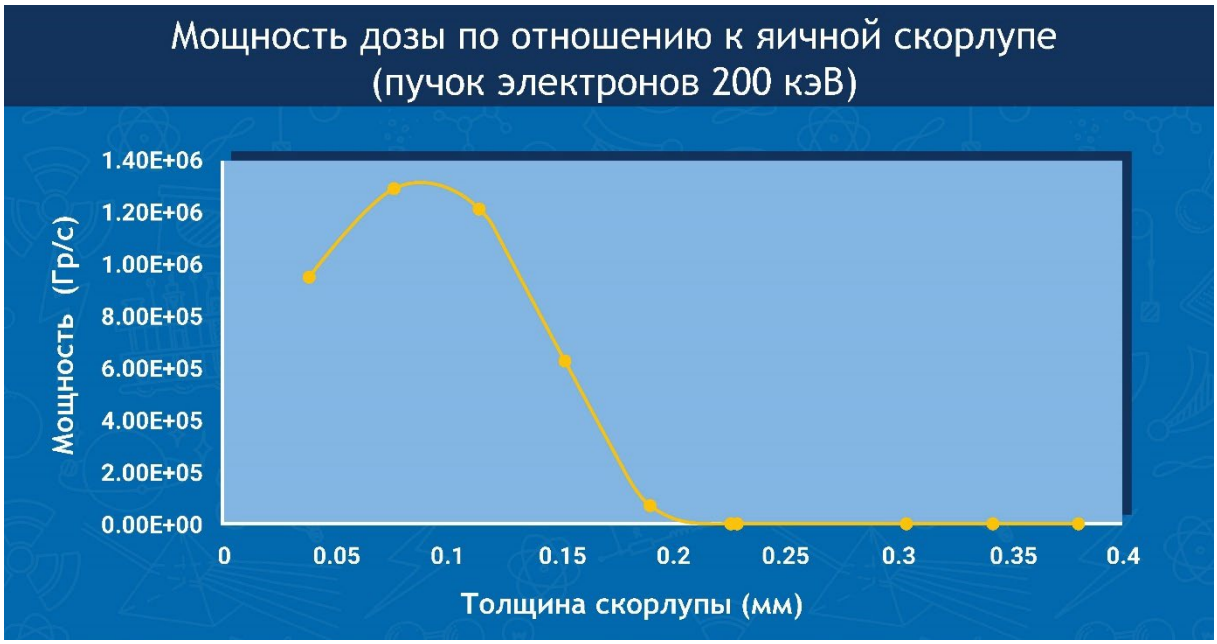


РИС. F.8. Имитационное моделирование для оценки глубины воздействия мягких электронов с энергией 200 кэВ в яичной скорлупе и определения возможности поражения сальмонеллы на глубине менее 0,2 мм
(График: МАГАТЭ, на основе работ Ю. Лю, Х. Циня, Х. Ши из NUCTECH Ltd. и Х. Чжана из Университета Цинхуа, Китай)

141. Исследования показывают, что мягкие электроны могут улучшить качество некоторых пищевых продуктов, а также являются перспективным методом поверхностного и приповерхностного микробиологического обеззараживания. Например, компания Bühler,

занимающаяся инженерным обеспечением пищевой промышленности, разработала систему, в которой сухая продукция пропускается через мягкий электронный луч (<300 кэВ) путем свободного падения — этот метод обеспечивает контроль микробиологического загрязнения и его сохранение на приемлемом уровне[7, 8]. В качестве примера применения мягкого рентгеновского облучения для небольших партий можно привести облучатель в портативном корпусе, обычно используемый для стерилизации медицинских инструментов, который исследователи из Института передовых радиационных технологий Корейского научно-исследовательского института атомной энергии изучают в плане его применения для обработки пищевых продуктов. Целью исследователей было использовать технологию мягкого излучения, которая широко используется в больницах, чтобы обеспечить питание очень высокого гигиенического стандарта для пациентов с ослабленным иммунитетом, и эта низкоэнергетическая (160 кэВ) рентгеновская технология оказалась способной обеспечить соответствие свежих нарезанных овощей таким требованиям.

142. В настоящее время при координирующей роли Агентства осуществляется исследовательский проект по инновационному использованию низкоэнергетических пучков при облучении пищевых продуктов на установках на базе ускорителей с акцентом на решение технических проблем и расширение потенциала новых технологий мягкого излучения. Страны, участвующие в проектах технического сотрудничества в Африканском и Азиатско-Тихоокеанском регионах, уже выразили заинтересованность и желание добиться коммерческой жизнеспособности технологий мягкого излучения во всем мире.

G. Радиоизотопы и радиационная технология

G.1. Разработки в области тераностических радиофармацевтических препаратов

Положение дел

143. Тераностические агенты сочетают в себе радионуклиды для диагностики рака и радионуклиды для терапии. Хотя некоторые одиночные радиоизотопы распадаются под воздействием излучения для тераностики, чаще всего используются пары радиоизотопов (рис. G.1).

144. Классический пример тераностического агента в ядерной медицине сочетает в себе гамма-излучение йода-123 и бета-излучение йода-131 для диагностики и терапии заболеваний щитовидной железы. Благодаря доступности радиоизотопных пар, подходящих для диагностики и терапии (например, диагностический галлий-68 и терапевтический лютеций-177) в последнее десятилетие тераностические подходы стали применяться все шире. Поскольку радиофармацевтические препараты лютеция и галлия проявляют сходные химические свойства, они могут иметь одинаковое или сходное фармацевтическое исполнение (хелат плюс линкер к различным направленным векторам, таким как разнообразные пептиды, антитела или малые органические молекулы). Радиофармацевтический препарат с опухолеспецифическим вектором,

---

[7] Laatu: Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods (Bühler, 2019).

[8] Schottroff, F., Lasarus, T., Stupak, M., Hajslova, J., Fauster, T., Jäger, H., Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 14 1 (2021) 380–395.

