

Обзор ядерных технологий

■ 2024

Доклад Генерального директора



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Атом для мира и развития

GC(68)/INF/4

Обзор ядерных технологий — 2024

Доклад Генерального директора

GC(68)/INF/4

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Сентябрь 2024 года
IAEA/NTR/2024

Содержание

Резюме.....	3
Предисловие Генерального директора.....	5
Основные итоги.....	7
A. Ядерная энергетика	13
A.1. Прогнозы развития ядерной энергетики	13
A.2. Действующие атомные электростанции.....	14
A.3. Новые ядерно-энергетические программы или расширение существующих.....	17
A.4. Развитие ядерно-энергетических технологий.....	21
A.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы.....	22
A.4.2. Реакторы малой и средней мощности и малые модульные реакторы, а также микрореакторы	24
A.4.3. Реакторы на быстрых нейтронах.....	28
A.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики.....	29
B. Ядерный топливный цикл.....	32
B.1. Начальная стадия топливного цикла.....	32
B.2. Конечная стадия топливного цикла	37
C. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	40
C.1. Вывод из эксплуатации	40
C.2. Восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивным материалом природного происхождения (РМП)	43
C.3. Обращение с радиоактивными отходами	45
D. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике.....	50
E. Исследовательские реакторы, ускорители частиц и ядерные контрольно-измерительные приборы	60
E.1. Исследовательские реакторы	60
E.2. Ускорители частиц.....	65
E.3. Ядерные контрольно-измерительные приборы.....	68
F. Атомные и ядерные данные.....	70
G. Применение искусственного интеллекта в ядерной энергетике и ядерном топливном цикле	71
H. Здоровье человека.....	72
H.1. Неинвазивная оценка пищеварительной функции кишечника: оптимизированный дыхательный тест с применением ¹³ C-сахарозы	72

Н.2. Обеспечение качества: новые разработки в сфере брахитерапии.....	76
Н.3. Заглянуть в самое сердце: решающая роль ядерной визуализации в выявлении амилоидоза сердца.....	80
I. Продовольствие и сельское хозяйство	83
I.1. Технологии облучения для разработки вакцин: применение ядерных технологий для профилактики инфекционных болезней домашнего скота.....	83
I.2. Сочетание ядерной технологии зондирования с источником нейтронов космического излучения и изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования, для управления водными ресурсами в сельском хозяйстве.....	85
J. Радиоизотопные и радиационные технологии.....	89
J.1. Новые системы доставки радиофармпрепаратов к клеткам-мишеням	89
J.2. Применение технологии радиоиндикации и искусственных водно-болотных угодий для восстановления сточных вод горнодобывающей промышленности	93
K. Изотопная гидрология.....	96
K.1. Определение гидрологического цикла: новые разработки в области анализа трития.....	96
L. Морская среда	99
L.1. Использование искусственного интеллекта для улучшения хода мониторинга и исследования загрязнения океана микропластиком	99
Приложение	103
Список сокращений и акронимов	106

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 2023 году.
- В «Обзоре ядерных технологий — 2024» 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, атомные и ядерные данные, применение искусственного интеллекта в ядерной энергетике и ядерном топливном цикле, здоровье человека, продовольствие и сельское хозяйство, радиоизотопные и радиационные технологии, изотопная гидрология и морская среда.
- Проект доклада был представлен на сессии Совета управляющих в марте 2024 года в документе GOV/2024/2. Окончательный вариант был подготовлен с учетом состоявшегося в Совете управляющих обсуждения, а также поступивших от государств-членов замечаний.

Предисловие Генерального директора

Где бы ни использовались ядерные технологии — для производства надежной и низкоуглеродной энергии или в области продовольствия, здравоохранения, водных ресурсов и экологии — они играют важную роль в решении многих из наших самых насущных проблем.

В 2023 году мы отметили значительный и неослабевающий интерес к использованию ядерной энергетики как для достижения климатических целей, так и обеспечения надежного и недорогого энергоснабжения, причем несколько государств-членов пересмотрели свою политику в области ядерной энергии. На 28-й Конференции сторон (КС-28) Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), состоявшейся в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты, Агентство провело в павильоне «Atoms4Climate» ряд мероприятий, на которых рассказывалось о том, как использование ядерной энергии может внести значительный вклад в декарбонизацию производства водорода и отраслей, уровень выбросов в которых сложно уменьшить, и способствовать стремительному процессу декарбонизации. 1 декабря 2023 года было опубликовано одобренное десятками государств-членов заявление МАГАТЭ о ядерной энергетике, в котором подчеркивалось, что она является залогом достижения нулевого уровня выбросов. Несколько месяцев ранее этот факт подтвердила обновленная дорожная карта Международного энергетического агентства «Net Zero by 2050» («Нулевые выбросы к 2050 году»), согласно которой к 2050 году ядерно-энергетические мощности увеличатся более чем вдвое; такая оценка соответствует опубликованному в сентябре 2023 года собственному оптимистическому прогнозу МАГАТЭ. Кроме того, в ходе КС-28 более 20 стран приняли Декларацию, в которой призвали утроить мощности ядерной энергетики к 2050 году и предложили региональным банкам развития и международным финансовым учреждениям включить ядерную энергетику в свою кредитную политику, подчеркивая при этом необходимость создания надежных цепей поставок для ускорения внедрения этой технологии. Вместе с нашими партнерами и благодаря усилиям и решимости предыдущих лет впервые с момента начала проведения ежегодных климатических саммитов в 1995 году КС-28 удалось завершить крупным достижением. В первом Глобальном подведении итогов, которое было одобрено 198 странами, подписавшими РКИК ООН, ядерная энергетика была прямо упомянута как одна из технологий с низким уровнем выбросов, которые необходимы для достижения глубокого и быстрого сокращения выбросов парниковых газов.

В то же время все больше стран используют ядерные технологии для неэнергетических применений, в том числе для повышения продовольственной безопасности, устранения последствий изменения климата, защиты окружающей среды от загрязнения и совершенствования лечения рака и других опасных для жизни болезней. В настоящем докладе особо подчеркивается, что Агентство продолжает свою инновационную деятельность по этим и другим ключевым направлениям благодаря работе лабораторий ядерных применений в Австрии и Монако, проектам координированных исследований и партнерству с ведущими исследовательскими институтами по всему миру. Во многих областях научно-исследовательской деятельности Агентства для содействия инновациям все чаще используется искусственный интеллект, и это направление продолжит развиваться.

Обоснованные решения принимаются с опорой на научные исследования и данные, и Агентство постоянно стремится к тому, чтобы посредством своей научно-исследовательской деятельности помочь странам максимально широко использовать возможности ядерной науки и технологий для защиты и укрепления здоровья и благосостояния их населения. Вслед за такими инициативами Агентства, как «Комплексные действия по борьбе с зоонозными заболеваниями» (ЗОДИАК), «Ядерные технологии для борьбы с загрязнением пластиком» («НУТЕК пластик») и «Лучи надежды», в 2023 году на фоне обостряющейся во всем мире проблемы отсутствия продовольственной безопасности Агентство и Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) объявили о начале реализации новой совместной инициативы «Atoms4Food» с целью помочь странам повысить продовольственную безопасность и безопасность пищевой продукции за счет

использования ядерных методов, включая ведение климатически оптимизированного сельского хозяйства и применение разработанной в наших лабораториях усовершенствованной практики управления водными ресурсами.



РИС. FW.1. Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси на конференции КС-28 в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты (фото: МАГАТЭ).

На протяжении десятилетий ядерная наука и технологии играли важную роль, помогая странам удовлетворять свои потребности в развитии. Безусловно, их возможности, в том числе в других областях, еще не исчерпаны. «Обзор ядерных технологий — 2024», в котором освещаются некоторые ключевые события, происшедшие в области ядерных технологий в 2023 году, поможет государствам-членам принимать обоснованные решения при реагировании как на текущие, так и новые вызовы.

Основные итоги

1. Третий год подряд Агентство пересматривает в сторону повышения свой ежегодный прогноз потенциального роста ядерной энергетики в предстоящие десятилетия и подтверждает возобновление интереса к ядерной энергетике в условиях кризисов, связанных с энергетической безопасностью и изменением климата, а также ввиду растущей потребности в электрификации и необходимости поиска источников энергии, которые не только представляют собой альтернативу ископаемому топливу, но могут обеспечить производство тепла и водорода для декарбонизации промышленности и транспорта. Агентство пересмотрело свой пессимистический прогноз в сторону повышения до 458 гигаватт (ГВт) в 2050 году, что в значительной мере (на 55 ГВт) превышает пессимистический прогноз 2022 года. В свою очередь оптимистический прогноз повышен до 890 ГВт в 2050 году, который превышает показатель 873 ГВт, заложенный в оптимистическом сценарии прошлогоднего прогноза, и на 175 ГВт превышает прогноз 2020 года.

2. По состоянию на декабрь 2023 года общая мощность мировой ядерной энергетики составляла 371,5 ГВт (эл.), которые вырабатывались на 413 находящихся в эксплуатации энергоблоках, расположенных в 31 государстве-члене. Кроме того, в течение года 21,3 ГВт (эл.) мощностей АЭС, имеющих лицензию на эксплуатацию (25 энергоблоков), находились в приостановленном состоянии. В 2023 году к энергосистеме было подключено 5 ГВт (эл.) новых мощностей АЭС в составе 5 энергоблоков, и еще дополнительно была восстановлена выработка 1,6 ГВт (эл.) за счет двух энергоблоков, которые ранее были остановлены, но затем повторно подключены к сети. Согласно отчетам государств-членов, мировой парк АЭС в совокупности произвел около 2515,2 тераватт-часов (ТВт·ч) электроэнергии с низким уровнем выбросов, подачу которой можно регулировать в зависимости от спроса¹. На конец 2023 года в 17 странах велось строительство АЭС общей мощностью 61,1 ГВт (эл.) (59 энергоблоков). Приблизительно 67% мощностей действующих энергоблоков по всему миру находятся в эксплуатации более 30 лет. За тот же период были окончательно выведены из эксплуатации 6 ГВт (эл.) ядерных мощностей (5 энергоблоков).

3. В настоящее время интерес к включению ядерной энергетики в свою структуру энергопроизводства проявляют порядка 50 стран. Из них 27 стран находятся на разных этапах подготовки и внедрения своих национальных программ в области ядерной энергетики. К 2035 году число стран, эксплуатирующих атомные электростанции (АЭС), может увеличиться примерно на 30%, то есть с учетом того, что в данный момент АЭС эксплуатируются в 31 стране, к этому числу может добавиться еще 10–12 стран. Для удовлетворения растущего интереса к этой области требуется полноценное развитие ядерной инфраструктуры.

4. Преобладающей технологией, которая используется на АЭС по всему миру, были и остаются водоохлаждаемые реакторы. Внимание, которое во всем мире уделяется развитию ядерно-энергетических технологий, обусловлено необходимостью ускорить внедрение усовершенствованных реакторов, включая реакторы малой мощности и модульные реакторы (ММР). Текущий вектор развития ММР направлен на улучшение их экономических показателей, безопасности и масштабируемости. Растет интерес со стороны государств-членов к плавучим АЭС и микрореакторам и их применениям, и ряд стран в настоящее время занимаются разработкой проектов ММР морского базирования для плавучих АЭС.

¹ Общий объем производства электроэнергии не включает выработку украинских энергоблоков, так как к моменту публикации не были представлены данные об эксплуатации за 2023 год.

5. Использование ядерной энергии для неэлектрических применений, включая централизованное теплоснабжение, опреснение и прямое обеспечение теплом различных промышленных процессов, — это проверенная технология, и в настоящее время для этих целей в нескольких государствах-членах в эксплуатации находятся 65 реакторов, а многие другие государства-члены проявляют к этой области все больший интерес.

6. Применительно к реакторам на быстрых нейтронах основным направлением является совершенствование мер безопасности за счет внедрения пассивных систем останова и изучения вариантов применения различных теплоносителей, особенно в случае использования реакторов инновационной конструкции. В среднесрочной перспективе внедрение систем на основе быстрых нейтронов будет происходить преимущественно с опорой на технологию быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

7. Исследования и разработки в области применения искусственного интеллекта (ИИ) продемонстрировали свой потенциал в контексте эффективной оптимизации конструкции активной зоны, определяющей проектный облик энергетических реакторов и усовершенствованных ядерных реакторов. Это может также способствовать повышению безопасности, эксплуатационной эффективности и экономичности, как и развитию передовых ядерных технологий.

8. В области энергии термоядерного синтеза все более крупные инвестиции привлекают частные компании, поскольку многие из них намерены самостоятельно разрабатывать свои собственные исследовательские и демонстрационные устройства. В то же время начинают формироваться государственно-частные партнерства в области термоядерного синтеза и отмечается ежегодный рост объема финансирования термоядерной энергетики: в 2023 году он составлял в общей сложности 6,21 млрд долл. США (по сравнению с 4,8 млрд долл. США в 2022 году). Отрасль термоядерной энергетики становится все более пестрой в географическом отношении и насчитывает 43 действующие компании в 12 странах. На проблемы и возможности использования энергии термоядерного синтеза начинают обращать внимание также регулирующие органы и законодатели.

9. Совет ИТЭР, руководящий орган Организации ИТЭР, продолжал изучать пересмотренные планы ИТЭР, которые предполагают замену материала первой стенки с бериллия на вольфрам. Кроме того, Организация ИТЭР продолжала окончательную доработку стратегий и контрактов с поставщиками на ремонт ключевых компонентов, а также продолжала взаимодействовать с Управлением по ядерной безопасности Франции. В 2023 году исследователи из американской Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса по меньшей мере трижды повторили революционный эксперимент по зажиганию термоядерного реактора, проведенный на Национальной установке по термоядерному зажиганию в декабре 2022 года.

10. Согласно глобальным прогнозам издания «Uranium 2022: Resources, Production and Demand» («Уран 2022: ресурсы, производство и спрос») (Красная книга 2022 года), спрос на уран к 2030 году составит от 60 960 тонн урана (т U) (сценарий низкого спроса) до 76 592 т U (сценарий высокого спроса), а к 2040 году — от 63 040 т U (сценарий низкого спроса) до 108 272 т U (сценарий высокого спроса). Планируемые и перспективные рудники в 19 странах могут, по мере их ввода в эксплуатацию с 2023 по 2040 год, внести вклад в номинальную общемировую производственную мощность в размере 77 138 т U в год. По данным Красной книги 2022 года, общемировые расходы на разведку и разработку месторождений в 2021 году несколько увеличились (примерно на 2,8 млн долл. США) после снижения на 2 млрд долл. США в период с 2014 по 2020 год.

11. В следующем десятилетии индустрия производства ядерного топлива столкнется с растущим спросом на ядерное топливо во всех сегментах ввиду расширения программ строительства как в странах с существующей ядерной энергетикой, так и в странах-новичках, а также с учетом амбициозных целей создания новых видов топлива, включая топливо для ММР и усовершенствованных реакторов. Производство низкообогащенного урана «плюс» (НОУ+) и особенно высокопробного низкообогащенного урана (ВНОУ) требует решения вопросов ядерной и физической безопасности — от нового процесса лицензирования и скорректированного режима регулирования до специально созданной инфраструктуры логистических цепей.

12. Скорость накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в мировых хранилищах составляет приблизительно 7 тыс. тонн тяжелого металла (тТМ) в год, при этом его количество в пунктах хранения превышает 300 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.

13. Всего в мире окончательно остановлены 210 ядерных реакторов. Количество установок, находящихся в стадии активного демонтажа, продолжает расти, при этом наблюдается тенденция к проведению демонтажа установок вскоре после окончательного останова. Все более важную роль в процессе вывода ядерных установок из эксплуатации будут играть цифровые технологии, включая использование мобильных роботов для сканирования физического и радиологического состояния сооружений.

14. Глобальная тенденция к внедрению принципов и методов комплексного обращения с радиоактивными отходами помогает оптимизировать обращение с отходами с момента их образования до захоронения. Комплексное обращение с отходами позволяет упорядочить процессы, снижает риски для окружающей среды и способствует ответственному обращению с радиоактивными отходами. Кроме того, усиливающаяся тенденция к введению иерархии радиоактивных отходов имеет целью сокращение объема направляемых на пункты захоронения радиоактивных отходов, что приведет к сохранению этих пунктов как ценных объектов в долгосрочной перспективе.

15. На конец 2023 года в 54 странах насчитывалось 234 действующих исследовательских реактора, включая временно остановленные. Кроме того, в 10 странах велось строительство 11 новых исследовательских реакторов, включая 1 электроядерную систему, а официальные планы строительства новых исследовательских реакторов имелись у 14 государств-членов. Постепенное старение парка исследовательских реакторов по всему миру побуждает операторов и регулирующие органы применять новые методы и методики оценки условий эксплуатации исследовательских реакторов в интересах обеспечения их постоянной безопасной работы.

16. Качество детальных научных исследований зависит от того, какое количество нейтронов сможет произвести и дать в распоряжение исследователей источник нейтронов. Поэтому, помимо исследовательских реакторов, ученые и инженеры продолжали разрабатывать новое поколение источников нейтронов, основанных на ускорителях частиц и технологии мишени скалывания.

17. Ключевую роль в субклеточной визуализации и облучении для лечения онкологических заболеваний играют ускорители частиц. Для нужд медицинской диагностики регулярно используется широкий спектр методов визуализации, таких как ультразвук, компьютерная томография и магнитно-резонансная визуализация. По мере того как методы манипулирования с ионным и рентгеновским излучением становятся все более сложными, появляется возможность

фокусировать ионные или рентгеновские пучки с точностью до нанометра, а также применять новые методы мультиспектральной визуализации для целей медицинской визуализации и визуализации артефактов.

18. В качестве неотъемлемой части систем сбора данных с детекторов излучений (СДД) все чаще используются программируемые пользователем вентильные матрицы. Они служат самым разным целям — от настройки параметров СДД и потоковой передачи/маршрутизации данных до тонкой дискриминации сигналов или даже полной реконструкции событий. В основе более сложных функций лежат применяемые алгоритмы обработки данных — обычные или базирующиеся на использовании искусственного интеллекта.

19. В рамках ИТЭР различные государства-члены расходуют все больше средств на то, чтобы получить высококачественные данные о гамма-взаимодействиях. Основные области применения таких данных — активный нейтронный опрос, более точные оценки гамма-нагрева в экранировании атомных реакторов и термоядерных устройств, а также инновации в области космических применений.

20. Один из самых актуальных вопросов здравоохранения и питания — почему дети в странах с низким и средним уровнем дохода (СНСД) остаются низкорослыми для своего возраста, несмотря на многочисленные меры, которые принимаются в области здравоохранения. Все более распространенным заболеванием среди детей, живущих в СНСД в антисанитарных условиях, становится кишечная дисфункция, вызванная факторами окружающей среды (КДОС). Агентство содействует оптимизации неинвазивного дыхательного теста, который измеряет усвояемость сахарозы — индикатора повреждения тонкой кишки при КДОС — и может применяться во всех возрастных группах. Для получения более полных результатов этот тест можно применять в комбинации с другими тестами, чтобы охватить иные аспекты КДОС помимо усвояемости сахарозы.