радиоактивно меченным посредством позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) диагностическим галлием-68, позволяет диагностировать и характеризовать in vivo опухоли, что дает возможность проводить ПЭТ-скрининг, дотерапевтическое доказательство экспрессии мишени, стадирование и отбор пациентов для радионуклидной терапии. Лечение пациентов терапевтическим радиофармацевтическим препаратом лютеция-177, меченным тем же вектором, позволяет осуществлять селективное индивидуализированное лечение рака пациента посредством молекулярно-направленной терапии с применением радиофармацевтических препаратов.

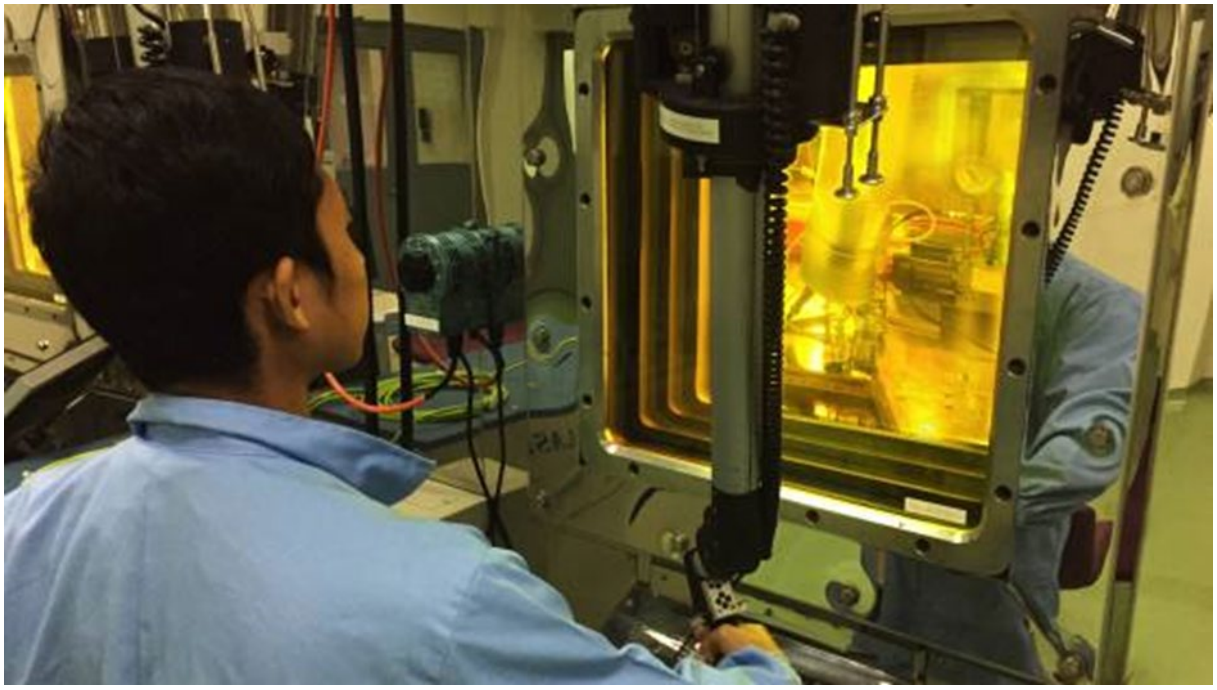


РИС. G.1. Тераностические радиофармацевтические препараты производятся по меньшей мере в 80 странах мира с использованием различных радиоизотопов и молекул-носителей.

145. В настоящее время пептиды галлия-68 и лютеция-177 и ингибиторы ферментов успешно используются в качестве векторов для лечения нейроэндокринных опухолей и рака простаты. Однако по-прежнему необходимо вести поиск более точного диагностического аналога для лютеция-177, т.е. диагностического радионуклида с более близкими химическими свойствами, чем галлий-68, а также пар новых альфа- и бета-излучателей и излучателей Оже и подходящих диагностических агентов.

Тенденции

146. Чтобы полностью использовать потенциал тераностических пар в ядерной медицине и улучшить результаты лечения пациентов, необходимы более широкие исследования и разработки в области радиофармацевтических препаратов и радиоизотопов. Цель заключается в том, чтобы разработать более подходящие пары радионуклидов, оптимизировать более стабильные хелатные соединения и расширить число специфических направленных векторов с помощью биологического и биохимического дизайна.

147. Производство радиофармацевтических препаратов на основе лютеция-177 возможно как в «добавочной», так и в «свободной от носителя» форме, причем обе формы в настоящее время производятся на исследовательских реакторах. С 2022 года лютеций-177 без носителя может также производиться и в ядерных энергетических реакторах: эта технология, разработанная компанией «Фраматом», была впервые применена в Канаде на АЭС «Брюс». Благодаря средней

продолжительности своего периода полураспада, излучению бета-частиц для терапии и излучению гамма-лучей для диагностической визуализации лютеций-177 уже играет определенную роль в применениях ядерной медицины и позволил многим исследователям и ученым разработать новые тераностические радиофармацевтические препараты. Недавнее развитие сигнальных молекул, таких как пептиды, иммунные компоненты и малые молекулы, позволило начать во всем мире осуществление новых мероприятий и планов по разработке агентов.

148. Тераностические радиофармацевтические препараты уже применяются в клиниках для лечения рака. Однако для реализации последних достижений в области молекулярной визуализации, таких как ПЭТ/компьютерная томография и ПЭТ/магнитно-резонансная томография, а также таргетной терапии (с использованием альфа- и бета-излучателей), врачам необходимы дополнительные, новые радиоизотопы. Проводятся исследования новых пар радиоизотопов для тераностического применения, таких как радиоизотопы тербия с широким спектром диагностической однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и терапевтических (бета- и альфа-терапия) применений (рис. G.2).

РИС. G.2. На диаграмме показаны тераностические радиоизотопы, необходимые для эффективной разработки радиофармацевтических препаратов. (Иллюстрация: МАГАТЭ, на основе работы Ф. Рёша, Майнцский университет им. Иоганна Гутенберга, Германия)

149. Благодаря развитию технологий производства радионуклидов перечень перспективных радионуклидов для радиофармацевтических применений постоянно растет. Однако эффективная доставка выбранного радионуклида к молекулярной мишени внутри клетки по-прежнему представляет собой сложную задачу при разработке радиофармацевтических препаратов. Для разработки и внедрения новых и более эффективных систем доставки тераностических продуктов с улучшенной фармакокинетикой и минимальными побочными эффектами необходимы оптимизированные формы, подробная характеризация и доклиническая оценка.

H. Здоровье человека

H.1. Искусственный интеллект для целей оконтуривания и планирования лучевой терапии

Положение дел

150. Лучевая терапия — основополагающий элемент лечения рака; в определенный момент в ней нуждаются около половины всех онкологических больных. В последние десятилетия лучевая терапия получила стремительное развитие благодаря инновациям в радиотерапевтическом оборудовании, трехмерной визуализации и информационным технологиям, а также расширению знаний в области биологии рака. Новые технологии доставки и соответствующие методы визуализации с использованием искусственного интеллекта (ИИ) позволили оптимизировать высокоточную лучевую терапию и способствовали повышению качества контроля опухоли и лечения онкологических пациентов. Ожидается, что использование таких инструментов приведет к снижению вариабельности измерений, проводимых различными наблюдателями, и сбережет время медицинского персонала.

151. Лучевая терапия — это сложный процесс, состоящий из нескольких трудоемких этапов, за которые отвечают различные группы персонала; они влияют на качество лечения и, следовательно, результаты для пациентов. Во всем мире наблюдается нехватка медицинских работников, в том числе онкологов-радиологов, медицинских физиков и техников лучевой терапии (ТЛТ). Согласно рекомендации Агентства на каждые 250 случаев рака должен приходиться один онколог-радиолог[9], однако в течение ближайших десятилетий этот показатель останется фактически недостижимым для большинства государств-членов. Решение проблемы растущей потребности в людских ресурсах может предложить ИИ.

152. Лучевая терапия предполагает не только точное воздействие на опухоль, но и защиту здоровых тканей и структур в целях сведения к минимуму повреждений и побочных эффектов. Важнейшим шагом в процессе подготовки к лучевой терапии является оконтуривание, в ходе которого очерчиваются границы органов, здоровых тканей и опухолей. Эти контуры, как правило, соответствуют разработанным на основе консенсуса руководствам и атласам (рис. H.1).

[9] Setting Up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects (IAEA, 2008).

РИС. H.1. Агентство проводит подготовку специалистов в области лучевой терапии и ядерной медицины, используя в том числе инновационные и экономически эффективные методы. (Фото: МАГАТЭ)

153. Для повышения эффективности трудоемкого процесса оконтуривания существуют либо находятся в стадии разработки ряд инструментов, таких как автооконтуривание, в процессе которого для снижения контурной вариабельности используются контуры на основе данных атласа. Алгоритм выбирает наиболее схожее с параметрами пациента изображение, после чего для переноса контуров из атласа на контуры пациента используется деформируемая регистрация изображений. Совсем недавно для разработки алгоритмов глубокого обучения на основе ИИ были использованы крупные массивы обезличенных клинических данных, содержащие высококачественные данные по оконтуриванию.

Тенденции

154. ИИ может использоваться в качестве инструмента для повышения качества, стандартизации и сбережения времени на этапах проведения лучевой терапии. Потенциально это может привести к более безопасному и точному применению радиации. Использование ИИ в сфере здравоохранения стремительно расширяется и, как ожидается, изменит парадигму планирования лучевой терапии — от сложного процесса с привлечением многих групп специалистов до автоматизированного процесса. Крайне важно, чтобы для медицинских работников была организована подготовка, необходимая для безопасного внедрения и мониторинга соответствующих систем. Также важно, чтобы население было осведомлено о соответствующих преимуществах и рисках.

155. Одним из ключевых этапов современной лучевой терапии являются выбор и оконтуривание объемов раковой мишени и органов риска (OAR). Концепции и термины для определения понятий макроскопического объема опухоли (GTV), клинического объема мишени (CTV) и OAR претерпевают непрерывные изменения. Если стандартное оконтуривание

по-прежнему проводится в ручном режиме, то автооконтуривание может производиться на основе методология использования атласа и глубокого обучения. Для автооконтуривания на основе атласа используется «библиотека» результатов подготовленных контуров компьютерной томографии (КТ). Глубокое обучение — это метод машинного обучения, предполагающий использование глубоких нейронных сетей для создания модели, способной при накоплении опыта со временем обучаться и совершенствоваться. Программы для автооконтуривания на основе атласа и глубокого обучения доступны на коммерческой основе.

156. Хотя в рамках исследований эффективность автосегментации на основе глубокого обучения весьма высока, фактическая клиническая польза в целом не изучена. Вполне вероятно, что в процессе оконтуривания может потребоваться ручная настройка или проверка; также, несмотря на клиническое применение автосегментации, существует неизменная потребность в обучении и применении руководящих принципов оконтуривания на практике. Использование ИИ для целей сегментации ограничено тем, что в некоторых ситуациях информации, полученной лишь с помощью методов визуализации, недостаточно для принятия решения.

157. Решение этой проблемы — гибридный интеллект (ГИ), который объединяет преимущества естественного разума и искусственного интеллекта, используя в процессе сегментации органов на снимках КТ пять отдельных модулей[10]. Такой подход обеспечивает результаты, аналогичные результатам работы экспертов в области оконтуривания, при значительно более эффективном расходовании времени.

158. В недавно изданном Агентством обзоре положения дел, проблем и возможностей, связанных с ядерной технологией и ИИ, подчеркивается необходимость определения функций и обязанностей специалистов в области лучевой терапии и обеспечения четкой основы для выбора, ввода в эксплуатацию, применения, обмена данными и постоянного контроля качества технологий на основе ИИ[11].