21. Рак шейки матки — это четвертая по распространенности разновидность рака у женщин во всем мире. Ключевую роль в лечении этого заболевания играет жизненно важный компонент лучевой терапии — брахитерапия, при проведении которой во избежание побочных эффектов из-за недостаточной или избыточной дозировки необходима тщательная оптимизация процедуры. Для повышения качества брахитерапии Агентство разрабатывает новую методологию дозиметрического аудита. Агентство прилагает усилия также к тому, чтобы преодолеть накапливающиеся в СНСД проблемы с обучением и подготовкой кадров в области брахитерапии, которые усугубляются вследствие усложнения технологии и нехватки учебного оборудования. Агентство использует экономически эффективный инструмент виртуальной реальности, который помогает преодолеть физические, географические и логистические барьеры и позволяет пользователям практиковаться в проведении брахитерапии. Агентство применяет комплексный подход к повышению квалификации медицинских работников, занимающихся брахитерапией, благодаря сочетанию дозиметрического аудита и инновационных инструментов обучения.

22. Последние достижения в области медицинских исследований и терапевтических стратегий открыли новую эру, подарив надежду больным с амилоидозом сердца. Инновационные лекарственные средства против основных механизмов амилоидных отложений в сочетании с усовершенствованными средствами диагностической визуализации, такими как ядерная кардиология, позволяют медицинским работникам осуществлять вмешательство раньше и эффективнее. Благодаря передовым методам визуализации ядерная кардиология позволяет точно выявлять амилоидоз сердца и отличать его от других болезней сердца. Неинвазивный характер этих методов делает их особенно ценными для комплексной оценки амилоидоза сердца, что способствует более раннему и точному лечению этого заболевания.

23. В качестве экономичного метода профилактики болезней животных, которые в мировом масштабе могут быть причиной огромных экономических потерь, часто рассматривается вакцинация домашнего скота. В последнее время возродился интерес к использованию облучения для производства вакцин как благодаря новым облучателям, которые могут обеспечивать точность дозы при более краткой продолжительности облучения, так и лучшему пониманию работы иммунной системы, что позволяет эффективнее оценивать реакцию на вакцинацию. Технический прогресс способствовал также тому, что стало возможным использовать электронно-лучевые и другие методы облучения для инактивации патогенов и поэтому отказаться от использования радиоактивных веществ при производстве облученных вакцин.

24. Три миллиарда человек живут в сельскохозяйственных регионах в условиях острого или крайне острого дефицита воды, и изменение климата лишь обостряет эту проблему. Технология зондирования с источником нейтронов космического излучения теперь используется в сочетании с изображениями высокого разрешения, чтобы отслеживать влажность почвы на больших площадях суши или на уровне водораздела. Эта технология способна произвести революцию в области дистанционного зондирования для целей климатически оптимизированного орошения, что значительно улучшит доступ к исходной информации для лиц, принимающих решения, и фермеров. Кроме того, технология открывает целый ряд потенциальных областей применения экологических исследований, таких как анализ тенденций изменения влажности почвы, моделирование продуктивности использования воды растениями, мониторинг изменения водообеспеченности водно-болотных угодий и прогнозирование засух, а также предоставляет данные для разработки политики адаптации к изменению климата.

25. Безопасно и эффективно доставлять радионуклиды к органам, тканям или клеткам-мишеням для диагностики или лечения позволяют радиофармпрепараты. Радиофармпрепараты могут применяться в сочетании с методами предварительного таргетирования, комбинированными методами химиотерапии или радиационными сенсбилизаторами. Методы предварительного таргетирования способны в корне изменить стратегии в области тераностики, поскольку позволяют использовать радионуклиды с коротким периодом полураспада и снизить таким образом вероятность облучения здоровых тканей. Для повышения безопасности и эффективности лекарственных средств в настоящее время активно изучаются наносистемы доставки, включая тераностические наносистемы. Предполагается, что доставка с помощью наночастиц будет иметь множество преимуществ, включая повышение концентрации терапевтических радионуклидов в мишени и снижение побочных эффектов.

26. Экономичную и экологичную альтернативу традиционным очистным сооружениям представляют искусственные водно-болотные угодья, которые отличаются низким энергопотреблением и простой механической инфраструктурой. Они подходят для очистки любых типов сточных вод, в том числе в горнодобывающей промышленности. Тем не менее для оптимизации процессов очистки требуется более глубокое изучение их сложной гидродинамики. Агентство проводит исследование по использованию технологии радиоиндикаторов с целью выработать протоколы и руководства и проверить модели потока в условиях искусственных водно-болотных угодий, усовершенствовать гидравлические характеристики искусственных водно-болотных угодий для восстановления сточных вод горнодобывающей промышленности, оптимизировать эффективность удаления загрязнителей в искусственных водно-болотных угодьях и спрогнозировать динамическую реакцию водно-болотных угодий на различные условия.

27. Тритий — единственный радиоактивный изотоп, входящий в состав молекулы воды, и с его помощью возможно отслеживать процессы гидрологического цикла. Из-за короткого периода полураспада тритий в основном используется для оценки пополнения подземных вод и степени

подверженности загрязнению. Из-за низкой концентрации трития в современных природных водах измерение его содержания стало технически сложной задачей. Для получения точных и достоверных результатов при гидрологических применениях требуется значительное обогащение трития. Агентство разработало и тщательно протестировало инновационную систему обогащения трития на основе полимерных электролитных мембран, которая способна радикально расширить возможности стран по измерению сверхнизких концентраций трития в пробах воды из окружающей среды для целей гидрологического и радиологического надзора.

28. Важнейшим инструментом в сфере идентификации микропластика становится ИИ. Сегодня мы лучше понимаем проблему загрязнения морской среды пластиком, однако количественное определение и характеристика микропластика по-прежнему затруднены. Фундаментальные перемены влечет за собой использование ИИ алгоритмов машинного обучения для понимания сложных процессов разложения полимеров в морской среде. Скорость спектрального анализа ИИ в сочетании с моделированием физических, химических и биологических процессов для получения спектров разлагающихся полимеров делает ИИ важнейшим инструментом в деле совершенствования идентификации микропластика.

А. Ядерная энергетика

А.1. Прогнозы развития ядерной энергетики

Положение дел

1. Третий год подряд Агентство пересматривает в сторону повышения свои ежегодные прогнозы в отношении потенциального роста ядерной энергетике в предстоящие десятилетия, подтверждая возобновление интереса к ядерной энергетике в контексте кризисов, связанных с энергетической безопасностью и изменением климата. На этом фоне оно отмечает также растущую потребность в электрификации и необходимость поиска источников энергии, которые не только представляют собой альтернативу ископаемому топливу, но могут обеспечить производство тепла и водорода для декарбонизации промышленного и транспортного секторов.

2. В своей новой оценке развития мощностей АЭС в глобальном масштабе для генерации электроэнергии Агентство пересмотрело свой пессимистический прогноз в сторону повышения до 458 гигаватт (ГВт) в 2050 году, что в значительной мере — на 55 ГВт — превышает заложенные для пессимистического сценария цифры согласно прогнозу 2022 года. В свою очередь, оптимистический прогноз был повышен до

890 ГВт
в **2050** году

уровня 890 ГВт в 2050 году — это больше, чем 873 ГВт, приводившиеся для оптимистического сценария в прошлогоднем прогнозе, и на 175 ГВт больше по сравнению с прогнозом 2020 года. 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. Помимо амбициозных программ нового строительства, решающее значение для достижения показателей, соответствующих оптимистическому прогнозу, имеет ДСЭ существующего парка АЭС. Дополнением к реакторам большой мощности могут стать новые выходящие на рынок технологии, включая реакторы малой мощности и модульные реакторы (ММР) и другие типы усовершенствованных реакторов, которые открывают новые возможности для развертывания ядерно-энергетических систем в целях удовлетворения различных потребностей и преодоления тех или иных ограничений (например, в странах с небольшими энергосетями, для вариантов применения, предусматривающих изолированный от сети режим работы, и для неэлектрических применений). Тем не менее основной импульс прогнозируемого расширения ядерной энергетике, как ожидается, будет обеспечен за счет реакторов большой мощности.

3. На прогнозы развития мощностей АЭС как по оптимистическому, так и пессимистическому сценарию накладывают свой отпечаток региональные различия и неоднородность динамики развития. Решение многих проблем, связанных с развитием и развертыванием потенциала ядерной энергетике — в частности, согласование нормативных требований и стандартизация, а также окончательное захоронение радиоактивных отходов, — немыслимо без международного сотрудничества. Еще одним проблемным вопросом, который давно требует решения, является финансирование.

Тенденции

4. Отмечается значительный и растущий интерес к технологиям усовершенствованных и инновационных реакторов, в том числе к ММР и различным областям их применения. Хотя в течение следующих десятилетий основной объем наращивания ядерных мощностей, согласно

прогнозам, будет обеспечиваться за счет усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов большой мощности, ожидается, что именно ММР сыграют ключевую роль в декарбонизации отраслей, уровень выбросов в которых сложно уменьшить, а также будут снабжать низкоуглеродной энергией рынки, где они могут заменить собой работающие на ископаемом топливе электростанции сравнимой мощности. 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 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.

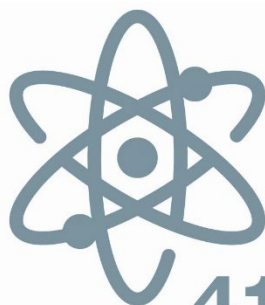
5. В то же время многие страны, которые приняли решение о досрочном поэтапном отказе от ядерной генерации, пересматривают этот вариант и переходят к незапланированной ДСЭ.

А.2. Действующие атомные электростанции²

Положение дел

6. По состоянию на декабрь 2023 года общая мощность мировой ядерной энергетики составляла 371,5 ГВт (эл.), которые вырабатывались на 413 находящихся в эксплуатации энергоблоках, расположенных в 31 государстве-члене. Помимо этого, в приостановленном состоянии в 2023 году находились 21,3 ГВт (эл.) мощностей АЭС, имеющих лицензию на эксплуатацию (25 энергоблоков). В их число входят 4 энергоблока в Индии, общая мощность которых составляет 639 МВт (эл.) нетто, а также 21 энергоблок в Японии (общая мощность — 20 633 МВт (эл.) нетто). В Японии были перезапущены два энергоблока (№ 1 и 2 на АЭС «Тахакама») после того, как еще в 2011 году их эксплуатация была остановлена.

7. В 2023 году в эксплуатации находились 418 энергоблоков общей мощностью 377,6 ГВт (эл.), но данные о выработке электроэнергии поступили в Агентство только в отношении 403 энергоблоков общей мощностью 364,48 ГВт (эл.). Общий объем выработки электроэнергии в 2023 году составил 2 515,2 ТВт·ч, что лишь на 1% больше, чем в 2022 году³. В тройку лидеров вошли Соединенные Штаты Америки, имеющие крупнейший парк АЭС в мире, на которые приходится 30% (742,4 ТВт·ч) от общего объема выработки, затем Китай, доля которого составляет



К концу 2023 года общая эксплуатируемая мощность мировой ядерной энергетики составляла

377,6 ГВт (эл.),

которые вырабатывались на

418 действующих энергоблоках, расположенных

в **31** стране

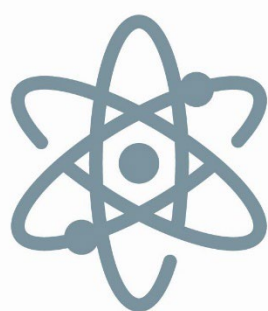
² Источник данных: Информационная система по энергетическим реакторам (PRIS) Агентства (www.iaea.org/pris), согласно данным, предоставленным государствами-членами к 16 июня 2024 года.

³ Общий объем производства электроэнергии не включает выработку украинских энергоблоков, так как к моменту публикации не были представлены данные об эксплуатации за 2023 год.

16% (406,5 ТВт·ч) и который на протяжении 4 лет по-прежнему вырабатывает на АЭС больше электроэнергии, чем Франция, и собственно Франция, доля которой составляет 13% (323,8 ТВт·ч).

8. В 2023 году в пяти различных государствах-членах к энергосистеме были подключены пять энергоблоков на основе реакторов с водой под давлением (PWR) общей мощностью 5 ГВт (эл.). В Китае 10 января был подключен к сети 3-й энергоблок АЭС «Фанчэнган», в составе которого работает первый из двух демонстрационных реакторов «Хуалун-1» (HPR1000), строящихся на площадке в Фанчэнгане. В Словакии 31 января был подключен к сети 3-й энергоблок АЭС «Моховце» с реактором ВВЭР В-213, обеспечивающим электрическую мощность 440 МВт (эл.) нетто. В Соединенных Штатах Америки 31 марта к сети был подключен 3-й энергоблок АЭС «Вогтль» с реактором AP1000 (1117 МВт (эл.)). В Беларуси 13 мая к сети был подключен 2-й энергоблок Белорусской АЭС с реактором ВВЭР В-491 (1110 МВт (эл.)). И в довершение, 21 декабря в Республике Корея был подключен к сети 2-й энергоблок АЭС «Син-Хануль» с реактором APR-1400 (1340 МВт (эл.)). Все эти энергоблоки, кроме «Моховце-3» и «Син-Хануль-2», были введены в промышленную эксплуатацию в 2023 году.

9. На конец 2023 года в 17 странах велось строительство АЭС общей мощностью 61,1 ГВт (эл.) (59 энергоблоков). В течение года началось сооружение шести энергоблоков с реакторами типа



На конец 2023 года

в **17** странах

велось строительство

59 энергоблоков

общей мощностью

61,1 ГВт (эл.)

PWR в Китае и Египте общей мощностью 6,8 ГВт (эл.). В Китае в 2023 году началось сооружение четырех энергоблоков с реакторами CAP1000, включая 4-й блок АЭС «Хайян» (1161 МВт (эл.)), 1-й блок АЭС «Ляньцзян» (1224 МВт (эл.)), 4-й-блок АЭС «Саньмэнь» (1163 МВт (эл.)) и 1-й блок АЭС «Сюйдапу» (1000 МВт (эл.)), а также одного энергоблока с реактором HPR1000 — а именно,

6-го блока АЭС «Луфэн» (1116 МВт (эл.)). В Египте 3 мая началось сооружение 3-го блока АЭС «Эль-Дабаа» (1100 МВт (эл.)) с реактором ВВЭР-1200.

10. Около 67% общемировой мощности действующих реакторов (261,8 ГВт (эл.), 295 энергоблоков) находится в эксплуатации более 30 лет, в то время как более 29% (112,2 ГВт (эл.), 142 энергоблока) находится в эксплуатации более 40 лет и 4% (17,5 ГВт (эл.), 28 энергоблоков) — более 50 лет. Старение парка АЭС подчеркивает необходимость во вводе новых или модернизированных действующих 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.



11. 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. В 2023 году средний коэффициент использования установленной мощности во всем мире составил 87,74%. С 2013 года самые высокие показатели демонстрируют реакторы с кипящей водой (BWR) и с реакторы водой под давлением (PWR), которые имеют средний коэффициент использования установленной мощности 89,3% и 82,7% соответственно.

12. В течение 2023 года были окончательно выведены из эксплуатации 6 ГВт (эл.) ядерных мощностей (5 энергоблоков). 1 февраля в Бельгии был остановлен 2-й блок АЭС «Тяньж» (с реактором PWR, 1008 МВт (эл.)), а 14 марта на Тайване, Китай, был остановлен 2-й блок АЭС «Гошэн» (BWR, 985 МВт (эл.)). Последние три действующих АЭС в Германии — «Эмсланд» (PWR, 1335 МВт (эл.)), «Изар-2» (PWR, 1410 МВт (эл.)) и «Неккарвестхайм-2» (PWR, 1310 МВт(эл.)) — были остановлены 15 апреля, через двенадцать лет после того, как в стране была принята политика поэтапного отказа от атомной энергетики.

Тенденции

13. По состоянию на конец 2023 года мировой опыт эксплуатации АЭС исчислялся 69 годами, на протяжении которых 647 энергоблоков в 35 странах с общей мощностью 497,9 ГВт (эл.) в совокупности проработали 19751 реакторо-год. На протяжении последних десяти лет мощность парка АЭС оставалась на постоянном уровне, при этом с начала 2013 года к сети было подключено дополнительно 69,8 ГВт (эл.) ядерных энергетических мощностей. Более 79% этого прироста мощностей приходится на Азию, где за этот период к сети было подключено в общей сложности 55,4 ГВт (эл.) мощностей (54 энергоблока). Лидирующее положение по темпам роста в этом регионе занимает Китай: с начала 2013 года в его энергосистему было добавлено 40,02 ГВт (эл.) новых мощностей АЭС.

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

Положение дел

14. В настоящее время примерно 50 стран, приступающих к созданию ядерной энергетики, проявляют интерес к включению ее в свою структуру энергопроизводства для поддержания национального социально-экономического развития. Из них 27 стран находятся на разных этапах подготовки и внедрения своей национальной ядерно-энергетической программы.

15. Семнадцать находятся на этапе принятия решения — это страны, которые рассматривают возможность создания ядерной энергетики, не приняв при этом окончательного решения (Алжир, Замбия, Индонезия, Казахстан, Марокко, Монголия, Нигер, Сальвадор, Сенегал, Судан, Таиланд, Тунис, Уганда, Филиппины, Шри-Ланка, Эстония, Эфиопия). Большинство из них уже выполнили предварительные технико-экономические обоснования, которые позволят предоставить лицам, принимающим решения, соответствующую информацию о преимуществах ядерной энергетики, а также о потребностях и условиях успешной реализации ядерно-энергетической программы. Другие страны уже дали старт своим программам и работают над созданием национальных механизмов координации и составлением «дорожных карт» деятельности в рамках программы.

16. Десять находятся на этапе после принятия решения — это страны, которые уже приняли решение и создают необходимую инфраструктуру, либо уже подписали контракт и в ближайшем будущем начнут строительство, а в некоторых случаях уже приступили к строительству. Из этих стран к строительству своей первой атомной электростанции (АЭС) уже приступили Бангладеш, Египет и Турция. Польша определилась с выбором технологии и подписала контракт с поставщиком. Гана, Иордания, Кения, Нигерия, Саудовская Аравия и Узбекистан работают над подготовкой или оценкой тендерных предложений для своих первых АЭС.