159. Агентство будет содействовать разработке руководящей основы для государств-членов, касающейся внедрения ИИ для целей оконтуривания. В рамках этого содействия в 2022 году началась реализация проекта координированных исследований, посвященного изучению эффективности внедрения электронного обучения для развития навыков проведения лучевой терапии при помощи ИИ, в особенности рака головы и шеи. И хотя по-прежнему существуют опасения по поводу возможной утраты знаний среди врачей, медицинских физиков или ТЛТ, ИИ, судя по всему, способствует повышению качества при более эффективном расходовании времени. С учетом нехватки во всем мире работников в сфере онкологии возросшую роль ИИ в оконтуривании при соответствующем регулировании можно было бы только приветствовать.

---

[10] Udupa J. K., Liu T., Jin C., et al. Combining natural and artificial intelligence for robust automatic anatomy segmentation: Application in neck and thorax auto-contouring, Medical Physics (2022).

[11] *Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology* (IAEA, Vienna, 2022).

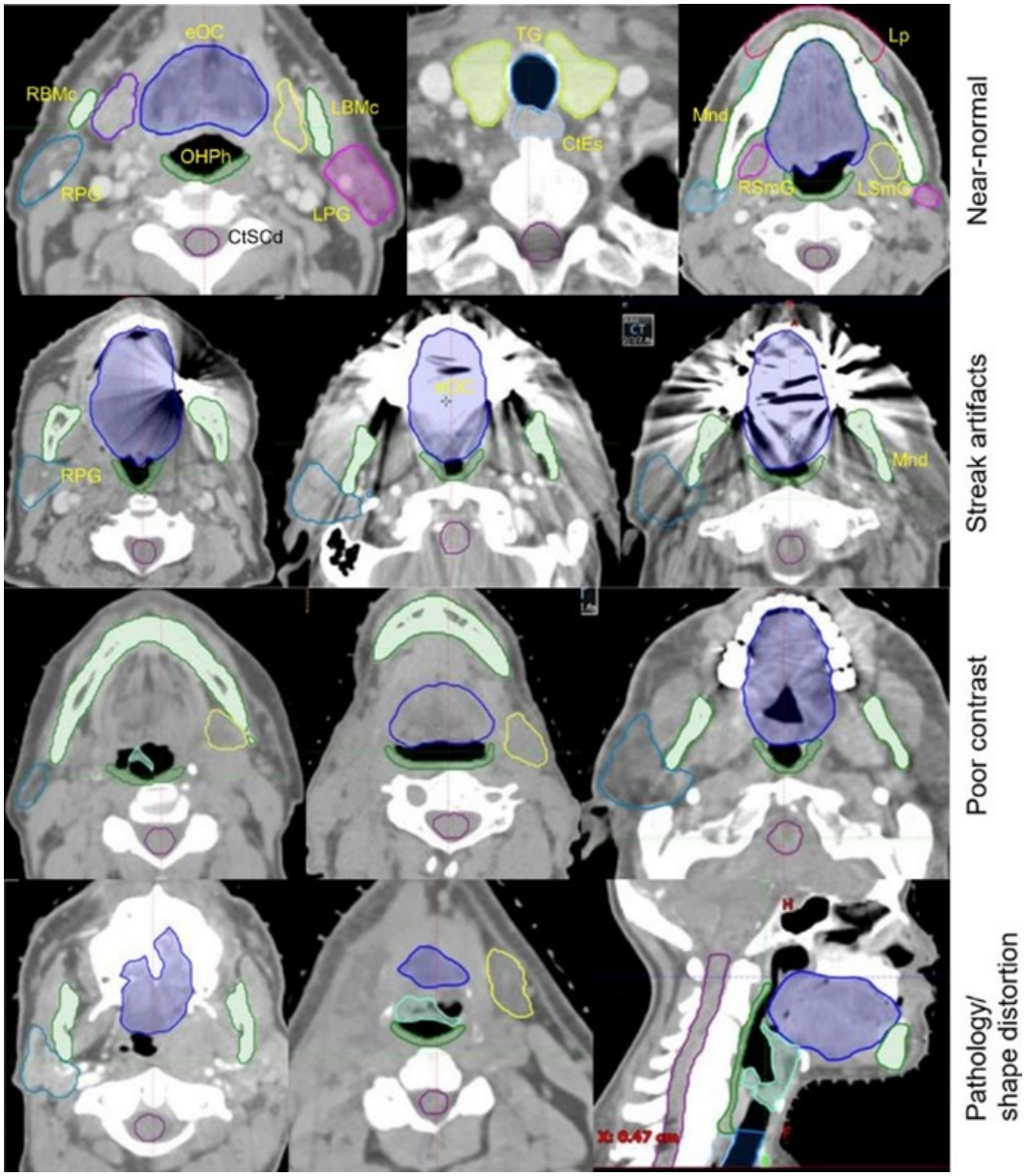


РИС. Н.2. На снимках КТ показаны области шеи с отклонениями в качестве изображения, которые могут представлять собой проблему, а именно следами в виде полос, слабой контрастностью и искажением форм. В таких случаях эффективный подход к оконтуриванию при лучевой терапии может предложить ГИ.
(Фото: «Medical Physics», 2022 год)

I. Морская среда

I.1. Новые загрязнители, вызывающие озабоченность

Положение дел

160. По оценкам, в мире производится более 140 000 синтетических химических веществ, при этом постоянно разрабатываются новые антропогенные химические вещества. Согласно прогнозам, к 2050 году частота использования и значительные объемы производства этих химических веществ, способных нанести вред экосистемам и здоровью человека, возрастут в три раза. Содержание в морской среде некоторых из этих химических веществ, часто называемых приоритетными веществами, регулируется и контролируется государствами-членами. Однако присутствием этих известных приоритетных веществ может быть объяснена лишь небольшая доля токсических эффектов, наблюдаемых в водной среде[12].