27 стран-новичков

17 на этапе принятия решения

Страны, рассматривающие возможность создания ядерной энергетики, но не принявшие окончательного решения



10 на этапе после принятия решения

Страны, уже принявшие решение и создающие инфраструктуру либо уже подписавшие контракт и ведущие подготовку или уже приступившие к строительству



17. В октябре 2023 года и апреле 2023 года было доставлено свежее ядерное топливо для первых энергоблоков на площадки АЭС в Бангладеш и в Турции соответственно, при этом начало коммерческой эксплуатации первых энергоблоков планируется в конце 2024 года в Бангладеш и в начале 2025 года в Турции. В мае 2023 года был залит первый бетон 3-го энергоблока (с реактором ВВЭР-1200) на АЭС «Эль-Дабаа» в Египте. В августе 2023 года Управление ядерного и радиологического регулирования Египта выдало лицензию на строительство 4-го энергоблока АЭС «Эль-Дабаа», продолжается подготовка площадки к строительству. В Польше был завершён выбор технологического решения и поставщика для сооружения к 2042 году энергоблоков с реакторами PWR, которые будут иметь общую установленную мощность 6000–9000 МВт (эл.). Ожидается, что в Саудовской Аравии процедура выбора поставщика технологий для АЭС будет завершена в 2025 году, а первый энергоблок будет введен в эксплуатацию в 2036 году.

18. На конец 2023 года в 17 странах велось строительство АЭС общей мощностью 61,1 ГВт (эл.) (59 энергоблоков), включая 6 энергоблоков общей мощностью 6,7 ГВт (эл.), строительство которых началось в 2023 году. Китай приступил к строительству четырех АЭС с реакторами CAP1000 («Хайян-4», «Ляньцзян-1», «Саньмэнь-4» и «Сюйдапу-1»), а также 6-го блока АЭС «Луфэн» (с реактором HPR1000), общая мощность которых составит 5,7 ГВт (эл.). В Венгрии ведется подготовка к реализации проекта «Пакш-2», предусматривающего строительство двух энергоблоков с реакторами ВВЭР В-527. Заливка первого бетона для 5-го блока АЭС «Пакш» запланирована на конец 2024 года.



РИС. А.1. В ходе двусторонней встречи на полях 67-й очередной сессии Генеральной конференции в Вене 25 сентября 2023 года Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси встретился с почетным министром Йеафешем Османом из министерства науки и технологий Бангладеш (источник: МАГАТЭ).

19. Иордания планирует опубликовать приглашение к участию в тендере на реализацию проекта ММР для производства электроэнергии и опреснения морской воды в 2026 году. Гана расширила свой выбор технологий реакторов для ММР и в настоящее время рассматривает предложения от пяти потенциальных поставщиков для выполнения проекта по созданию установки мощностью порядка 1000 МВт (эл.). Ввод в эксплуатацию запланирован на 2029 год. Кения объявила, что рассматривает вопрос о сооружении исследовательского реактора, а также ММР наряду с крупномасштабными 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.

20. Эстония рассматривает для своей ядерно-энергетической программы только технологию ММР. Миссия установила, что в стране была проведена комплексная оценка потребностей в инфраструктуре ядерной энергетики, которая позволит правительству принять решение о начале осуществления ядерно-энергетической программы. В ходе миссии МАГАТЭ посетило информационный зал компании «Ферми энергия» в Кунде, который был создан для ознакомления местного населения с одной из потенциальных площадок (рис. А.2). Решение правительства о том, стоит ли продолжать реализацию программы, ожидается в 2024 году.



РИС. А.2. Зал общественной информации компании «Ферми энергия» в Кунде, Эстония, который используется для информирования общественности о возможностях использования ядерной энергии (источник: МАГАТЭ).

21. Казахстан выбрал площадку для строительства своей первой АЭС и объявил, что в 2024 году проведет референдум, чтобы решить, стоит ли приступать к ее строительству. В марте 2023 года Казахстан также принял у себя повторную миссию МАГАТЭ по комплексной оценке ядерной инфраструктуры (ИНИР) этапа 1.

Тенденции

22. К 2035 году число стран, эксплуатирующих АЭС, может увеличиться примерно на 30%: к нынешней 31 стране могут присоединиться 10–12 стран-новичков. Для столь значительного роста требуется повышение готовности инфраструктуры этих стран при поддержке Агентства, что позволит обеспечить ответственную реализацию ядерно-энергетической программы. Кроме того, принятие решений или реализация проектов по строительству новых АЭС полным ходом идет во многих странах, расширяющих свои ядерно-энергетические программы, в числе которых Аргентина, Армения, Болгария, Венгрия, Исламская Республика Иран, Пакистан, Румыния, Словакия и Чешская Республика. Ядерная отрасль нескольких государств-членов также поддерживает возрождающийся интерес к ядерной энергетике во всем мире и создает дополнительные мощности для производства новых компонентов.

23. 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 ряд стран 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.

24. В то же время государства-члены, приступающие к развитию ядерно-энергетических программ на основе АЭС эволюционной конструкции, по-прежнему проявляют интерес к технологиям АЭС большой мощности.

25. Независимо от того, будет ядерно-энергетическая программа основана на АЭС большой мощности или ММР, в любом случае необходима соответствующая национальная инфраструктура ядерной энергетики, учитывающая аспекты ядерной безопасности, физической безопасности и гарантий, и ее развитие должно осуществляться надлежащим образом. Государства-члены по-прежнему сообщают о своих планах использовать типовые проекты, уже находящиеся в эксплуатации, и воспользоваться опытом, накопленным регулирующими органами и операторами в стране происхождения.

А.4. Развитие ядерно-энергетических технологий

Положение дел

26. Глобальный интерес к развитию ядерных энергетических технологий обусловлен необходимостью ускоренного внедрения усовершенствованных реакторов, включая ММР. Этот тренд выходит за рамки технологий электрогенерации и охватывает неэлектрические применения, такие как централизованное теплоснабжение, производство водорода и опреснение. Отмечается растущий интерес со стороны нетрадиционных заинтересованных сторон к использованию возможностей ядерной энергетики для декарбонизации энергоемких промышленных производств. Наглядным подтверждением того, что ядерные технологии динамично эволюционируют, является освоение инновационных областей их применения, в том числе создание плавучих АЭС для когенерации, микрореакторов для снабжения отдаленных районов и ядерных установок, предназначенных для работы в космическом пространстве. Набирают популярность проекты усовершенствованных реакторов, в основе которых лежит их способность обеспечивать гибкие режимы работы энергосистем на фоне увеличения доли возобновляемых источников энергии с переменным характером генерации. Кроме того, ядерная отрасль внедряет искусственный интеллект (ИИ), особенно методы машинного обучения и глубокого обучения, чтобы произвести революцию в используемых для эксплуатации и технического обслуживания системах, наделив их мощными вычислительными возможностями и инструментами анализа данных.

27. Развитие ядерных энергетических технологий идет с особым упором на разработку усовершенствованных реакторов и расширение областей их практического применения. Благодаря постоянным исследованиям и инновациям ядерная энергетика начинает играть первостепенную роль не только в удовлетворении глобальных энергетических потребностей, но и в снижении выбросов углекислого газа. Примером стратегического подхода, направленного на максимальное использование разнообразных преимуществ, которые могут принести с собой ядерные технологии для усиления тех или иных сторон энергетики в глобальном масштабе, являются попытки интегрировать ядерные генерирующие мощности в области, не связанные с производством электроэнергии. Благодаря этому стратегическому вектору развития ядерная

энергетика становится важной движущей силой для формирования энергетической парадигмы будущего на основе принципов устойчивости и минимизации выбросов углекислого газа.

Тенденции

28. Доминирующей технологией, используемой на АЭС во всем мире, были и остаются водоохлаждаемые реакторы (WCR). Современные тенденции в этой области заключаются в совершенствовании функций безопасности WCR, таких как пассивные системы охлаждения для повышения общей надежности системы, а также в разработке топлива с улучшенной конструкцией для повышения эффективности сжигания топлива и сокращения отходов.

29. В силу своих компактных размеров и возможности развертывания в удаленных районах или регионах с ограниченной электросетевой инфраструктурой, предметом серьезного рассмотрения во всем мире по-прежнему являются ММР. Текущий вектор развития ММР направлен на улучшение их экономических показателей, безопасности и масштабируемости.

30. Современные тенденции в развитии технологий реакторов на быстрых нейтронах ставят своей целью совершенствование средств безопасности за счет внедрения пассивных систем останова и отработки вариантов применения различных теплоносителей, особенно в контексте реакторов инновационной конструкции. Кроме того, особое внимание уделяется улучшению экономических показателей реакторов на быстрых нейтронах в целях снижения затрат на строительство и повышения эффективности сжигания топлива.

31. Растет интерес к возможностям использования тепловой энергии, полученной на атомных электростанциях, например, для снабжения опреснительных установок, что позволит решить проблему нехватки воды во многих регионах; для производства водорода методом высокотемпературного электролиза; а также для использования в отраслях, потребляющих высокотемпературное тепло, в частности, в химической и обрабатывающей промышленности.

A.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы

Положение дел

32. Среди всех действующих в мире коммерческих АЭС доля реакторов типа WCR составляет более 95%. Имеющие долгую и успешную историю эксплуатации реакторы типа WCR вносят существенный вклад в удовлетворение мировых энергетических потребностей. Благодаря своей надежности и эффективности они широко используются для производства электроэнергии. Ядерная отрасль постоянно развивается, при этом продолжаются исследования и разработки (НИОКР) в области создания усовершенствованных конструкций, повышения безопасности и внедрения альтернативных технологий, таких как гибридные энергетические системы (возобновляемые источники энергии в сочетании с ядерными источниками), чтобы удовлетворить растущий спрос на энергию и решить проблемы, связанные с изменением климата. Движущей силой для совершенствования передовых технологий WCR служат достижения в области материаловедения, вычислительного моделирования и разработки систем безопасности. К ним относятся пассивные средства и системы безопасности, улучшенные технологии изготовления топлива, более эффективные методы охлаждения, меры по сокращению радиоактивных отходов и обеспечению большей устойчивости с точки зрения распространения. Например, в нескольких странах уже эксплуатируются и/или строятся реакторы PWR усовершенствованной конструкции, в том числе AP1000, APR1400, EPR, HPR1000 и ВВЭР-1200. В феврале 2023 года на площадке АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах началась коммерческая эксплуатация третьего энергоблока с реактором APR1400. В июле 2023 года в Соединенных Штатах Америки началась коммерческая

эксплуатация реактора AP1000 на третьем энергоблоке АЭС «Вогтль». В ноябре 2023 года введен в промышленную эксплуатацию энергоблок № 2 Белорусской АЭС. В Российской Федерации разрабатывается реактор типа ВВЭР-С со спектральным регулированием. В настоящий момент многими странами предпринимаются шаги по дальнейшей разработке концептуальных проектов сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (SCWR), включая как поиск путей уменьшения конструкции для различных сценариев применения, так и оптимизацию SCWR для эффективной работы в режимах со смешанным спектром нейтронов. На национальном уровне продолжают тематические исследования по техническому и экономическому анализу перспектив гибридных энергосистем, сочетающих в себе ядерные и возобновляемые источники энергии — прежде всего, речь идет об использовании энергии солнца и ветра, что обуславливает переменный характер электрогенерации, в связи с усовершенствованными АЭС — чтобы обеспечить работу в режиме базовой нагрузки, повысить стабильность энергосистемы и направить вырабатываемое на АЭС тепло на нужды неэлектрических применений.



Рис. А.3. Блок № 3 электростанции «Вогтль», штат Джорджия, США, после завершения строительства (источник: компания «Саузерн ньюклар»).

Тенденции

33. В 17 государствах-членах ведется сооружение 55 энергоблоков с реакторами WCR, из которых 50 представляют собой усовершенствованные PWR эволюционной конструкции, такие как ACP (1), AP1000 (1), APR1400 (3), CAP100 (6), CAREM (1), EPR (3), HPR1000 (11), PRE KONVOI (1) и различные варианты ВВЭР (23); два являются усовершенствованными кипящими реакторами и три — корпусными тяжеловодными реакторами (PHWR). Эти конструкции реакторов отличаются улучшенными характеристиками безопасности в условиях тяжелых аварий и более высокими показателями эффективности использования топлива. Мощность этих реакторных установок составляет от порядка 25 МВт (эл.) до 1630 МВт (эл.) на энергоблок. Большинство из них расположены на одной площадке вместе с другими реакторами.

34. Учитывая проблемы, связанные с изменением климата, и растущие потребности в энергии, многие страны с действующими атомными электростанциями работают над продлением срока их эксплуатации, который изначально рассчитывался на 40 лет, до максимально возможного, обращая особое внимание на возможности модернизации станций и усовершенствования основных компонентов и оборудования.

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

Положение дел

35. На конец 2023 года в эксплуатации находились две демонстрационные электростанции с ММР. В Российской Федерации впервые была выполнена перегрузка топлива на плавучей АЭС «Академик Ломоносов» с двумя реакторами КЛТ-40С мощностью 35 МВт (эл.) каждый. Плавучая АЭС находится в коммерческой эксплуатации с мая 2020 года, обеспечивая теплом и электроэнергией город Певек в Чукотском автономном округе. В Китае 6 декабря 2023 года на площадке в заливе Шидао началась коммерческая эксплуатация демонстрационного высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами, который на полной мощности обеспечивает выработку 200 МВт (эл.) от двух модулей. В 2023 году на разных стадиях строительства находились три электростанции с ММР. В Аргентине в рамках проекта сооружения реактора CAREM-25 в качестве нового срока подключения к электросети определен 2028 год. В Чанцзяне, провинция Хайнань, Китай, с июля 2021 года ведется сооружение демонстрационной установки с реактором АСП100. Монтаж активной зоны реактора был завершён в августе 2023 года. Планируется, что эта многоцелевая установка с реактором PWR, получившим название «Линлун-один», к 2027 году будет вырабатывать 125 МВт (эл.). Получена лицензия на площадку АЭС с реактором проекта «РИТМ-200Н» в Усть-Янском районе Якутии, Российская Федерация, который, как ожидается, к 2028 году будет вырабатывать 55 МВт (эл.). Началось изготовление кованых заготовок различной конфигурации для реакторов «РИТМ-200С» — к 2027 году плавучая АЭС с таким реактором будет построена на Чукотке, Российская Федерация.

Разработка и лицензирование проектов для развертывания в ближайшем будущем

36. В Канаде на площадке АЭС «Дарлингтон» в 2025 году планируется начать сооружение реактора BWRX-300 с естественной циркуляцией, а его подключение к электросети планируется в конце 2028 года. Для автономного применения на площадке Чок-Ривер в провинции Онтарио предназначен проект микромодульного реактора (ММР). Продолжается рассмотрение проектной документации поставщика по проекту реактора ARC-100, а также изучаются основания для выдачи лицензии на подготовку площадки. Первый энергоблок с реактором ARC-100 будет расположен на площадке АЭС «Пойнт-Лепро» в провинции Нью-Брансуик.

37. В Китае на площадке в заливе Шидао, провинция Шаньдун, 6 декабря 2023 года была введена в промышленную эксплуатацию первая в мире атомная электростанция с демонстрационным модульным реактором HTR-PM (модульный высокотемпературный газоохлаждаемый реактор с шаровыми твэлами). Проект демонстрационного реактора HTR-PM является результатом совместных усилий Университета Цинхуа, который отвечает за НИОКР и проектирование основных компонентов и систем и обеспечивает техническое руководство проектом, корпорации «Чайна хуаньэн групп», выступающей в качестве владельца и оператора станции, и Национальной ядерной корпорации Китая (CNNC), являющейся подрядчиком в части проектирования, материально-технического обеспечения и строительства и производителем топлива.



РИС. А.4. Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси во время посещения демонстрационного модульного реактора HTR-PM (модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с шаровыми твэлами) в заливе Шидао, провинция Шаньдун, Китай (источник: УАЭК).

38. Во Франции компания ЭДФ учредила 100% дочернюю компанию для реализации проекта NUWARD, предусматривающего сооружение двух энергоблоков с реакторами PWR общей мощностью 340 МВт (эл.). Между тем, стимулы для активизации деятельности по созданию усовершенствованных модульных реакторов обеспечивает конкурс проектов «Франс 2030». В 2023 году было отобрано восемь проектов ММР. В их основу положены некоторые технологии реакторов поколения IV, включая такие концепции, как быстрый реактор с натриевым теплоносителем (SFR), быстрый реактор со свинцовым теплоносителем (LFR), реактор на солевых расплавах и высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (HTGR). В Европе три регулирующих органа из Чешской Республики, Финляндии и Франции опубликовали свой отчет о первом этапе совместного предварительного рассмотрения французского проекта ММР NUWARD; ко второму этапу рассмотрения намерены присоединиться еще три регулирующих органа из Королевства Нидерландов, Польши и Швеции.

39. В Италии в сентябре 2023 года Министерство окружающей среды и энергетической безопасности запустило Национальную платформу устойчивой ядерной энергетики, перед которой стоит задача объединить заинтересованные стороны итальянской ядерной отрасли для разработки предварительного технико-экономического обоснования возможности внедрения в стране ядерной энергетики, используя в качестве референтных технологий ММР, усовершенствованные модульные реакторы и микрореакторы.

40. В Японии на рассмотрении находятся более десяти проектов ММР, разработанных организациями из частного сектора. В Японском агентстве по атомной энергии введен в работу высокотемпературный реактор для технических испытаний (HTTR), который имеет тепловую мощность 30 МВт и используется для демонстрационного проекта по производству водорода.

41. В Республике Корея ведется работа над двумя наиболее заметными проектами ММР. Первый из них, под названием SMART, представляет собой реактор типа PWR, который способен вырабатывать 100 МВт (эл.). Было объявлено о новом партнерстве с Канадой, при этом будет подана заявка на получение лицензии для возможного развертывания реактора SMART на базе Чок-Риверских лабораторий в Канаде. Второй проект, получивший название Innovative-SMR, представляет собой интегральный реактор типа PWR, который разрабатывается национальным консорциумом и рассчитан на мощность 170 МВт (эл.).

42. В Российской Федерации ведется разработка не менее 20 проектов ММР на основе различных технологий, которые предназначены для АЭС как наземного, так и морского базирования и могут использоваться для выработки электроэнергии и когенерации. Подписано соглашение о строительстве одного блока АЭС с 10-мегаваттной реакторной установкой ШЕЛЬФ-М для энергоснабжения месторождения «Совиное». В 2024 году в Якутии начнется строительство АЭС с реактором РИТМ-200Н, который представляет собой ММР с водяным охлаждением. Для замены устаревших реакторов ВВЭР-440 на площадке Кольской АЭС разрабатываются два проекта водоохлаждаемых реакторов для электростанций средней мощности — ВВЭР-600 и ВВЭР-С-600. В проекте ВВЭР-С-600 предусмотрено регулирование спектра нейтронов для компенсации выгорания топлива, что позволяет работать по принципу замкнутого ядерного топливного цикла.

43. В Соединенном Королевстве для дальнейшего рассмотрения были отобраны пять проектов ММР и усовершенствованных модульных реакторов, заключение соответствующих контрактов планируется летом 2024 года. В число этих проектов входят NUWARD, BWRX-300, ARC-100, VOYGR и AP300. Началась процедура рассмотрения регулирующим органом проекта ММР разработки компании «Роллс-Ройс» мощностью 470 МВт (эл.) на основе стандартизированных модулей PWR с петлевой компоновкой.

44. В Соединенных Штатах Америки разрабатывается множество проектов ММР. Для целей лицензирования и опытной эксплуатации установки VOYGR компании «Ньюскейл пауэр», которая может включать 6 модулей, генерирующих 77 МВт (эл.) каждый, вместо площадки в Айдахо-Фолс рассматриваются другие потенциальные пользователи в США и Европе, в том числе в Румынии. Два проекта на базе технологий реакторов поколения IV — это Natrium, разрабатываемый компанией «Террапауэр» реактор типа SFR, и Xe-100 на базе технологии HTGR. К числу других передовых разработок относятся высокотемпературный реактор с расплавом фтористых солей компании «Кайрос пауэр», микрореактор eVinci и реактор SMR-160 компании «Хольтек интернешнл». Кроме того, ведутся работы по проекту «Применение, исследование, валидация и оценка микрореакторов» (MARVEL).

Тенденции

45. На протяжении 2023 года возростал интерес со стороны государств-членов к плавучим АЭС и микрореакторам, а также к сценариям их применения. Предприятия отрасли и регулирующие органы прилагают существенные усилия для содействия разработке соответствующих проектов и скорейшему внедрению таких реакторов. Перспективы раннего внедрения технологий более высокого уровня зрелости или готовности просматриваются примерно в горизонте 2030 года. В 2023 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 20 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. К числу технологий, применяемых в области микрореакторов, относятся технологии

высокотемпературных реакторов, реакторов на быстрых нейтронах и реакторов с теплоотводящими трубами.



РИС. А.5. Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси на открытии Международного симпозиума «Развертывание плавучих атомных электростанций — преимущества и проблемы», состоявшегося в Центральном учреждении Агентства в Вене в ноябре 2023 года (источник: МАГАТЭ).

46. В настоящее время все больше стран занимаются разработкой проектов ММР морского базирования, которые могут применяться в качестве плавучих АЭС для снабжения находящихся на берегу и в море объектов. Стартап, занимающийся проектированием реакторов в Дании, разрабатывает компактный жидкосолевой реактор, способный выдавать мощность 100 МВт (эл.). В Республике Корея продолжается разработка плавучего энергоблока BANDI-60 на основе реактора типа PWR, имеющего электрическую мощность 60 МВт (эл.). В Российской Федерации получено одобрение проекта «РИТМ-200М» для будущих плавучих АЭС. Плавучие АЭС с реакторами типа ММР 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. В настоящее время анализируются и оцениваются правовые, нормативные и институциональные аспекты этих концепций транспортируемых ММР, что позволит проложить путь к их внедрению.

47. С учетом этого быстро развивающегося сценария деятельность Агентства в области ММР координируется в рамках Платформы МАГАТЭ по малым модульным реакторам и их применениям, которая была запущена Генеральным директором в 2021 году и выполняет функцию координационного центра для государств-членов и других заинтересованных сторон, запрашивающих по официальным каналам помощь по общим вопросам, связанным с ММР и их применениями, а также предоставляет МАГАТЭ инструментарий для реагирования на эти запросы. Среди основных направлений совместной работы в 2023 году, которые стали возможны

благодаря этой платформе, стоит отметить экспертную миссию по рассмотрению технико-экономического обоснования проекта опреснительной станции на базе ММП в Иордании и международный симпозиум по плавучим атомным электростанциям.

А.4.3. Реакторы на быстрых нейтронах

Положение дел

48. По состоянию на декабрь 2023 года в трех государствах-членах находились в эксплуатации пять реакторов типа SFR, в том числе три в Российской Федерации, один в Китае и один в Индии. В 2023 году российский реактор БН-800 был переведен на полную загрузку смешанным оксидным топливом, что знаменует собой первый этап замыкания ядерного топливного цикла. В настоящее время в Индии вводится в эксплуатацию прототип быстрого реактора-размножителя — экспериментальный реактор SFR промышленного класса мощностью 500 МВт (эл.). Предполагается, что эта установка будет подключена к энергосети в 2024 году. В Китае ведется строительство двух идентичных демонстрационных реакторных установок CFR-600, причем первая из них уже введена в эксплуатацию. В 2026 году после завершения ремонтных работ будет перезапущен экспериментальный реактор на быстрых нейтронах Жоуо. Все большее внимание привлекает технология теплоносителя на основе тяжелых жидких металлов, особенно применительно к проектам ММП на быстрых нейтронах. В Российской Федерации строится реактор БРЕСТ-ОД-300 — демонстрационный реактор типа LFR, обеспечивающий мощность 300 МВт (эл.), в то же время несколько проектов LFR находятся в разработке в Китае, Соединенном Королевстве и Соединенных Штатах Америки, а также в Европейском союзе. 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. Две других концепции — жидкосолевой реактор и сверхкритический водоохлаждаемый реактор — предусматривают использование либо быстрого, либо промежуточного спектра нейтронов.



Рис. А.6. Топливная компания ТВЭЛ отправляет топливо в Китай для загрузки активной зоны первого реактора на быстрых нейтронах CFR-600 (источник: компания «ТВЭЛ»).

Тенденции

49. В среднесрочном горизонте внедрения систем на быстрых нейтронах в качестве основного варианта рассматривается технология SFR. В дополнение к трем действующим в стране реакторам типа SFR, Российская Федерация разрабатывает реактор большой мощности БН-1200, рассчитанный на 1200 МВт (эл.), а также ведет сооружение многоцелевого быстрого исследовательского реактора (МБИР). Китай работает над созданием реактора четвертого поколения CFR-1000 мощностью 1 ГВт (эл.). Базирующаяся в Соединенных Штатах Америки компания «Террапауэр» разрабатывает Sodium, быстрый реактор с натриевым теплоносителем, рассчитанный для работы в связке с жидкосолевым накопителем энергии. Эта передовая установка способна достигать пиковой мощности 500 МВт (эл.), благодаря чему она потенциально может заменить собой обычную угольную электростанцию, а также может использоваться вместе с другими возобновляемыми источниками энергии. Еще один разрабатываемый в США проект SFR — универсальный испытательный реактор — ожидает одобрения Конгрессом США. Во Франции из числа 15 проектов, поступивших на конкурс проектов «Франс 2030», для разработки реакторов на быстрых нейтронах типа ММР в 2023 году было отобрано семь компаний. Кроме того, в 2023 году были начаты два дополнительных проекта по разработке ММР на быстрых нейтронах. В то время как наиболее зрелой технологией остаются SFR, несколько стран проектируют и сооружают реакторы типа LFR, такие как реакторная установка БРЕСТ-300, которая в настоящее время строится в Российской Федерации и, как ожидается, будет введена в эксплуатацию в 2028 году. Кроме того, в настоящее время ведется работа над совместным проектом Соединенного Королевства и Соединенных Штатов Америки по созданию реактора LFR мощностью 450 МВт (эл.), разработанного компанией «Вестингауз», над совместным проектом Италии и Румынии по созданию европейского демонстрационного быстрого реактора со свинцовым теплоносителем мощностью 120 МВт (эл.), а также над несколькими проектами LFR в Китае и Франции, относящимися к категории ММР. С участием компаний-стартапов ведется разработка реакторной установки SEALER мощностью 55 МВт (эл.) в Швеции, а также реакторов LFR-AS-30 (30 МВт (эл.)) во Франции и LFR-AS-200 (200 МВт (эл.)) в Великобритании, в то время как в Италии проводятся соответствующие НИОКР. Помимо этого, на стадии разработки в Европейском союзе и Соединенных Штатах Америки находятся другие технологии реакторов со спектром быстрых нейтронов, такие как газоохлаждаемые быстрые реакторы и быстрые реакторы на солевых расплавах.

А.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики

Положение дел

50. Использование ядерной энергии для неэлектрических применений, включая централизованное теплоснабжение, опреснение и прямое обеспечение теплом различных промышленных процессов — это проверенная технология, и в настоящее время в нескольких государствах-членах в этих целях эксплуатируется около 70 реакторов, а многие другие государства-члены проявляют к этой области все больший интерес.

51. В 2023 году 45 ядерных энергетических реакторов в 10 государствах-членах выработали 2046,0 ГВт·ч электрического эквивалента тепла для неэлектрических применений. Большая часть этого тепла (88%) использовалась для централизованного теплоснабжения в России, Китае, Словакии, Чешской Республике, Швейцарии, Румынии, Венгрии и Болгарии, на эти цели было затрачено 1799,1 ГВт·ч энергии. Количество энергии, потребовавшееся для нужд промышленного теплоснабжения в Индии и Швейцарии, составило 211,8 ГВт·ч (10%), в то время как 35,1 ГВт·ч (2%) было использовано для опреснения воды.

52. Недавно Китай приступил к реализации масштабной программы по развитию охватывающих крупные районы сетей централизованного теплоснабжения на основе АЭС, присоединившись тем самым к группе уже существующих пользователей этой технологии, в которую входят Болгария, Венгрия, Российская Федерация, Румыния, Словакия, Украина, Чешская Республика и Швейцария. После того как в 2021 году в Китае был запущен демонстрационный проект по централизованному теплоснабжению на основе АЭС «Циньшань» в провинции Чжэцзян, в 2022 году началась реализация аналогичного проекта на основе АЭС «Хуньяньхэ». Кроме того, другие страны, которые уже имеют обширные сети централизованного теплоснабжения, в частности Финляндия и Польша, рассматривают возможность использования получаемого на АЭС тепла для перевода этих сетей на работу от источников энергии с нулевым уровнем выбросов.

53. На фоне стремительно растущего рынка опреснения морской воды все больший интерес у государств-членов вызывают технологии опреснения с использованием АЭС, позволяющие обеспечить необходимый доступ к чистой воде для растущего населения земного шара. Индия планирует существенно расширить свои мощности по опреснению морской воды с использованием АЭС, а также развернуть в Калпаккаме две установки многоступенчатой пленочной дистилляции, которые смогут перерабатывать 1000 кубических метров воды в сутки, нагревая ее с помощью тепла от АЭС. В других странах (Соединенных Штатах Америки и Японии) вырабатываемая на АЭС электроэнергия используется для питания установок обратного осмоса — еще одной технологии опреснения, — в то время как Казахстан и Пакистан имеют опыт эксплуатации термоопреснительных установок, использующих пар от ядерного реактора, а Китай планирует сооружение установок обратного осмоса, получающих электроэнергию от АЭС.

54. Несколько государств-членов проявляют интерес к технологиям производства водорода с использованием ядерной энергии, в том числе Великобритания, Канада, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, Соединенные Штаты Америки, Швеция, Франция и Япония. В США в 2023 году на АЭС «Найн-Майл-Пойнт» началось производство водорода с использованием метода низкотемпературного электролиза, что повторяет опыт АЭС «Оскархамн» в Швеции, коммерческое производство водорода на базе которой началось в 2022 году. Кроме того, как в Соединенном Королевстве (АЭС «Хейшем»), так и в Соединенных Штатах Америки (АЭС «Прейри-Айленд») на стадии разработки находятся проекты по подключению существующих АЭС к высокотемпературным электролизерам, что позволит использовать отбираемый из второго контура реакторов пар для повышения эффективности производства водорода. В Российской Федерации концерн «Росэнергоатом» проводит оценку воздействия на окружающую среду проекта по строительству на Кольской АЭС стендового испытательного комплекса по производству водорода. В разработке находятся также несколько других проектов, предусматривающих сопряжение ядерных реакторов с низкотемпературными электролизерами, в том числе в Российской Федерации, Франции и Соединенных Штатах Америки.



РИС. А.7. В 2023 году начато коммерческое производство водорода в Центре чистой энергии на базе АЭС «Найн-Майл-Пойнт» (источник: компания «Констеллейшн энерджи»).

Тенденции

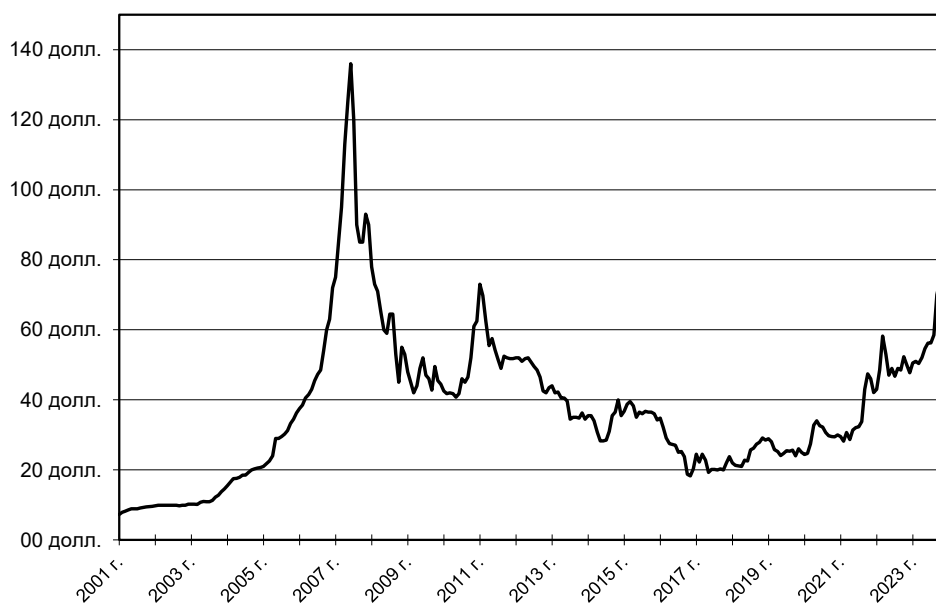
55. Ядерная энергетика отличается от других различных технологий низкоуглеродной генерации своей способностью вырабатывать как тепловую, так и электрическую энергию в круглосуточном режиме, в требуемых масштабах, без географических ограничений, а также имеет высокую надежность и возможность регулирования мощности в зависимости от потребления. Это уникальное сочетание преимуществ вызывает повышенный интерес к потенциалу ядерной энергетике по снижению выбросов не только в рамках электроэнергетического сектора, но и других потребляющих энергию секторов, на которые, учитывая их зависимость от использования ископаемого топлива, приходится большая часть выбросов углекислого газа во всем мире. К числу таких секторов относится централизованное отопление, транспорт и различные промышленные области, в том числе цементное производство, переработка нефти и газа, выплавка чугуна, производство удобрений и широкого спектра других химикатов. Ядерная энергетика может стать поставщиком безуглеродной электроэнергии всюду, где электрификация имеет практический смысл, обеспечить прямое снабжение безуглеродным теплом как альтернативу сжиганию ископаемого топлива, а также выступить в качестве источника безуглеродной энергии для производства водорода, что все чаще рассматривается государствами-членами как ключевой фактор, способствующий переходу к экономике с низким уровнем выбросов. Привлекательность таких прикладных направлений использования ядерной энергии растет на фоне того, что во многих регионах достигнут исторический максимум цен на ископаемое топливо, во всем мире множатся опасения по поводу надежности поставок энергии, а государства-члены активизируют свои усилия по борьбе с изменением климата.

В. Ядерный топливный цикл

В.1. Начальная стадия топливного цикла

Текущее состояние

56. По состоянию на 30 октября 2023 года спотовая цена на уран (U) составляла 74,00 долл. США за фунт U_3O_8 (192,38 долл. США за кг U), что является рекордно высоким показателем за последние 16 лет. Это резкое изменение по сравнению с относительно ровными рыночными ценами 2016–2021 годов, находившимися на уровне примерно 20–30 долл. США за фунт U_3O_8 (52–78 долл. США за кг U), означает, что цены выросли примерно на 200%.

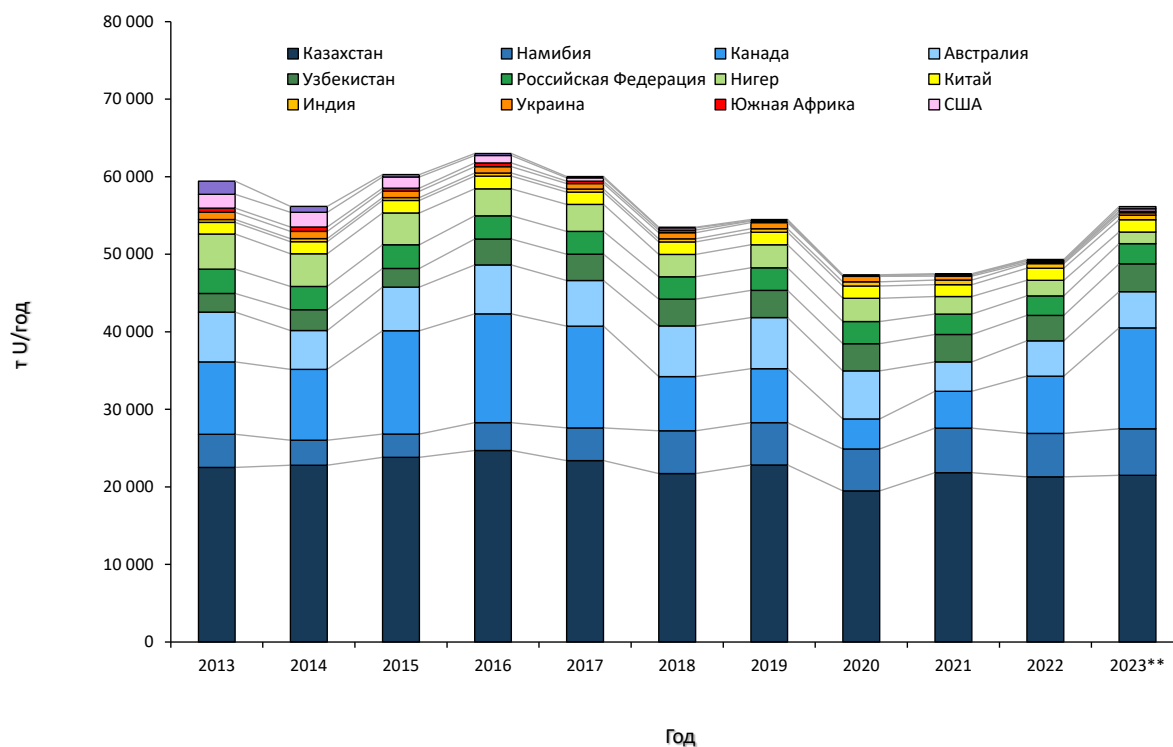


*Рис. В.1. Динамика спотовых цен на уран в 2001–2023 годах
(на октябрь 2023 года; источник данных: UxC).*

57. В совместной публикации Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР) и МАГАТЭ «Uranium 2022: Resources, Production and Demand» («Уран 2022: ресурсы, производство и спрос») (Красная книга 2022 года), охватывающей 2019 и 2020 годы, сообщается, что объем мировой добычи урана на рудниках сократился на 13% — с 54 478 тонн урана (т U) до 47 342 т U. В последние годы крупнейшие страны-производители, включая Казахстан и Канаду, ограничили общий объем производства в ответ на устойчивый спад на урановом рынке в период с начала до середины 2021 года. Кроме того, темпы сокращения производства урана неожиданно ускорились вследствие глобальной пандемии COVID-19 в 2020–2021 годах.