161. В этом контексте растет обеспокоенность в связи с новыми загрязнителями, вызывающими озабоченность (НЗВО), то есть веществами, которые определяются в морской среде, но не подпадают под программы регулирующего наблюдения. Несмотря на известное или предполагаемое негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека, роль и биологические эффекты НЗВО изучены плохо. К их числу относятся пластификаторы, антипирены, «антипригарные» фторсодержащие вещества (часто называемые «вечными химикатами»), пестициды, фармацевтические препараты и средства личной гигиены. Источниками НЗВО в морской среде являются: обработка промышленных и бытовых сточных вод, продукты выщелачивания со свалок, сток поверхностных вод, применение навоза и твердых веществ биологического происхождения на сельскохозяйственных землях, а также атмосферное осаждение (рис. I.1). С точки зрения состояния морских экосистем особую озабоченность вызывают вещества, сохраняющиеся в течение длительного времени, а также обладающие способностью к биоаккумуляции в живых организмах и токсичными свойствами.

162. Лаборатории морской среды МАГАТЭ в Монако занимаются разработкой аналитических методов для конкретных соединений в группах НЗВО в различных морских средах, таких как вода, отложения и биота. Использование меченых изотопами аналогов этих целевых НЗВО в ходе аналитического процесса в сочетании с масс-спектрометрическими методами обнаружения позволяет проводить точные измерения этих загрязнителей на следовом и ультраследовом уровне. Подобные методы, называемые «анализом методом изотопного разбавления», имеют ключевое значение для характеризации присутствия и распределения известных и новых химических угроз в морских пищевых сетях и морепродуктах, особенно в регионах, где проводится недостаточно исследований, в целях предоставления директивным органам научных данных.

163. Однако предупреждающие сигналы «тихой пандемии» ясны и очевидны. Проблема постоянного увеличения числа новых синтетических химических веществ, поступающих на мировой рынок, усугубляется пробелами в знаниях об их химических свойствах. Кроме того, несмотря на растущий объем доказательств, свидетельствующих о повсеместном присутствии таких химических веществ в водной среде, наблюдается нехватка мер по мониторингу, оценке и управлению.

---

[12] См. Brack, W., Klamer, H.J.C., Alda, M.L.D. and Barcelo, D., Effect-directed analysis of key toxicants in European river basins: A review, Environmental Science Pollution Research, Vol. 14(1) (2007).

РИС. I.1. В окружающую среду попадает все больше новых синтетических химических веществ. Инновационные методы отбора проб воды и аналитического скрининга могут помочь ученым в выявлении и измерении воздействия этих загрязнителей на экосистемы и здоровье человека.
(Иллюстрация: Rudzhan/stock.adobe.com, изменено МАГАТЭ)

Тенденции

164. Идет разработка более целостных стратегий мониторинга известных химических загрязнителей и выявления новых, потенциально вредных веществ в морской среде. Использование инновационных инструментов отбора проб воды совместно с новыми масс-спектрометрическими методами позволяет более точно проводить скрининг большого числа известных и предполагаемых загрязнителей и выявлять неизвестные химические вещества.

165. Появление методов пассивного отбора проб, как надежных, стабильных и экономически эффективных инструментов для мониторинга качества воды, дает особенно привлекательное решение для преодоления некоторых проблем в области химического загрязнения, характерных для водной среды. Устройства для пассивного отбора проб состоят просто из одного материала, такого как лист силиконовой резины, или материала, закрепленного за проницаемыми мембранами, что позволяет аккумулировать химические загрязнители при размещении в морской среде (рис. I.2).

РИС. I.2. Устройства для пассивного отбора перед размещением в море.(Фото: Научный центр охраны окружающей среды, рыболовства и аквакультуры, Соединенное Королевство)

166. Устройства для пассивного отбора проб могут непрерывно отбирать пробы из водоемов в течение периода от нескольких дней до нескольких месяцев. Это дает возможность аккумулировать химические загрязнители в количестве, превышающем обычно измеряемые в воде уровни в несколько тысяч раз, что позволяет легче обнаружить их там, где традиционный отбор малых объемов проб недостаточно чувствителен.

167. Загрузка стабильных изотопов в виде дейтерированных и меченных углеродом-13 эталонных соединений в такие устройства для пассивного отбора проб перед их размещением может обеспечить точное количественное определение объемов отобранной воды и интегрированные по времени измерения содержания загрязнителей. Преимущество устройств для пассивного отбора проб также состоит в том, что они отбирают пробы только свободно растворенной части химических веществ в водной фазе, тем самым обеспечивая более точное представление биодоступных загрязнителей, которые могут быть поглощены организмами. Эти устройства можно использовать даже для целенаправленного изучения органических загрязнителей, которые могут биоаккумулироваться в морских пищевых сетях.

168. При совместном использовании с современным аналитическим оборудованием, обеспечивающим хроматографическое разделение и масс-спектрометрию с высоким разрешением и высокой точностью, устройства для пассивного отбора проб могут выявлять

тысячи химических веществ, присутствующих в морской среде, и способствовать идентификации ранее неизвестных соединений. Потенциально они могут служить высокоэффективными системами раннего предупреждения о присутствии НЗВО в морской среде, могут быть установлены в отдаленных или малоизученных регионах и легко доставляться в аналитические лаборатории.

169. Эти новейшие методы отбора проб воды и аналитического скрининга могут стать новыми мощными инструментами для решения ряда проблем, связанных со сложными смесями НЗВО в морской среде. Такие разработки помогут заполнить пробелы в знаниях о присутствии антропогенных химических загрязнителей, их перемещении по экосистемам и последующем воздействии на функции морской экосистемы, с тем чтобы обеспечить управление их выбросом в морскую среду на как можно более ранней стадии.

I.2. Новые радиоиндикаторы циркуляции океана как способ улучшения понимания и моделирования переноса загрязнителей, а также изменения океана и климата

Положение дел

170. За последние несколько десятилетий в океан было сброшено множество различных радионуклидов. Их распределение в пространстве и времени может быть довольно сложным, но всегда связано с четырьмя общими процессами: функцией поступления/источником, радиоактивным распадом, биогеохимией и океаническими процессами. Поскольку они переносятся в атмосфере и гидросфере по нескольким физическим, химическим и биологическим путям, наблюдения за изменением их океанического распределения дают уникальную информацию о природе и масштабах происходящих процессов.