58. В Красной книге 2022 года указывается, что по состоянию на 1 января 2021 года общая производственная мощность простаивающих рудников составляла дополнительно 29 410 т U в год, а также имелось еще как минимум 335 000 тонн подземных извлекаемых запасов урана. Эти предприятия, имеющие все необходимые лицензии, разрешения и согласования для работы и производившие продукцию в промышленных масштабах в прошлом, могут быть потенциально возвращены в строй за относительно короткий срок (в течение одного-двух лет). Вместе с тем предварительные данные Красной книги 2024 года указывают на то, что объемы производства

урана несколько восстановились, увеличившись до 47 504 т U в 2021 году, 49 336 т U в 2022 году и 56 143 т U в 2023 году, что соответствует среднему показателю за десятилетие, предшествовавшее пандемии COVID-19. По оценкам, в 2023 году четыре страны с наивысшим годовым объемом производства урана — Австралия, Казахстан, Канада и Намибия — увеличат производство примерно на 2%, 76%, 1% и 7% соответственно по сравнению с уровнями производства 2022 года.



* «Прочие» означает остальных мелких производителей.

** Оценка АЯЭ/ОЭСР-МАГАТЭ.

РИС. В.2. Динамика мирового производства урана, 2013–2023 годы.

59. Общемирового объема выявленных извлекаемых традиционных запасов урана (т.е. тех, о которых можно с достаточной степенью уверенности сказать, что они существуют в обычно разрабатываемых типах геологических месторождений) достаточно для поддержания роста ядерных генерирующих мощностей в краткосрочной и среднесрочной перспективе. В Красной книге 2022 года указывается, что более 6 миллионов тонн выявленных запасов урана могут быть добыты по сегодняшним рыночным ценам, чего, исходя из потребностей мирового парка реакторов в уране в 2020 году в 60 114 т U, будет достаточно более чем на 100 лет.

60. Так исторически сложилось, что дефицит поставок первичного урана восполнялся за счет поставок вторичного. Однако этот показатель снижается и, согласно прогнозам, продолжит сокращаться до 2040 года. Благодаря недавней стабилизации и росту спотовых цен на урановом рынке отрасль производства урана оживилась и несколько первичных производителей возобновили работу своих предприятий, которые простаивали и были законсервированы из-за длительного периода низких спотовых цен на уран. Эти предприятия включают в себя рудник Ханимум в Австралии, рудник МакАртур Ривер и обогатительную фабрику Ки-Лейк в Канаде, рудник Смит-Рэнч-Хайленд в Соединенных Штатах Америки, которые возобновили производство в период с 2022 по 2024 годы, а также рудник Лангер-Хайнрих в Намибии, который планируется вернуть в строй в 2025 году.

61. По данным Красной книги 2022 года, общемировые расходы на разведку и разработку месторождений в 2021 году несколько увеличились — достигнув почти 280 млн долл. США, что на 10% превышает цифры 2020 года. До этого в период с 2014 по 2020 год было зафиксировано снижение в размере 1,88 млрд долл. США. Предварительные данные Красной книги 2024 года показывают, что в 2022 и 2023 годах можно ожидать дальнейшего существенного роста этих расходов. Например, компания «НексДжен энерджи» объявила о расширении программы геологоразведочных работ в 2023 году вблизи месторождения Эрроу в бассейне реки Атабаска в Канаде.

62. Рынок производства топлива традиционно характеризовался интенсивной конкуренцией между производителями и поставщиками топлива. В настоящее время мощности по производству топлива превышают потребности как на глобальном, так и на региональном уровне.

63. Производство ядерного топлива — это отработанная технология, которая с течением времени непрерывно совершенствуется благодаря автоматизации и цифровизации производственного процесса, сокращению объема эксплуатационных отходов и улучшению радиационной защиты работников. Параллельно с этим во многих странах ведется работа по улучшению как экономических параметров ядерных реакторов за счет увеличения глубины выгорания топлива и продолжительности топливного цикла, так и эксплуатационной надежности ядерного топлива за счет уменьшения числа случаев повреждения топлива.

64. Некоторые государства-члены намерены расширить использование переработанного уранового и уран-плутониевого топлива в легководных реакторах (LWR), чтобы оптимизировать использование расщепляющегося материала природного происхождения. Ряд государств-членов, включая Индию, Российскую Федерацию, Францию и Японию, намерены использовать смешанное уран-плутониевое топливо в быстрых реакторах. Некоторые государства-члены, эксплуатирующие PHWR, начали заменять активную зону, сформированную из природного урана, на активную зону, заполненную незначительно обогащенным ураном, чтобы повысить конкурентоспособность своих реакторов.

65. В настоящее время ряд государств-членов, включая Бельгию, Испанию, Канаду, Китай, Республику Корея, Российскую Федерацию, Соединенные Штаты Америки, Францию и Японию, реализуют программы исследований, разработок и демонстраций в интересах внедрения на современных реакторах толерантного топлива (АТФ), занимаясь изготовлением, облучением и послереакторным исследованием опытно-испытательных стержней и сборок, оценкой характеристик топлива, изучением термогидравлики системы, а также разработкой и валидацией кодов для условий тяжелой аварии. В АТФ используются новые материалы, и некоторые из его конструкций призваны обеспечить более длительную и эффективную работу реакторов за счет увеличения времени между остановами для перегрузки топлива до двух лет и улучшения тем самым экономических показателей АЭС. Некоторые государства-члены разрабатывают передовые технологии производства, такие как аддитивное производство (например, на трехмерных принтерах) или использование искусственного интеллекта и полностью автоматизированных процессов изготовления топлива, чтобы вывести на рынок инновационное и легированное топливо.

66. В некоторых проектах ММР будет использоваться топливо обычной конструкции (аналогичной конструкциям низкообогащенного топлива, обычно используемым в реакторах большой мощности). Другие разработчики ММР выбирают более инновационные конструкции топлива, например, на основе ВНОУ, чтобы получить преимущества, превосходящие те, которые достижимы при использовании топлива обычной конструкции. Ведутся НИОКР по урандиоксидному и смешанному оксидному уран-плутониевому топливу и АТФ для ММР с

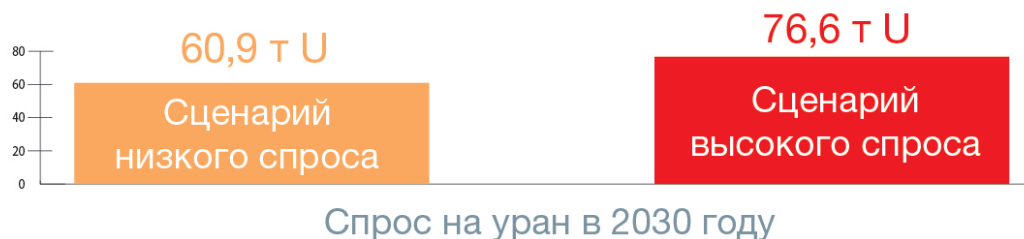
легководным и тяжеловодным теплоносителем; металлокерамическому топливу для плавучих и наземных ММР с легководным теплоносителем; топливу с трехструктурным изотропным покрытием для высокотемпературных охлаждаемых газом/солевым расплавом/теплопроводом ММР; металлическому или керамическому топливу для быстрых ММР с охлаждением жидким металлом/газом/теплопроводом; топливу на солевых расплавах для ММР с охлаждением расплавленной солью. Однако такие конструкции потребуют отдельных или совершенно новых заводов по изготовлению топлива и логистических цепей. Перед промышленным внедрением этих инновационных конструкций топлива, особенно тех, которые имеют более высокий уровень обогащения (например, НОУ+ и ВНОУ), также потребуются их аттестация и лицензирование.

Тенденции

67. В ходе Конференции Организации Объединенных Наций по изменению климата (КС-28) 22 страны приняли декларацию, направленную на достижение амбициозной цели — утроить мощности ядерной энергетики к 2050 году. Согласно глобальным прогнозам Красной книги 2022 года, спрос на уран к 2030 году составит от 60 960 т U (сценарий низкого спроса) до 76 592 т U (сценарий высокого спроса), а к 2040 году — от 63 040 т U (сценарий низкого спроса) до 108 272 т U (сценарий высокого спроса). Тем не менее, если, как указывается в докладе Всемирной ядерной ассоциации «Nuclear Fuel Report: Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023–2040» («Доклад о ядерном топливе: глобальные сценарии спроса и предложения, 2023–2040 годы»), спрос на уран возрастет в связи с внедрением ММР, то к 2040 году общемировые годовые потребности в уране могут составить от 86 914 т U (сценарий низкого спроса) до 184 316 т U (сценарий высокого спроса).

68. Планируемые и перспективные рудники в 19 странах могут, по мере их ввода в эксплуатацию с 2023 по 2040 год, внести вклад в номинальную общемировую производственную мощность в размере 77 138 т U в год. Чтобы гарантировать предложение урана на рынке, потребуется вернуть в строй простаивающие рудники и осуществить проекты разработки запланированных и перспективных рудников, а открытие новых месторождений потребует стабильно благоприятной рыночной конъюнктуры. Это особенно важно для разработки новых урановых рудников, на которую уходит в среднем 10–15 лет — от открытия месторождения до начала горнодобывающих работ. Кроме того, потребуются своевременные и крупные инвестиции в технологии разведки и добычи/переработки, включая экономически эффективные методы извлечения урана при разработке нетрадиционных типов месторождений (например, урана из фосфатных и черносланцевых месторождений).

Прогноз Красной книги 2022 года



69. К числу относительно недавних инноваций и разработок, способных превратить нерентабельные и малорентабельные урановые месторождения в действующие рудники, относится подземная добыча урана из месторождений с несогласным залеганием рудных тел, продемонстрированная на месторождении Финикс в бассейне реки Атабаска в Канаде; подземное биовыщелачивание урана из урансодержащих песчаников, как, например, на урановом месторождении 512 в Китае, где в настоящее время проводятся полевые эксперименты; повышение уровня обогащения низкосортных урановых руд, ведущееся, к примеру, на месторождении кальцикритового типа Мареника в Намибии; скважинная гидродобыча — новый инновационный и масштабируемый метод добычи, который позволяет разрабатывать относительно небольшие рудные тела с высоким содержанием урана, которые либо слишком малы, либо залегают на слишком большой глубине, чтобы их было экономически выгодно разрабатывать открытым или подземным способом. Кроме того, методы кучного выщелачивания, которые обычно используются для извлечения металлов из других типов месторождений полезных ископаемых, перспективны и для некоторых операций, связанных с ураном.

70. Ядерная тепловыделяющая сборка — это не просто взаимозаменяемый товар, а сложный продукт, являющийся результатом проектирования, лицензирования и НИОКР, и он должен соответствовать определенным спецификациям. Они определяются физическими характеристиками реактора, стратегией энергопредприятия по эксплуатации реактора и управлению топливным циклом, а также национальными или региональными лицензионными требованиями. Новые разработки в технологии проектирования и изготовления топлива можно разделить на две основные группы: эволюционные или революционные виды топлива, разработанные для существующего парка реакторов, которые могут обеспечить улучшения с точки зрения безопасности и производительности, а также экономичности эксплуатации и обращения с отходами, и эволюционные или революционные виды топлива, разработанные для усовершенствованных реакторов, в том числе для ММР.

71. Некоторые государства-члены уже планируют создание к середине 2020-х годов инфраструктуры лицензирования, поддерживающей увеличение глубины выгорания топлива и обогащения топлива сверх прежнего 5-процентного предела и создающей условия для

безопасной и экономичной эксплуатации существующих LWR в течение 24-месячных циклов без физической модификации заводов-изготовителей и транспортных контейнеров (т.е. только за счет изменения процедур лицензирования).

72. Однако в следующем десятилетии индустрия производства ядерного топлива столкнется с растущим спросом на ядерное топливо во всех сегментах ввиду расширения программ строительства как в странах с существующей ядерной энергетикой, так и в странах-новичках, ставящих перед собой амбициозные цели создания новых видов топлива, включая топливо для ММР и усовершенствованных реакторов. В настоящее время изучается множество различных конструкций АТФ, что приводит к появлению большого количества технических решений разного уровня сложности; одни конструкции АТФ относительно легко изготовить, используя имеющиеся производственные линии и оборудование, в то время как другие потребуют создания новых линий и оборудования. Для усовершенствованных конструкций АТФ и инновационного ядерного топлива потребуется обогащение выше 5% (для реализации многих инновационных концепций топлива потребуются НОУ+ и ВНОУ). Для успешного внедрения всех типов топлива для ММР потребуется полная готовность технологий производства топлива от стадии НИОКР до стадии промышленного производства.

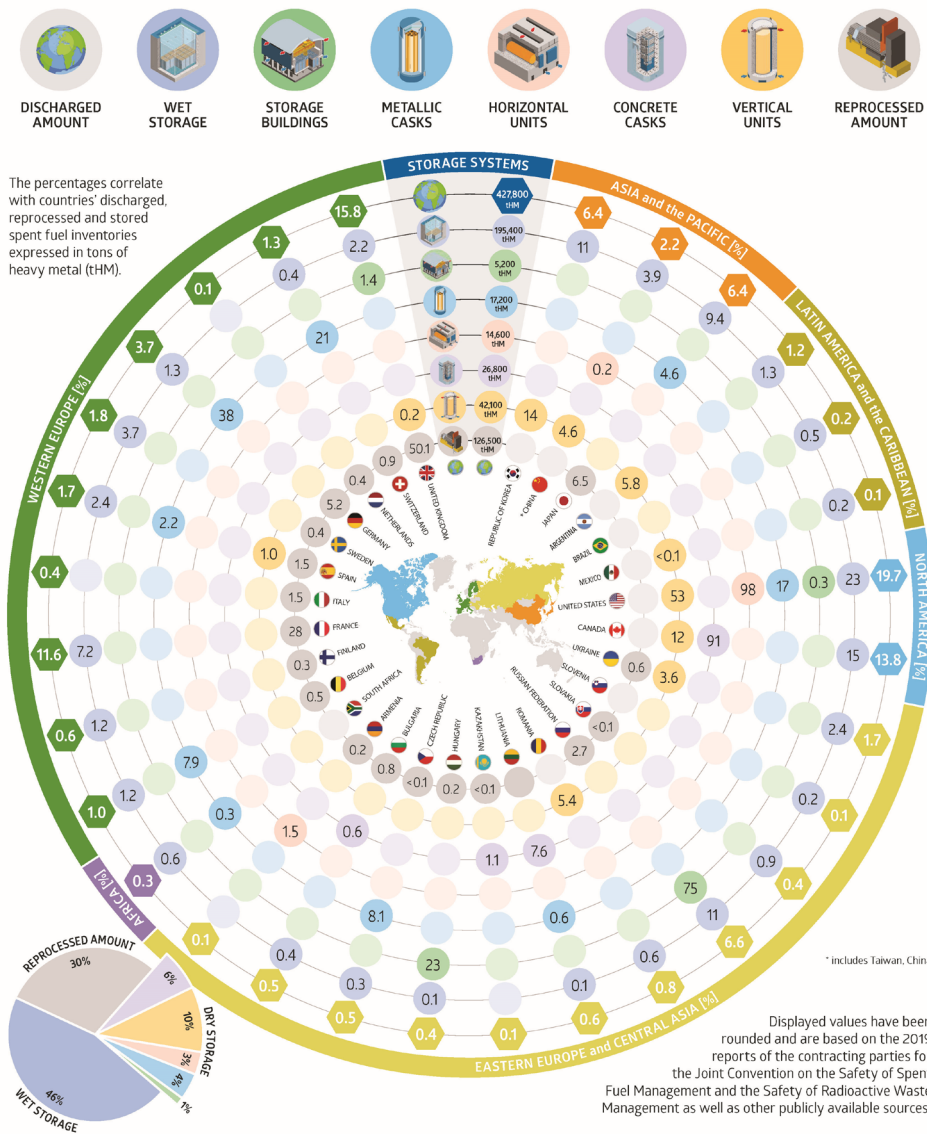
73. Важнейшее значение для использования топлива на основе НОУ+/ВНОУ имеет разработка новых транспортно-упаковочных комплектов, сертифицированных для перевозки НОУ+/ВНОУ. В настоящее время программы разработки ВНОУ обсуждаются в Северной Америке и Российской Федерации. Российская Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» обладает технологическими возможностями для производства как НОУ+, так и ВНОУ, обогащенного до 19,75% по U-235, в различных формах. Регулирующие положения большинства стран ограничивают возможности современной инфраструктуры ядерного топливного цикла обогащать уран по U-235 пятью процентами. Вместе с тем в следующем десятилетии спрос на ВНОУ может значительно измениться в связи с массовым внедрением ММР, так как многие из этих новых конструкций реакторов будут работать либо на НОУ+, либо на ВНОУ. В Соединенных Штатах Америки компания «Сентрус энерджи» начала демонстрацию производства ВНОУ в октябре 2023 года и будет постепенно увеличивать объем производства по мере роста спроса на ВНОУ. Компания «Уренко» объявила о готовности поставлять топливо НОУ+ на международные рынки, а также изучает возможность строительства специальной установки для производства ВНОУ и подписала соглашение о консорциуме с компанией «Орано» в целях разработки контейнеров для транспортировки топлива на основе НОУ+/ВНОУ.

В.2. Конечная стадия топливного цикла

Текущее состояние

74. 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 превышает 300 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 некоторых странах по истечении периода первоначальной выдержки ОЯТ переводят с мокрого хранения на сухое. Новые сухие хранилища уже пущены в эксплуатацию (например, в Аргентине, Словакии и Словении) или проектируются (например, в Японии). Министерство энергетики США выступило с инициативой, касающейся применения консенсусного подхода к выбору площадки одного или нескольких хранилищ федерального подчинения для консолидированного промежуточного хранения отходов.

SPENT FUEL MANAGEMENT THE INVENTORY STATUS



Подробнее



РИС. В.3. Используемые в мире системы хранения ОЯТ.

75. Государства-члены продолжают работы по удалению и перемещению ОЯТ в рамках проектов вывода своих АЭС из эксплуатации. Внедрены новые технологии для улучшения технологий инспектирования систем хранения ОЯТ, преимущественно это касается новых роботизированных платформ для размещения инспекционных приборов. В некоторых странах

перевозка ОЯТ является обычной деятельностью, ведущейся на повседневной основе. В последние годы были разработаны, лицензированы и введены в эксплуатацию новые упаковочные комплекты для хранения и перевозки с учетом появления новых или увеличения существующих объемов ОЯТ.

76. Продление срока службы некоторых АЭС ведет к увеличению объема ОЯТ, подлежащего хранению. После закрытия перерабатывающих заводов в Соединенном Королевстве произошло значительное сокращение мировых мощностей по переработке топлива. В Индии, Российской Федерации, Франции и Японии продолжается разработка в промышленном масштабе новых технологий рециклирования топлива для существующих установок и топлива для усовершенствованных реакторов. Япония планирует начать промышленную эксплуатацию завода по переработке в Роккасё в 2024 году. В Соединенных Штатах Америки компания «Окло» представила Комиссии по ядерному регулированию США (КЯР) план подготовки заявки на строительство завода, который будет перерабатывать топливо в промышленном масштабе. Российская Федерация модернизирует предназначенные для переработки ОЯТ комплексы РТ-1 и ОДЦ на производственном объединении «Маяк» в целях наращивания перерабатывающих мощностей и повышения операционной эффективности.

Тенденции

77. Для того чтобы и далее обеспечивать безопасное хранение ОЯТ и его последующую перевозку на пункты захоронения или перерабатывающие заводы, 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 реализуются программы по захоронению отработавшего топлива и приближаются заключительные стадии строительства пунктов захоронения, возрастает количество подготовительных мероприятий, таких как разработка программ характеристики. Продолжение таких усилий особенно важно, если учесть, что более высокая эффективность работы реакторов достигается за счет производства отработавшего топлива с более высокой начальной степенью обогащения и большей глубиной выгорания, что ведет к увеличению тепловыделения и потенциальному возрастанию риска охрупчивания оболочки, а это может повлиять на последующие этапы обращения с отработавшим топливом.

78. Ввиду проектирования новых конструкций топливных элементов как для существующего парка реакторов (например, легированного топлива), так и для реакторов усовершенствованных конструкций (включая ММР), которые могут потребовать иных процедур при обращении с отработавшим топливом, будет необходимо искать инновационные решения по обращению с отработавшим топливом, чтобы обеспечить их своевременное внедрение. Агентство координирует международные научные исследования по этой теме, чтобы способствовать обмену информацией и расширению знаний и наращиванию потенциала государств-членов на основе систематизации опыта эксплуатации, результатов научных исследований, а также подходов к политике и стратегии.

79. Несмотря на общее сокращение мировых мощностей по переработке отработавшего топлива, растет интерес к разработке передовых технологий рециклирования как для переработки существующего топлива, так и для содействия внедрению и обеспечению устойчивости усовершенствованных реакторов и ММР. Интеграция новых и инновационных топливных циклов с существующими топливными циклами важна для решения текущих проблем с энергоснабжением и обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики с соблюдением требований ядерной и физической безопасности. Начинают обсуждаться и разрабатываться инициативы по комплексному обращению с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, при том что в некоторых странах они уже реализуются. Внедрение

новых реакторов и соответствующих топливных циклов — это масштабная задача, и залогом успеха в ее решении станет международное взаимодействие и партнерство.

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

С.1. Вывод из эксплуатации

Текущее состояние

80. Всего в мире были окончательно остановлены 210 ядерных реакторов, из них 23 реактора были полностью выведены из эксплуатации⁴. Эти остановленные реакторы находятся в 21 стране в Европе, Азии и Северной Америке. Более двух третей остановленных реакторов — как выведенных из эксплуатации, так и находящихся на стадии вывода их эксплуатации — сосредоточено в 5 странах: Германии (33), Соединенном Королевстве (36), Соединенных Штатах Америки (41), Франции (14) и Японии (27). Таким образом, в этих странах сегодня осуществляются самые крупные программы вывода из эксплуатации энергетических реакторов, но в ряде других стран, включая Болгарию, Испанию, Италию, Канаду, Литву, Республику Корея, Российскую Федерацию, Словакию, Швецию, а также Тайвань, Китай, также реализуются проекты по выводу из эксплуатации энергетических реакторов.



210
ядерных реакторов
были окончательно
остановлены

81. К основным событиям 2023 года, связанным с выводом из эксплуатации, относится окончательный останов пяти энергетических реакторов по всему миру, включая последние оставшиеся энергетические реакторы Германии («Эмсланд», «Изар-2» и «Неккарвестхайм-2»), энергетический реактор в Бельгии («Тианж-2») и кипящий реактор на Тайване, Китай («Гошэн-2»). Такие темпы останова реакторов соответствуют средним показателям за последнее десятилетие. Операторы по-прежнему серьезно заинтересованы в том, чтобы продлить срок службы реакторов, сооруженных в 1980-х годах, до 60 лет и более.

82. Продолжает накапливаться большой опыт вывода из эксплуатации исследовательских реакторов: во всем мире полностью выведены из эксплуатации примерно 450 реакторов. В настоящее время на стадии вывода из эксплуатации находятся 67 исследовательских реакторов.

83. Кроме того, по всему миру ведутся крупные работы по выводу из эксплуатации установок ядерного топливного цикла, в том числе на нескольких объектах в Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Франции.

⁴ Согласно базе данных PRIS ([PRIS — главная страница \(iaea.org\)](https://www.iaea.org/pris)) по состоянию на 31 декабря 2023 года, выгрузка данных 6 июня 2024 года.

84. В рамках ряда текущих проектов вывода из эксплуатации был достигнут значительный технический прогресс, включая завершение компанией «Энреса» восстановительных работ на площадке снятой с эксплуатации АЭС «Хосе Кабрера». Эта АЭС — первая атомная станция в Испании, которая была полностью демонтирована (рис. С.1).



Рис. С.1. Бывшее здание гермообъема АЭС «Хосе Кабрера» (источник: «Энреса»).

85. Кроме того, в сентябре 2023 года оператор АЭС «Бреннилис» получил директиву французского правительства, разрешающую завершить демонтаж этой установки. Эта директива позволяет провести работы по полному демонтажу реакторного корпуса, модернизации инженерных сооружений, сносу оставшихся лишних компонентов и окончательной реабилитации площадки.

86. Были достигнуты значительные успехи в реализации программы Японского агентства по атомной энергии для конечной стадии топливного цикла. Например, реактор Monju, реактор-размножитель на быстрых нейтронах, вступил во вторую стадию вывода из эксплуатации, которая включает в себя подготовку к демонтажу натриевого компонента (например, экранирования нейтронного излучения) и энергогенерирующего компонента (например, турбины), а также получение разрешения регулирующего органа, которое было выдано в феврале 2023 года.

87. В октябре 2023 года концерн «Росэнергоатом» получил от Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору лицензию на вывод из эксплуатации блоков № 1 и № 2 Нововоронежской АЭС. Планируемый срок завершения проекта — 2035 год.

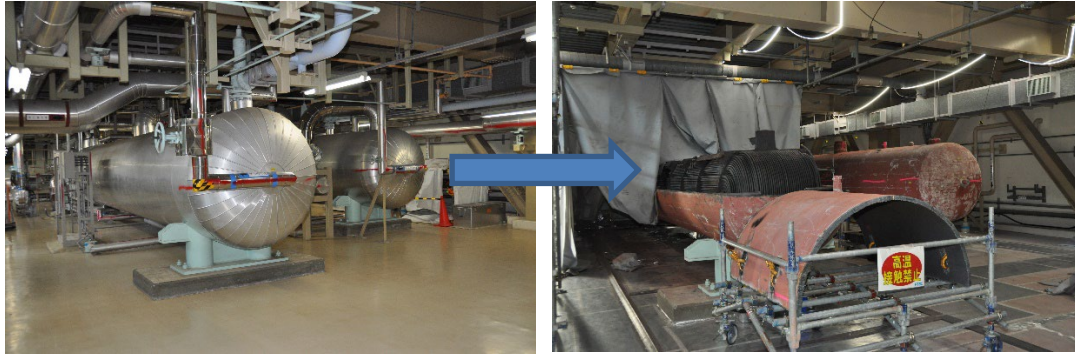


РИС. С.2. Демонтаж подогревателя высокого давления в ходе вывода из эксплуатации реактора Моңғи (источник: ЯААЭ).

Тенденции

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

89. В настоящее время в проектах вывода из эксплуатации все больше внимания уделяется применению принципов экономики замкнутого цикла. Устойчивость при выводе из эксплуатации проявляется на разных уровнях, включая более эффективное использование материалов, предназначенных для вывода из эксплуатации, с намерением минимизировать объем отходов, требующих окончательной утилизации, и более внимательное изучение возможности повторного использования/перепрофилирования площадок или установок для нужд будущих промышленных проектов. Вместе с тем экономика замкнутого цикла требует взаимодействия между различными заинтересованными сторонами — от тех, кто разрабатывает политику, и регулирующих органов до местного населения, — у которых могут иметься различные взгляды и ожидания относительно допустимости присутствия радиоактивности в их повседневной жизни.

90. В будущем все более важную роль в процессе вывода ядерных установок из эксплуатации будут играть цифровые технологии. К их крупным преимуществам относится эффективность и оптимальное использование имеющихся людских, финансовых и технологических ресурсов; радиационная безопасность для минимизации облучения персонала; процессы нормативного регулирования и привлечение заинтересованных сторон для лучшего понимания деятельности по выводу из эксплуатации; управление знаниями для эффективной передачи знаний и опыта между нынешними и будущими работниками.

91. Другие события, тесно связанные с растущим процессом цифровизации, — это использование мобильных роботов для сканирования физического и радиологического состояния сооружений и применение дистанционно управляемых инструментов для обработки отходов, упаковочных операций и выполнения действий в местах, доступ к которым затруднен, например из-за высокой мощности дозы.

92. Цифровые технологии принесут много дополнительных потенциальных преимуществ ядерной отрасли в целом, значительно повысив доступность опыта реализации текущих проектов вывода из эксплуатации для проектировщиков и операторов ядерных установок и регулирующих органов, а также для различных заинтересованных сторон в рамках будущих проектов вывода из эксплуатации.

С.2. Восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивным материалом природного происхождения (РМПН)

Восстановление окружающей среды

93. Деятельность по восстановлению окружающей среды ведется в основном на четырех типах загрязненных площадок: площадках ядерных установок (как заключительная часть проекта вывода из эксплуатации); бывших объектах по добыче и переработке урана; в местах, затронутых радиологическими авариями; местах, где велись работы, не связанные с ядерной отраслью, и остались остатки/отходы, которые необходимо должным образом утилизировать (см., например, рис. С.3).



РИС. С.3. Временное хранение остатков РМПН (источник: МАГАТЭ).

94. В 2023 году во всем мире продолжала планомерно вестись деятельность по восстановлению окружающей среды. В Соединенном Королевстве Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов, первоначально отвечавшее за очистку 17 старейших гражданских ядерных объектов страны, расширило свою программу работы, включив в нее усовершенствованные газоохлаждаемые реакторы. В Соединенных Штатах Америки на 91 из 107 объектов страны была успешно проведена работа по очистке загрязненной воды и почвы. Было произведено окончательное захоронение более 179 000 контейнеров с трансурановыми отходами. К концу 2023 года от регулирующего контроля было освобождено 17 000 акров земли. В штате Вашингтон на реакторе В на площадке «Ханфорд», которая является теперь частью национального парка «Манхэттенский проект» наряду с Окриджской национальной лабораторией и Лос-Аламосской национальной лабораторией, завершились важнейшие мероприятия по очистке воды в резервуарах и был снижен уровень риска за счет модернизации и улучшения инфраструктуры. В настоящее время продолжают очистные работы на 16 объектах, но очистка этих оставшихся объектов является относительно сложным делом ввиду уникальных характеристик присутствующих там радиоактивных отходов.

Обращение с радиоактивным материалом природного происхождения

95. Помимо радиоактивных отходов, многие страны также сталкиваются с проблемой обращения с большими объемами остаточных материалов с различной концентрацией естественных радионуклидов (РМПП), образовавшихся в результате неядерной деятельности.

96. В больших количествах происходит образование фосфогипса — сульфата кальция, являющегося побочным продуктом производства удобрений. Поскольку его перевозка и долгосрочное хранение требуют капитальных и текущих затрат, фосфогипс часто размещается в отвалах, многие из которых находятся на открытых территориях. Негативное воздействие отвалов фосфогипса на окружающую среду часто проявляется в загрязнении подземных и поверхностных вод и почвы.

97. Фосфогипс содержит редкоземельные элементы, железо, титан, магний, алюминий и марганец, а также токсичные тяжелые металлы. Многие редкоземельные элементы включены в список «критически важных» сырьевых материалов в Европейском союзе. Фосфогипс также имеет ряд потенциальных применений, включая использование в качестве дорожного основания, которое дешевле существующих материалов и столь же эффективно, а то и более эффективно, чем они; улучшение сельскохозяйственной почвы, позволяющее обеспечить почву столь необходимой серой; использование в качестве покрытия для свалок, ускоряющего разложение отходов и продлевающего срок службы свалки; использование в качестве материала для изготовления керамической черепицы, а также материала для морских субстратов, например устричных нерестилищ. Применяя аналогичные подходы, можно оценить материалы, оставшиеся в результате других операций, а прибыль, полученную от продажи этих материалов, реинвестировать в реабилитацию загрязненных площадок. Этот подход представляет собой потенциальное решение, особенно для государств-членов с низким уровнем дохода, у которых в противном случае не имелось бы необходимых ресурсов для реабилитации таких объектов.

Тенденции

Восстановление окружающей среды

98. Пока во всем мире продолжают работы по реабилитации загрязненных площадок, в сообществе специалистов по восстановлению окружающей среды набирает силу тенденция к переходу от принципа снижения рисков к более широкому подходу — определению совокупной ценности без ущерба для безопасности. Принципы экономики замкнутого цикла подразумевают акцент на переоценке ценности площадки по завершении как ядерных, так и неядерных

операций. Успешные работы по восстановлению окружающей среды сыграют решающую роль в обеспечении того, чтобы ядерная энергетика могла внести свой вклад в смягчение последствий изменения климата. В этом направлении и необходимо вести поиск устойчивых и жизнеспособных путей восстановления окружающей среды с учетом необходимости активного и широкого участия в процессе принятия решений.

Обращение с радиоактивным материалом природного происхождения

99. Многие страны продемонстрировали, каким образом можно минимизировать остатки РМПП благодаря применению подходов, основанных на экономике замкнутого цикла (например, Испания использовала фосфогипс как почвоулучшитель, а Нидерланды использовали остатки РМПП в качестве стабилизатора на мусорных полигонах). Из остатков РМПП могут быть извлечены критически важные материалы, и в этих случаях необходимо использовать инновационные методы. Будет крайне необходима государственная политика поощрения подходов замкнутого цикла, подкрепленная нормативными положениями, которые должны быть адаптированы к сценарию экономики замкнутого цикла.

С.3. Обращение с радиоактивными отходами

Текущее состояние

100. В течение 2023 года ряд стран добились значительного прогресса в области обращения с радиоактивными отходами, подтвердив свое стремление к ответственному обращению с отходами и их захоронению, а также твердый настрой на применение более безопасных и устойчивых методов обращения с отходами.

101. Государства-члены, десятилетиями реализующие технические решения по обращению с отходами, продолжили выполнение некоторых из своих основных национальных программ. Например, французское Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами (АНДРА) подало в январе 2023 года заявку на получение лицензии на строительство пункта геологического захоронения в рамках проекта «Сижео». Кроме того, в преддверии будущего накопления отходов в связи с выводом из эксплуатации АЭС АНДРА обратилось в природоохранные органы за получением разрешения на то, чтобы увеличить площади для захоронения очень низкоактивных отходов в Промышленном центре сбора, сортировки и захоронения (CIRES). Компания «Энреса» (Испания) объявила о значительном — вплоть до четырехкратного — увеличении площадей для захоронения низкоактивных отходов на пункте захоронения Эль-Кабриль. Швейцарское Национальное объединение по захоронению радиоактивных отходов («Награ») ожидает разрешения на проведение подземных исследований на рекомендованной им площадке. Другие государства-члены, такие как Германия, Соединенное Королевство, Украина и Япония, ведут активную работу по выбору площадок.



РИС. С.4. Во время своего официального визита во Францию в 2023 году Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси посетил объект АНДРА в регионе Мёз-Верхняя Марна, в том числе ознакомился с проектом центра «Сижео» по глубокому геологическому захоронению радиоактивных отходов, который ему представил генеральный директор АНДРА Пьер-Мари Абади (источник: АНДРА).

102. Благодаря инновациям в области обращения с радиоактивными отходами компании «Студсвик» (Швеция) и «Гезельшафт фюр нуклеар сервис» (Германия) подписали эксклюзивное соглашение о внедрении созданной «Студсвик» технологии inDRUM — запатентованной технологии переработки проблемных радиоактивных отходов. В Российской Федерации Томский политехнический университет и компания «ТВЭЛ» ведут совместную работу над проектом, в котором используются электрические разряды для ускорения дезактивации радиоактивного бетона. Этот инновационный метод сулит перспективу ускоренной и более эффективной дезактивации при минимальном рассеивании пыли, которое часто сопутствует традиционным методам дробления бетона. В Физико-энергетическом институте Российской Федерации разработана технология твердофазного окисления натриевого теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах и создана опытно-промышленная установка «Минерал 100/150». Альянс компаний по выводу из эксплуатации (Соединенное Королевство) — партнерство, состоящее из компаний «Джейкобс», «Аткинс» и «Вестингауз электрик» — тестирует инновационный подход к безопасному извлечению обломков и мусора из бассейнов выдержки топлива на площадке Управления по выводу из эксплуатации ядерных

объектов (УВЭ). Был протестирован инструмент для извлечения осадка, который представляет собой эффективное и экономичное решение средни промышленному пылесосу.



РИС. С.5. Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси на экскурсии в лаборатории контейнеров Шведской компании по обращению с ядерным топливом и отходами, включающей осмотр контейнеров для глубокого подземного хранения отработавшего топлива, во время своего официального визита в Швецию в августе 2023 года (источник: МАГАТЭ).

103. В течение отчетного периода ряд государств-членов, перед которыми стоят меньшие по масштабам и/или возникшие в недавнее время задачи, создали национальный потенциал и инфраструктуру. Например, Беларусь добилась значительных успехов в создании организации по обращению с радиоактивными отходами. Цель государства — к 2030 году ввести в строй пункт долгосрочного хранения и захоронения, на который будут поступать отходы, образующиеся не только на Белорусской АЭС, но и в различных отраслях, где используются источники ионизирующих излучений. Нидерланды начали строительство здания многофункционального хранилища — нового объекта для размещения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности с расчетным сроком службы не менее 100 лет. В Зимбабве завершено строительство национального централизованного предприятия по обращению с радиоактивными отходами, предназначенного для долгосрочного обращения с радиоактивными отходами и изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками. В национальных хранилищах на Филиппинах и в Боливарианской Республике Венесуэла были улучшены условия с точки зрения ядерной и физической безопасности, что в ближайшем будущем позволит увеличить их емкость.