171. Искусственно полученные радионуклиды попадают в морскую среду с 1940-х годов в результате различных видов деятельности, включая выработку ядерной энергии, разработку, производство и испытания ядерного оружия. С тех пор выбросы искусственных радионуклидов тщательно фиксируются, и был проведен значительный объем исследований, посвященных их переносу и роли в морской среде, а также их использованию в качестве индикаторов для углубления понимания различных морских и океанических процессов. Такое понимание может стать основой для оценки неблагоприятных последствий для окружающей среды или здоровья человека, а также для быстрой оценки воздействия будущих выбросов радионуклидов, особенно незапланированных.

172. Благодаря тому, что эти вещества использовались в самых разных исторических и географических условиях, а также различиям в их поведении в окружающей среде, каждый индикатор позволяет изучить разную часть спектра процессов океанического переноса (рис. I.3). Эти свойства в сочетании с целым рядом геохимических характеристик, таких как период полураспада и сродство частиц, делают искусственно полученные радионуклиды чрезвычайно полезными инструментами для углубления понимания океанических моделей и отслеживания загрязнителей.

РИС. I.3. Термохалинная циркуляция, называемая также глобальным океаническим конвейером, является важным механизмом, который обеспечивает перемещение и смешивание воды в океане. Радиоиндикаторы могут использоваться для отслеживания движения морской воды. (Иллюстрация: Земная обсерватория НАСА, изменено МАГАТЭ)

173. Кроме того, для понимания морских и прибрежных экосистем огромную ценность имеет использование радиоиндикаторов с помощью ядерных методов, включая расчет распада/массы и активацию путем ядерных реакций. Эти методы позволяют отслеживать поглощение и биомагнификацию радиоактивных и нерадиоактивных загрязнителей, таких как микропластик и метилртуть. Такие технологии также используются для определения происхождения, отслеживания путей и понимания судьбы загрязнения морской среды микропластиком в рамках проектов, осуществляемых по линии разработанной Агентством Инициативы по использованию ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком («НУТЕК пластикс»). Они также помогают выявлять биотоксины в морепродуктах и определять их количество, оценивать воздействие подкисления океана на кальцифицирующие организмы и изучать метаболические процессы в условиях повышения температуры.

174. Благодаря расширению глобальных массивов данных моделирование морских экосистем становится важным аналитическим подходом к интеграции знаний, данных и информации с целью более глубокого понимания функционирования экосистем и миграции и переноса загрязнителей. Искусственные радионуклиды играют важную роль в проверке достоверности этих моделей, так как они предоставляют данные измерений высокой точности. Понимание процессов, ответственных за океанический перенос, необходимо для прогнозирования воздействия человека на окружающую среду и для принятия обоснованных политических решений в отношении будущей деятельности.

Тенденции

175. На начальном этапе данные измерений морской среды были ограниченными и иногда ненадежными. С возникновением сложных методов и новых технологий появилась возможность измерения минимальных концентраций материала, но при этом возникли проблемы с транспортировкой больших объемов образцов и потенциальные серьезные проблемы перекрестного загрязнения.

176. Общий низкий уровень содержания радионуклидов в пробах окружающей среды и малые размеры имеющихся проб потребовали разработки эффективных методов. Крупнейшим изменением парадигмы в радиоаналитических технологиях является переход от расчета радиоактивного распада к подсчету атомов с помощью методов масс-спектрометрии, таких как ускорительная масс-спектрометрия (AMS), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, масс-спектрометрия с резонансной ионизацией, вторично-ионная масс-спектрометрия и масс-спектрометрия с термической ионизацией.

177. Недавние крупные достижения в области AMS, касающиеся эффективности обнаружения и подавления изобаров, также открыли возможности для анализа дополнительных долгоживущих радионуклидов при сверхнизких концентрациях в окружающей среде (рис. I.4).

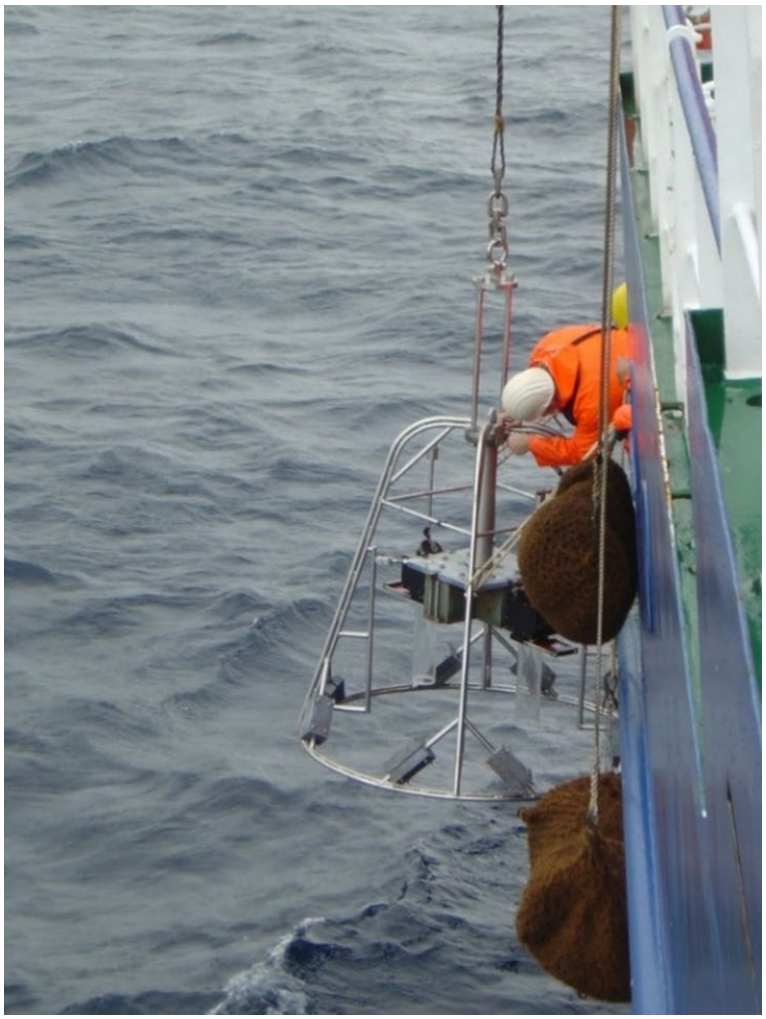


РИС. I.4. Установка мультикорера для сбора образцов ненарушенных отложений в целях анализа на содержание загрязнителей и изучения признаков изменения климата. Отложения сохраняют хронологическую информацию, а радиоиндикаторы используются для датировки прошлых событий, зафиксированных в этих природных архивах. (Фото: МАГАТЭ)

178. Длительный период полураспада технеция-99, йода-129, урана-236, нептуния-237, плутония-239 и плутония-240 определяет их роль как важных океанографических индикаторов, помогающих изучать крупномасштабные циркуляционные процессы. Исследования процессов переноса водных масс привлекли внимание к йоду-129 и урану-236 благодаря их растворимости в морской воде и тому, что благодаря новым достижениям в области методов измерения их можно обнаружить в случае крайне низких концентраций. В отличие от традиционных методов масс-спектрометрии системы AMS позволяют определять концентрации в небольших по объему образцах морской воды после применения простых и быстрых химических процедур с очень чувствительными пределами обнаружения (т.е. соотношения атомов йода-129/йода-127 и урана-236/урана-238 составляют 10^{-13} и ниже).

179. Сверхчувствительные радиоаналитические технологии всегда играли ключевую роль в науке о море. Дальнейшее развитие новых технологий подсчета единичных атомов откроет возможности для новых и впечатляющих научных исследований.

180. Ведутся многообещающие разработки в области сверхчувствительных лазерных аналитических методов, ультраследового обнаружения изотопов инертных газов, источников положительных ионов для тандемных ускорителей и технологий ионных ловушек. Прогресс в области аналитических технологий будут способствовать дальнейшему переходу от анализа совокупных проб к анализу изотопов конкретных соединений с онлайновым подключением аналитических инструментов. Такие достижения сделают технологию подсчета одиночных атомов доступной для многих радионуклидов, что станет большим шагом вперед в области сверхчувствительного анализа морских радионуклидов.

Приложение

Таблица A-1. Состояние мировой ядерной энергетики, 2022 год[a]

Страна	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2022 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2022 года	
	Число энерго-блоков	Общая мощность, МВт (эл.)	Число энерго-блоков	Общая мощность, МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема произ-водства	Годы	Месяцы
Аргентина	3	1 641	1	25	7,5	5,4	97	2
Армения	1	416			2,6	31,0	55	3
Бангладеш			2	2 160				
Беларусь	1	1 110	1	1 110	4,4	11,9	2	2
Бельгия	6	4 936			41,7	46,4	324	4
Болгария	2	2 006			15,8	32,5	173	3
Бразилия	2	1 884	1	1 340	13,7	2,5	63	3
Венгрия	4	1 916			15,0	47,0	150	2
Германия	3	4 055			31,9	5,8	834	8
Египет			2	2 200				
Индия	19	6 290	8	6 028	42	3,1	594	11
Иран, Исламская Республика	1	915	1	974	6,0	1,7	11	4
Испания	7	7 123			56,2	20,3	368	2
Канада	19	13 624			81,7	12,9	903	0
Китай	54	52 181	20	20 284	395,4	5,0	513	2
Корея, Республика	25	24 489	3	4 020	167,5	30,4	644	9
Мексика	2	1 552			10,5	4,5	61	11
Нидерланды	1	482			3,9	3,3	78	0
Объед. Арабские Эмираты	3	4 011	1	1 310	19,3	6,8	4	0
Пакистан	6	3 262			22,2	16,2	98	9
Российская Федерация	37	27 727	3	2 700	209,5	19,6	1 447	7
Румыния	2	1 300			10,2	19,3	41	11
Словакия	4	1 868	2	880	14,8	59,2	184	7
Словения	1	688			5,3	42,8	41	3
Соед. Королевство	9	5 883	2	3 260	43,6	14,2	1 658	9
Соединенные Штаты Америки	92	94 718	2	2 234	772,2	18,2	4 825	9
Турция			4	4 456				
Украина[e]	15	13 107	2	2 070	н.д.	н.д.	563	6
Финляндия	5	4 394			24,2	35,0	176	2
Франция	56	61 370	1	1 630	282,1	62,6	2 449	0
Чешская Республика	6	3 934			29,3	36,7	188	10
Швейцария	4	2 973			23,2	36,4	236	11
Швеция	6	6 937			50,0	29,5	486	0
Южная Африка	2	1 854			10,1	4,9	76	3
Япония	10	9 486	2	2 653	51,9	6,1	2 020	6
Итого в мире[b, c]	**438[d]**	**393 823[d]**	**58**	**59 334**	**2 486,6**	**н.д.**	**19 764**	**11**

Примечание: н.д. — нет данных.

[a] Источник: Информационная система по энергетическим реакторам (ПРИС) Агентства (www.iaea.org/pris), по данным, предоставленным государствами-членами на конец июня 2023 года.

[b] Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: три энергоблока, эксплуатируемая мощность 2859 МВт (эл.) и 22,9 ТВт·ч произведенной электроэнергии, на которую приходится 9,1% в общей структуре энергопроизводства.

[c] Суммарный опыт эксплуатации включает данные по остановленным станциям в Италии (80 лет, 8 месяцев), Казахстане (25 лет, 10 месяцев) и Литве (43 года, 6 месяцев), а также по остановленным и действующим станциям на Тайване, Китай (239 лет, 8 месяцев).