РИС. С.6. Недавно построенное централизованное предприятие по обращению с отходами в Зимбабве (источник: МАГАТЭ).



РИС. С.7. Улучшенные условия хранения на Филиппинах (слева) и в Боливарианской Республике Венесуэла (справа) (источники: Филиппинский институт ядерных исследований (слева) и Венесуэльский институт научных исследований (справа)).

104. В июле 2023 года Агентство по обращению с радиоактивными отходами Словении (АРАО) начало подготовку площадки для строительства пункта захоронения низкоактивных и среднеактивных отходов, прокладывая основные подъездные пути, подключая необходимые коммуникации и проводя мониторинг окружающей среды для измерения исходных показателей. Между тем в Австралии после того, как представительный орган исконного владельца земель успешно оспорил выбор предпочтительной площадки для размещения в Южной Австралии централизованного предприятия по обращению с радиоактивными отходами на основании того, что имела место предполагаемая предвзятость, правительство не намерено продолжать разработку данной предпочтительной площадки.



РИС. С.8. Подготовка площадки для строительства пункта захоронения эксплуатационных отходов АЭС в Словении (источник: АРАО).

Тенденции

105. Глобальная тенденция к внедрению принципов и методов комплексного обращения с радиоактивными отходами меняет облик ядерной отрасли. Такой подход обеспечивает устойчивое использование ядерных технологий за счет оптимизации обращения с отходами с момента их образования до захоронения. Это потребует координации между разработчиками политики и стратегии в интересах решения различных проблем, касающихся соизмеримости поставленных целей, а затем и для выбора приемлемых технических вариантов, обеспечивающих реализацию комплекса мер по обращению с радиоактивными отходами. Комплексное обращение с отходами позволяет оптимизировать процессы, снижает риски для окружающей среды и способствует ответственному обращению с радиоактивными отходами. Канадская Организация по обращению с ядерными отходами взяла на вооружение комплексную стратегию обращения с радиоактивными отходами, за исключением отработавшего ядерного топлива. Этот комплексный подход предполагает захоронение среднеактивных отходов и не относящихся к топливу высокоактивных отходов в глубинном геологическом хранилище, а низкоактивных отходов — на пунктах приповерхностного захоронения.

106. Интерес государств-членов к внедрению ММР даст толчок преобразованиям в ядерной энергетике. Вместе с тем ММР порождают серьезную проблему обращения с радиоактивными отходами. По мере освоения странами этой инновационной технологии необходимо адаптировать к ММР соответствующую политику и стратегии в отношении радиоактивных отходов. Это требует значительных инвестиций в создание объектов по переработке, хранению и захоронению отходов, а также в подготовку квалифицированного персонала. Важнейшую роль для решения этих меняющихся задач обращения с радиоактивными отходами играет выделение финансовых средств, в частности на устройство пунктов захоронения, которое станет залогом устойчивого будущего ядерной энергетике.

107. Кроме того, усиливается тенденция к введению иерархии радиоактивных отходов, в которой делается акцент на предотвращении образования, минимизации, переработке и повторном использовании отходов. Этот подход имеет целью сокращение объема

радиоактивных отходов, направляемых на пункты захоронения, что приведет к сохранению этих пунктов как ценных объектов в долгосрочной перспективе. Одним из проявлений этой тенденции является открытие компанией «Онтарио пауэр дженерейшн» Западного предприятия по сортировке и переработке отходов чистой энергетики, которое позволит минимизировать объем отходов АЭС, сократить потребности в хранении и расходы на вывод из эксплуатации. Кроме того, еще одним свидетельством стремления к снижению объема отходов является работа бельгийского предприятия RECUMO по переработке радиоактивных остатков от производства медицинских радиоизотопов и извлечению низкообогащенного урана (НОУ). Аналогичным образом, действующее в Румынии предприятие по удалению трития Корейской компании по гидро- и ядерной энергетике демонстрирует стремление ограничить образование отходов с одновременным развитием экспертных знаний в области обращения с тритием. В Соединенном Королевстве компания «Ньюклар уэйст сервисиз» опубликовала стратегию обращения с радиоактивными отходами, которая согласуется с принципами иерархии отходов. В этой стратегии делается акцент на сокращении объема отходов: в ней установлен целевой показатель переработки 50% отходов деятельности по выводу из эксплуатации и поставлена задача сокращения объема вторичных отходов к 2030 году примерно на 70%.

108. Ученые-ядерщики размышляют над тем, как извлечь пользу из отходов, получая из них радиоизотопы для применения в медицине и для нужд освоения космоса. Космическое агентство Соединенного Королевства и Национальная ядерная лаборатория Соединенного Королевства ведут исследования, посвященные аккумуляторным батареям космических аппаратов, которые будут содержать америций-241. В 2023 году из Словении и Чили было вывезено в общей сложности 32 источника высокого уровня активности. Кроме того, в рамках Глобальной инициативы по обращению с радием-226 из Таиланда были вывезены изъятые из употребления источники радия. В настоящее время в 17 государствах-членах, включая Индонезию, Испанию, Малайзию, Сальвадор, Словению, Хорватию и Эфиопию, ведутся работы по учету изъятых из употребления источников радия, которые будут использоваться для производства радиоизотопов, необходимых для лечения онкологических заболеваний.

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

Текущее состояние

109. В 2023 году исследователи из американской Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса по меньшей мере трижды повторили революционный эксперимент по зажиганию термоядерного реактора, проведенный на Национальной установке по термоядерному зажиганию в декабре 2022 года.



РИС. D.1. Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси осматривает зал токамака SPARC (источник : МАГАТЭ).

110. В феврале 2023 года компания «Коммонвелф фьюжн системз» (CFS) и Центр изучения плазмы и синтеза (PSFC) Массачусетского технологического института (МТИ) — первого центра сотрудничества Агентства в области энергии термоядерного синтеза — торжественно отметили официальное открытие площадки для строительства SPARC — токамака, на котором должен быть получен чистый прирост энергии в научных целях. Ожидается, что SPARC будет пущен в эксплуатацию в 2025 году и в дальнейшем будет демонстрировать чистый прирост энергии в научных целях. Его преемник, ARC, строительство которого должно быть завершено к 2035 году, должен продемонстрировать производство электроэнергии.

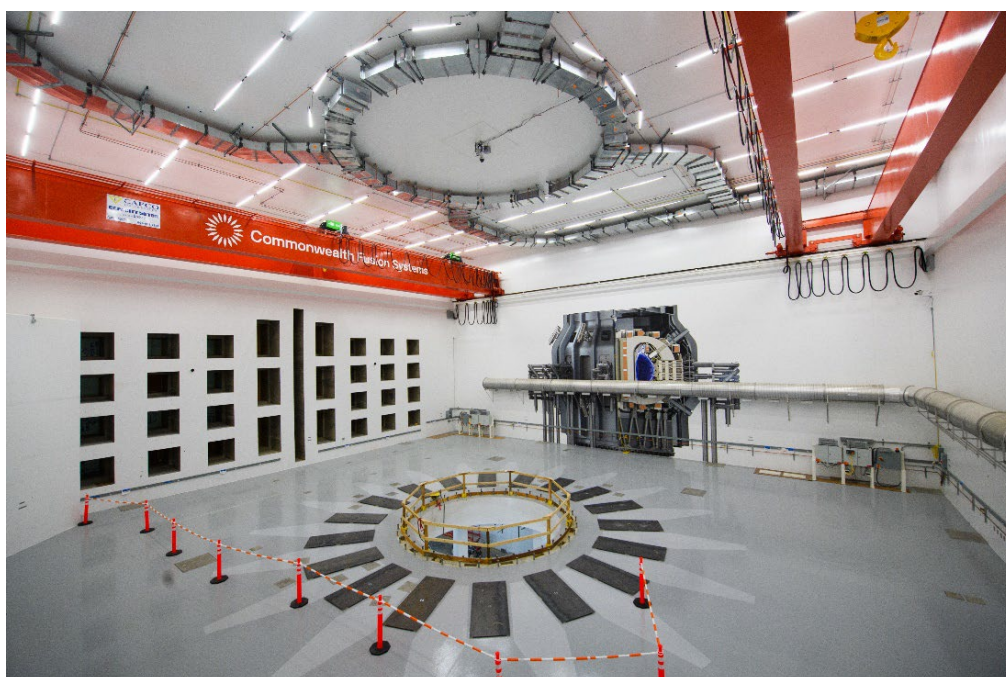


РИС. D.2. Зал токамака SPARC готов к сборке установки (источник: CFS).

111. В октябре 2023 года на японском токамаке JT-60SA была получена первая плазма. Этот агрегат высотой с четырехэтажный дом рассчитан на удержание плазмы, нагретой до 200 миллионов градусов по Цельсию, в течение примерно 100 секунд, что значительно дольше, чем у предыдущих больших токамаков. Плазма в JT-60SA будет очень похожа на ту, которую планируется получить на ИТЭР, и позволит физикам изучить стабильность плазмы и то, как она влияет на выработку термоядерной энергии в течение длительных временных интервалов, и тем самым получить опыт, который можно будет учесть при создании более крупного токамака. Кроме того, в 2023 году в Роккасё, Япония, был установлен прототип линейного ускорителя ИФМИФ.

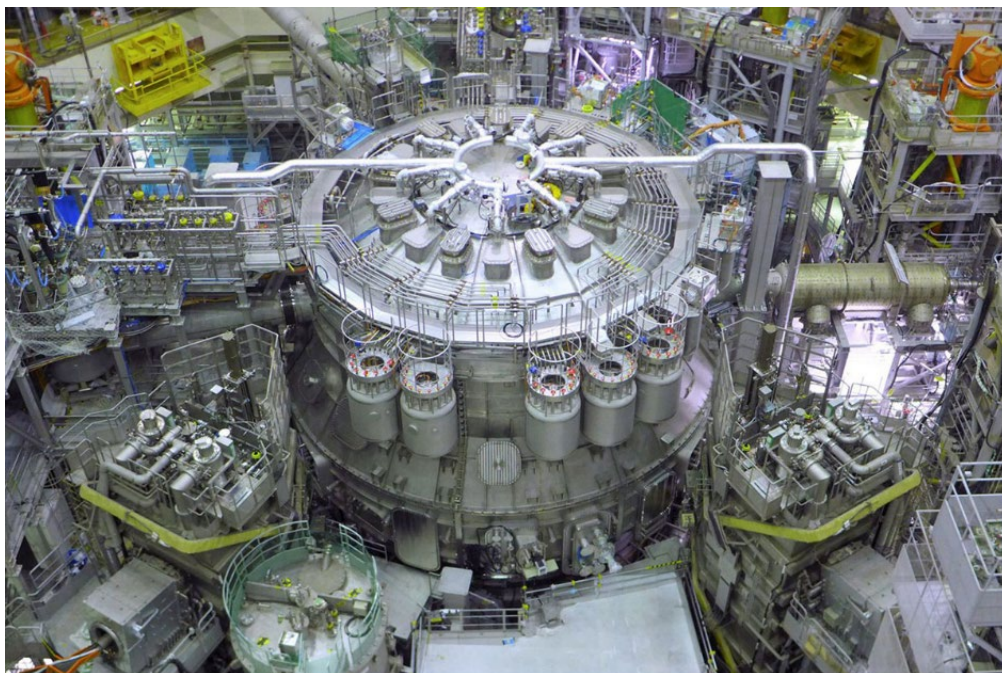


РИС. D.3. JT-60SA — крупнейший в мире действующий токамак, который был спроектирован и построен Японией совместно с Европейским союзом (источник: Национальные институты квантовой физики и технологии).

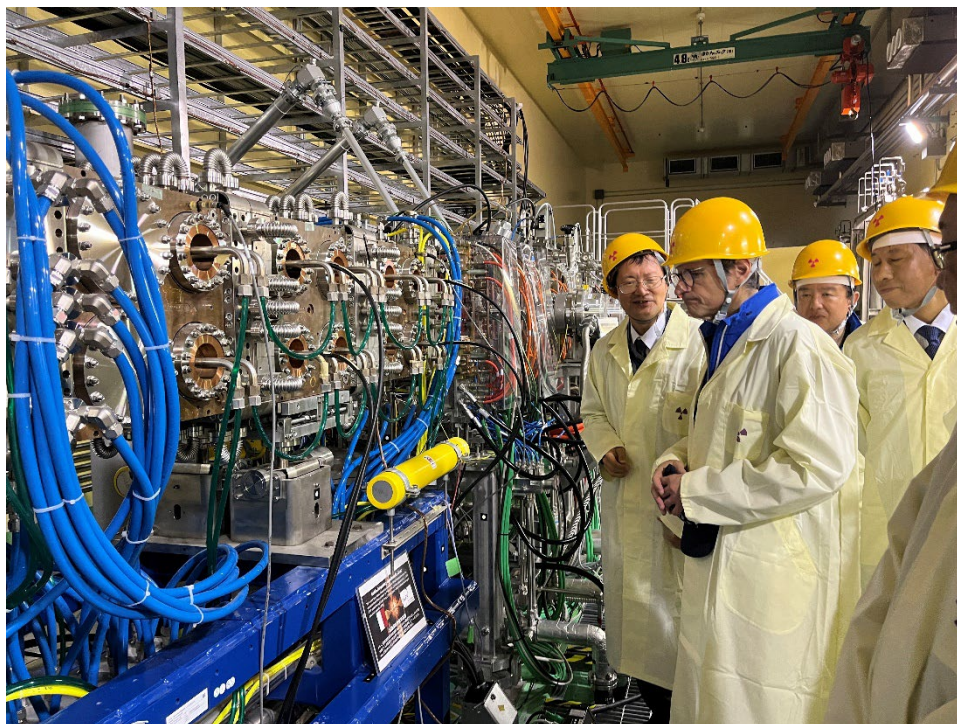


РИС. D.4. Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси осматривает прототип линейного ускорителя ИФМИФ в Институте термоядерного синтеза в Роккасё во время своего официального визита в Японию (источник: Национальные институты квантовой физики и технологии).

112. Усовершенствованный экспериментальный сверхпроводящий токамак (EAST) в Китае достиг стабильного состояния с высокой степенью удержания плазмы в течение 403 секунд. Этот прорыв улучшил первоначальный рекорд в 101 секунду, который был установлен компанией EAST в 2017 году. В режиме работы с высоким удержанием плазмы были значительно увеличены температура и плотность частиц, что повысит эффективность выработки энергии на будущих термоядерных электростанциях. Кроме того, токамак HL-3 в Китае впервые работал в режиме высокого удержания плазмы с током плазмы в один миллион ампер благодаря модернизированным системам нагрева, эксплуатации, управления, диагностики и электропитания.

113. В 2023 году на французском токамаке WEST заработал вольфрамовый дивертор. Для демонстрации устойчивости и эффективности этого нового компонента была проведена первая экспериментальная кампания, во время которой за счет формирования последовательности плазменных разрядов продолжительностью около одной минуты была достигнута высокая интегральная плотность потока нейтронов.

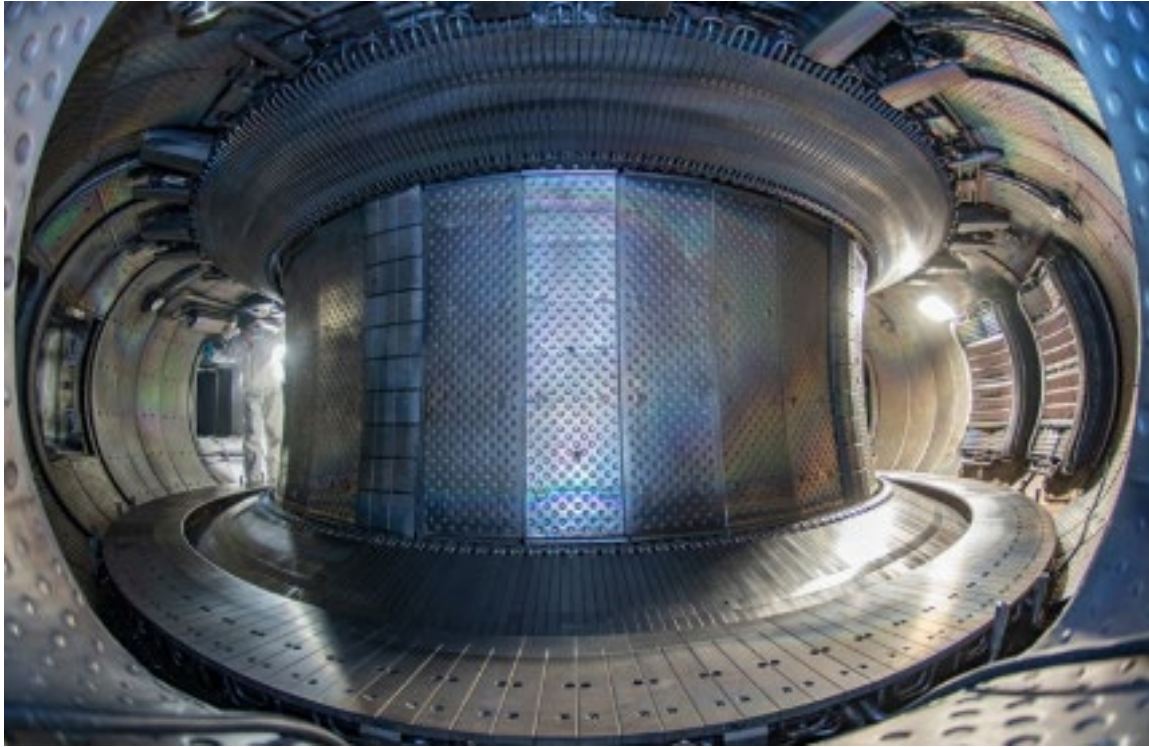


РИС. D.5. Токамак WEST оснащен активно охлаждаемым вольфрамовым дивертором (источник: КАЭ).

114. После 40 лет эксплуатации и последних экспериментов с дейтериево-тритиевой плазмой, проводившихся в течение 2023 года, начался вывод из эксплуатации Объединенного европейского тора (JET), который продлится примерно до 2040 года. Вывод JET из эксплуатации даст ценную информацию специалистам по термоядерному синтезу, позволив проанализировать, как менялись материалы внутри корпуса за время эксплуатации.

115. На установке Wendelstein 7-X в Германии, крупнейшем стеллараторе в мире, исследователи смогли добиться оборота энергии в размере 1,3 гигаджоуля (ГДж). В будущем на Wendelstein 7-X ставится цель достичь оборота энергии в 18 ГДж, при этом плазма будет поддерживаться в стабильном состоянии в течение получаса.