[d] Суммарные показатели включают данные по энергоблокам, эксплуатация которых по-прежнему приостановлена: Индия (четыре энергоблока, 639 МВт (эл.)) и Япония (23 энергоблока, 22 193 МВт (эл.)).

[e] Общий объем производства электроэнергии не включает выработку украинских реакторных блоков, так как к моменту публикации не были представлены оперативные данные за 2022 год.

Таблица E-1. Распространенные виды применения исследовательских реакторов в мире

Вид применения[a]	Число соответствующих исследовательских реакторов[b]	Число государств-членов, в которых имеются такие установки
Обучение/подготовка кадров	161	5 1
Нейтронно-активационный анализ	116	5 0
Производство радиоизотопов	82	4 1
Нейтронная визуализация	69	3 7
Облучение материалов/топлива	68	2 6
Рассеяние нейтронов	44	2 8
Геохронология	24	2 1
Трансмутация (легирование кремния)	23	1 5
Трансмутация (драгоценные камни)	20	1 2
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	15	1 2
Предоставление ядерных данных	16	9
Другие применения[c]	116	3 4

[a] Более подробно эти применения описаны в публикации Агентства «Applications of Research Reactors» («Применения исследовательских реакторов») (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, Vienna, 2014).

[b] Из 233 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на декабрь 2022 года 223 реактора эксплуатировались, 10 были временно остановлены).

[c] Другие применения включают калибровку и тестирование контрольно-измерительных приборов, эксперименты в области экранирования, создание источников позитронов и исследования в области сжигания ядерных отходов.

Список сокращений

АНСТО	Австралийская организация по ядерной науке и технике
АЭС	атомная электростанция
БНЗТ	бор-нейтронозахватная терапия
БОО	большой объем опухоли
БПЛА	беспилотный летательный аппарат
ВНОУ	высокообъемный низкообогащенный уран
ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
ВОУ	высокообогащенный уран
ГВт	гигаватт
ГВт (эл.)	гигаватт (электрической мощности)
ГГХ	глубинное геологическое хранилище
ГИ	гибридный интеллект
ГХ/СИП	газовая хроматография/спектрометрия ионной подвижности
ДСЭ	долгосрочная эксплуатация
ЕС	Европейский союз
ИГСЯО	Инициатива по гармонизации и стандартизации в ядерной области
ИЗРИ	изъятый из употребления закрытый радиоактивный источник
ИИ	искусственный интеллект
ИНИР	комплексная оценка ядерной инфраструктуры
ИФМИФ	Международная установка по облучению материалов для термоядерного синтеза
КО	критические органы
КОМ	клинический объем мишени
КПО	критерии приемлемости отходов
КС-27	27-я сессия Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (2022 года)
КТ	компьютерная томография
кэВ	килоэлектронвольт
ЛИДАР	лазерная система обнаружения и измерения дальности
ЛЛНЛ	Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса
МВт (эл.)	мегаватт (электрической мощности)
ММР	реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы
МО	машинное обучение
МЭ	Министерство энергетики США
МэВ	мегаэлектронвольт
НЗВО	новые загрязнители, вызывающие озабоченность
НИОКДР	научно-исследовательские, опытно конструкторские и демонстрационные работы
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НИФ	Национальная установка по термоядерному зажиганию
НОУ	низкообогащенный уран
НСАО	низко- и среднеактивные отходы
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
ПВ	подземное выщелачивание
ПКИ	проект координированных исследований
ПРИС	Информационная система по энергетическим реакторам
ПУТ	приглашение к участию в тендере
ПЭМ	полимерная электролитная мембрана
ПЭТ	позитронно-эмиссионная томография
РМПП	радиоактивный материал природного происхождения
ТВт·ч	тераватт-час
топливо TRISO	топливо с трехструктурным изотропным покрытием
ТР	техник-радиолог

тТМ	тонн тяжелого металла
УАЭС	Управление по атомным электростанциям
УМС	ускорительная масс-спектрометрия
УПП	устойчивость к противомикробным препаратам
УСК	утверждение стандартной конструкции
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций
ЩЭА	щелочная электролизная ячейка
ЭДРФ	энерго-дисперсионная рентгеновская флюоресценция

AGR	усовершенствованный газоохлаждаемый реактор
ALFRED	европейский демонстрационный быстрый реактор со свинцовым теплоносителем
ALPS	усовершенствованная система водоочистки
ATF	устойчивое к авариям топливо
ATF-TS	инновационное и устойчивое к авариям топливо
COVID-19	коронавирусная инфекция, выявленная в 2019 году
DEMO	демонстрационная термоядерная энергетическая установка
D10	доза для десятикратного сокращения (численности патогенных микроорганизмов)
HPR-1000	реактор типа «Хуалун-1»
HTR-PM	модульный высокотемпературный реактор с шаровыми твэлами
IMSR	интегральный реактор на солевых расплавах
KP-FHR	высокотемпературный реактор с расплавом фтористых солей «Кайрос Паэур»
KSTAR	Корейский проект по перспективным исследованиям в области сверхпроводящего токамака
LFR	быстрый реактор со свинцовым теплоносителем
LWR	легководный реактор
MHTGR	модульный высокотемпературный реактор с газообразным теплоносителем
MMR	микромодульный реактор
MOX	смешанное оксидное топливо
MSFR	быстрый реактор на солевых расплавах
MSR	реактор на солевых расплавах
PWR	реактор с водой под давлением
SCWR	сверхкритический водоохлаждаемый реактор
SFR	быстрый реактор с натриевым теплоносителем
SMART	системно-интегрированный модульный усовершенствованный реактор
STEP	сферический токамак для производства энергии
TRIC	межлабораторные сравнительные испытания на определение содержания трития
WCR	водоохлаждаемый реактор

IAEA
Международное агентство по атомной энергии
Атом для мира и развития

Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр, а/я 100
1400 Вена, Австрия
Телефон: (+43-1) 2600-0
Факс: (+43-1) 2600-7
Эл. почта: Official.Mail@iaea.org
www.iaea.org

23-01479R