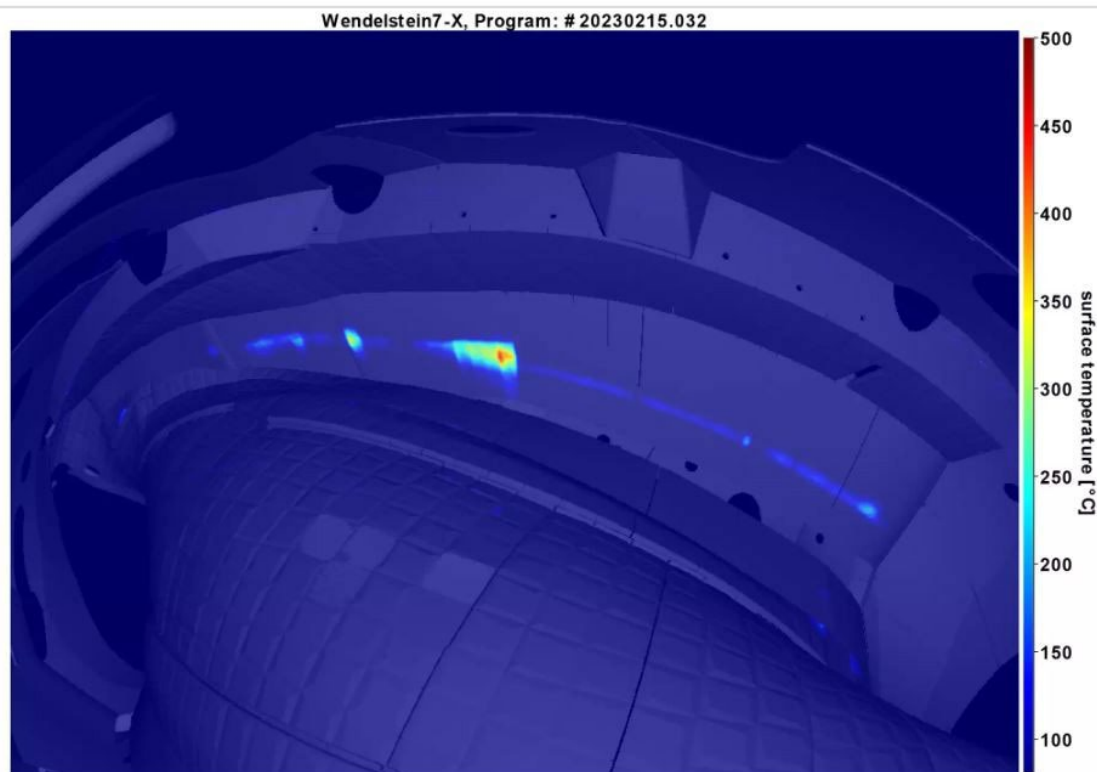


Рис. D.6. Инфракрасное изображение из вакуумного корпуса Wendelstein 7-X, показывающее распределение температур на охлаждаемых водой перегородках дивертора. В центре четко видна линия — так называемая линия удара. В этом месте плазма соприкасается с дивертором и имеет самую высокую температуру. В отдельных зонах температуры достигают 600 градусов по Цельсию (красные зоны). Плитки дивертора выдерживают температуры до 1200 градусов по Цельсию (источник: Институт физики плазмы им. Макса Планка).

116. В 2023 году Организация ИТЭР и ее национальные агентства продолжали дальнейшую проработку оптимизированного исходного плана проекта ИТЭР, который предполагает замену материала первой стенки с бериллия на вольфрам, что, как ожидается, повысит устойчивость внутрикорпусных компонентов и в то же время позволит свести к минимуму количество накапливаемого в установке трития. Кроме того, был достигнут прогресс в организации ремонта ключевых компонентов, а также текущих работ по изготовлению, сборке и монтажу компонентов, при этом Организация ИТЭР продолжала переговоры с французским регулирующим органом — Управлением по ядерной безопасности — о применении поэтапного подхода к лицензированию, охватывающего три этапа экспериментальной эксплуатации, каждый из которых будет соответствовать определенным рубежам и требованиям безопасности для доведения проекта ИТЭР до успешного завершения. Члены Совета подчеркнули значительную ценность проекта ИТЭР и его миссии.

117. В Италии продолжалось строительство опытного реактора-токамака с дивертором (DTT) — нового сверхпроводящего токамака, предназначенного для изучения передовых технических решений в области диверторов для демонстрационных термоядерных энергетических установок (DEMO). Консорциум по осуществлению этого проекта, состоящий из многих итальянских научно-исследовательских институтов и международных партнеров, включая одну из крупнейших энергетических компаний мира, собрал почти 500 млн евро на строительство установки. Основная задача DTT — изучить физические аспекты и протестировать технологические аспекты концепций энерговыделения в плазме, которые могут быть использованы в европейской установке DEMO.

118. Цель установок DEMO — продемонстрировать чистый прирост электроэнергии в результате ядерного синтеза. В Европейском союзе, Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Японии на разных стадиях разработки находятся по меньшей мере 12 таких концептуальных проектов, при этом намеченные сроки завершения работ варьируются от 2030 до 2050 года. Эти концептуальные проекты разрабатываются правительствами отдельных стран, частными компаниями и некоторыми совместными государственно-частными предприятиями (рис. D.4).

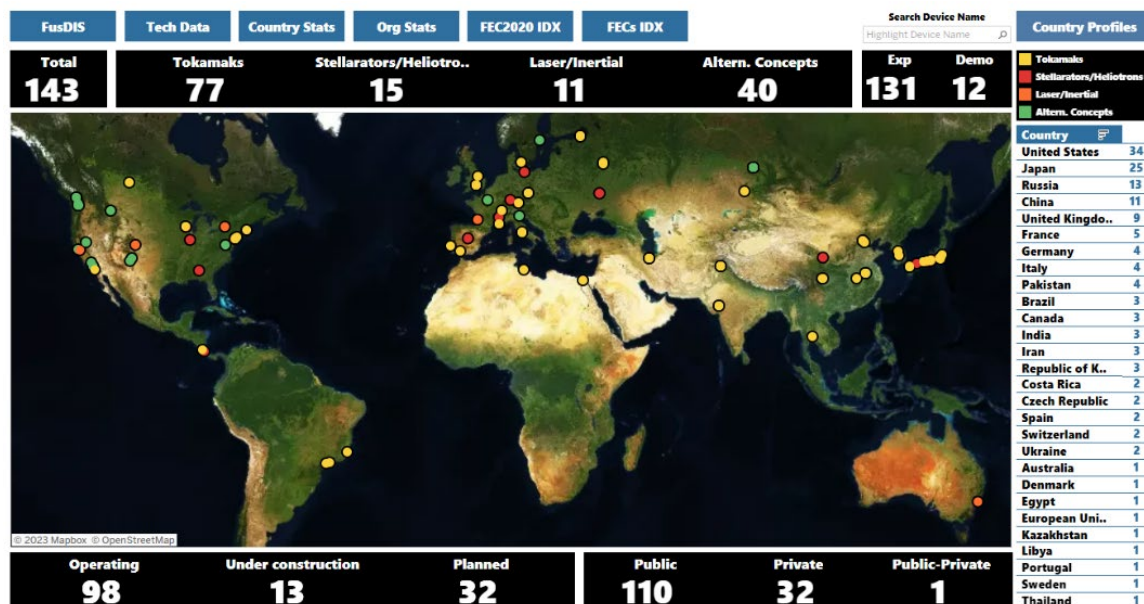
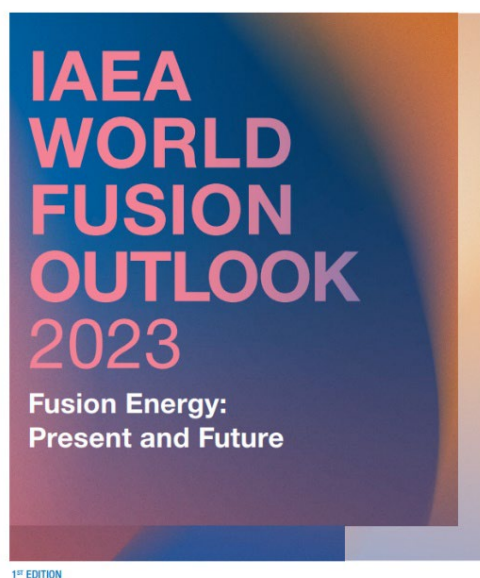


РИС. D.7. В настоящее время в эксплуатации, в процессе сооружения или планирования находятся более 140 экспериментальных термоядерных устройств, принадлежащих государственным и частным организациям, а ряд организаций изучают проекты создания демонстрационных термоядерных энергетических установок (источник: Информационная система МАГАТЭ по термоядерным устройствам).

Тенденции

119. На 29-й Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза, организованной Агентством и правительством Соединенного Королевства в Лондоне в октябре 2023 года, Генеральный директор представил первую публикацию МАГАТЭ «World Fusion Outlook» («Мировой прогноз МАГАТЭ по термоядерному синтезу — 2023») — всемирный сборник авторитетной информации о последних достижениях в области термоядерной энергии, а также объявил о созыве в 2024 году первого совещания Всемирной группы по термоядерной энергии. На Конференции Соединенное Королевство представило программу «Fusion Futures» («Будущее синтеза»), в рамках которой в течение следующих пяти лет будет инвестировано дополнительно 650 млн фунтов стерлингов (793 млн долл. США) в комплекс программ НИОКР, включая создание 2200 учебных мест, строительство новой установки для испытаний топливного цикла и



финансирование развития инфраструктуры частных компаний по термоядерному синтезу, в частности в кампусе Кулхэм Управления по атомной энергии Соединенного Королевства (УАЭСК). Это объявление было сделано вслед за решением страны выйти из Программы исследований и подготовки кадров Евратома. Несколько недель спустя Министерство энергетической безопасности и углеродной нейтральности Соединенного Королевства и Министерство энергетики США объявили о новом стратегическом партнерстве для ускорения демонстрации и вывода на рынок термоядерных энергетических установок, нацеленном на развитие их национальных стратегий освоения термоядерной энергии.

Подробнее

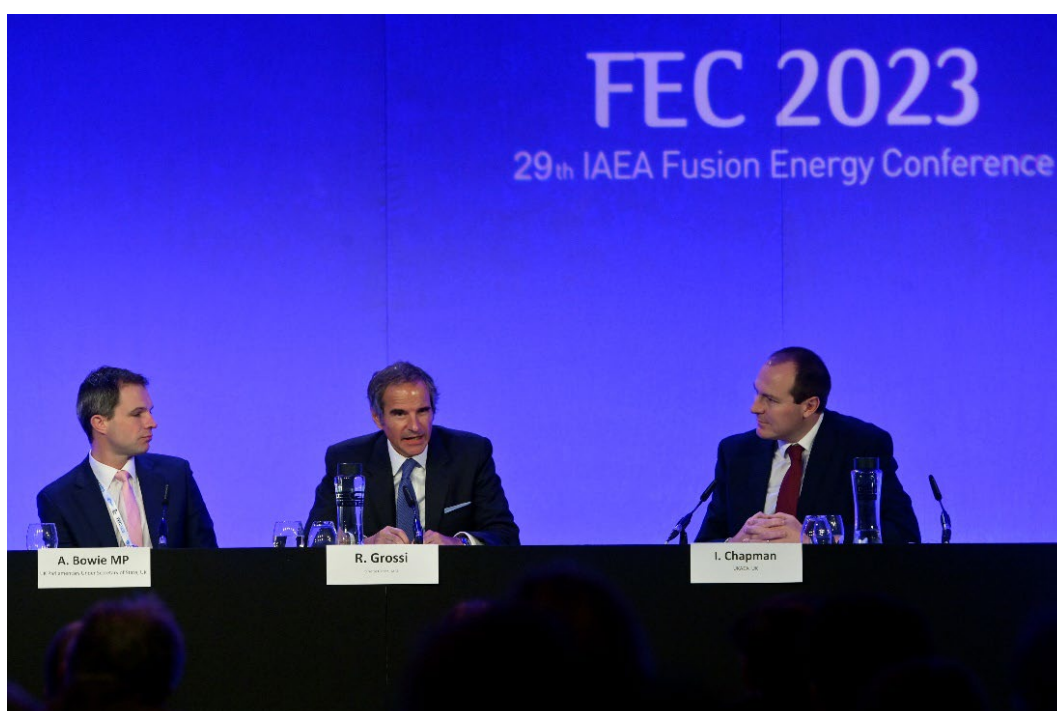


Рис. D.8. Церемония открытия 29-й Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза в Лондоне. Слева направо: Эндрю Боуи, парламентский заместитель министра (министр по ядерной энергии и сетям), Министерство энергетической безопасности и углеродной нейтральности; Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ; Ян Чепмен, генеральный директор УАЭСК (источник: МАГАТЭ).

120. Тем временем в Германии Федеральное министерство образования и исследований объявило, что к 2028 году выделит более 1 млрд евро на изучение ядерного синтеза в дополнение к 370 миллионам евро (396 млн долл. США), уже намеченным к выделению научно-исследовательским институтам в течение следующих пяти лет.

121. Япония приняла первую национальную стратегию по освоению энергии термоядерного синтеза, подчеркнув необходимость создания отечественной индустрии термоядерной энергии с более широким привлечением частного сектора к НИОКР в сфере термоядерного синтеза. Правительство Японии также объявило, что создаст промышленный совет по термоядерной энергии для развития смежных отраслей, а также разработает руководящие принципы нормативного регулирования вопросов использования технологий термоядерной энергии. Кроме того, правительство поставит во главу угла организацию учебной работы по тематике термоядерной энергии в образовательных учреждениях.

122. Бюро по научным исследованиям в области термоядерной энергии Министерства энергетики США опубликовало концептуальный документ «Building Bridges» («Наведение мостов»), в котором рассматриваются три ключевых элемента: 1) повышение и поддержание кадрового потенциала — обеспечение создания устойчивых и стабильных путей для привлечения разнообразных и исключительных талантов; 2) устранение пробелов — создание «двигателей инноваций» совместно с национальными лабораториями, университетами и промышленностью в целях устранения пробелов в области НИОКР и укрепления внутренних цепей поставок для нужд термоядерной энергетики; 3) наука на качественно новом уровне — содействие открытиям в области физики и технологий плазмы, которые можно преобразовать в инновационные результаты. Эта концепция является частью общей стратегии в области термоядерного синтеза, которая призвана обеспечить сближение усилий частного и государственного секторов в части соответствующих исследований и разработок.

123. Объектом более пристального внимания и более крупных инвестиций в области энергии термоядерного синтеза становятся частные компании, поскольку многие из них намерены самостоятельно разрабатывать свои собственные исследовательские и демонстрационные устройства. Американская частная компания «Хелион» объявила о заключении соглашения с «Майкрософт» на поставку последней электроэнергии от первой термоядерной электростанции с расчетной выработкой 50 МВт, которая, как ожидается, будет пущена в строй к 2028 году. «Хелион» также объявила о сотрудничестве с компанией «Ньюкор» в создании термоядерной установки мощностью 500 МВт для электроснабжения сталелитейного завода «Ньюкор» с расчетным сроком начала эксплуатации в 2030 году.

124. На фоне меняющейся ситуации с освоением энергии термоядерного синтеза начинают формироваться государственно-частные партнерства. В мае 2023 года Министерство энергетики США объявило о выделении 46 млн долл. США на финансирование восьми компаний в течение первых 18 месяцев деятельности по разработке проектов и проведению НИОКР, связанных с термоядерными электростанциями, в рамках поэтапной программы развития термоядерного синтеза. Эти компании были выбраны из числа многих, представивших предложения с подробным изложением своих планов по выводу на рынок промышленных термоядерных установок, и они получают вознаграждение только после достижения заранее установленных этапов промышленного внедрения, которое будет подтверждено Министерством энергетики США. В рамках конкурса проектов «Франс 2030» одна компания получила заказ на разработку проекта термоядерного реактора на базе стелларатора.

125. В целом объемы финансирования отрасли термоядерной энергетики растут из года в год. Ежегодный доклад о термоядерной отрасли Ассоциации участников освоения термоядерного синтеза «The global fusion industry in 2023» («Мировая термоядерная энергетика в 2023 году»), который является уже третьим таким докладом, показывает, что текущие инвестиции в термоядерную энергетiku составляют в общей сложности 6,21 млрд долл. США (по сравнению с 4,8 млрд долл. США в 2022 году). В доклад были включены результаты обследования 43 частных компаний, занимающихся термоядерной энергией, — от уже зарекомендовавших себя компаний до новичков. Хотя пальму первенства в этой области по-прежнему держат Соединенные Штаты Америки, где работают 25 компаний, занимающихся термоядерной энергией (в том числе многие из крупнейших в мире), отрасль становится все более пестрой в географическом отношении: в 12 странах имеется как минимум по одной компании, занимающейся вопросами термоядерной энергии.

126. Регулирующие органы и законодатели также начинают обращать внимание на проблемы и возможности термоядерной энергии. В 2023 году Калифорния стала первым штатом Соединенных Штатов Америки, признавшим энергию термоядерного синтеза как отдельную

технологии, отличную от энергии деления ядра. На законодательном уровне были отмечены преимущества термоядерной энергии в плане безопасности и экологичности и заложена основа для будущего нормативного регулирования этой деятельности в штате. Это произошло после того, как КЯР единогласно проголосовала за то, чтобы отделить регулирование термоядерной энергетики от регулирования энергетики, основанной на делении ядра, и осуществлять регулирование термоядерных систем, которые появятся в ближайшем будущем, в рамках системы регулирования побочных материалов (как, например, в случае с ускорителями частиц).

127. Правительство Соединенного Королевства подтвердило, что все запланированные прототипы термоядерных энергетических установок в Соединенном Королевстве будут по-прежнему регулироваться Управлением по охране окружающей среды и Исполнительным органом по вопросам здравоохранения и безопасности, в отличие от АЭС, которые регулируются Управлением по ядерному регулированию.

128. Кроме того, рабочая группа по термоядерной энергии под названием «Динамичные страны», в которую входят Канада, Соединенное Королевство и Япония, а также Бахрейн и Сингапур на правах наблюдателей, подготовила совместные рекомендации, в которых признается потенциально важный вклад термоядерной энергии в решение глобальных проблем изменения климата и энергетической безопасности, а также преимущества согласованного подхода к регулированию термоядерной энергетики, взятого на вооружение рядом стран, и в которых высказываются аргументы в пользу создания ясной нормативной базы регулирования, которая будет применяться к термоядерным энергетическим установкам независимо от технологии ядерного синтеза и обеспечивать надлежащую защиту населения и окружающей среды, соразмерную опасностям термоядерной энергии, оставаясь при этом прозрачной и ориентированной на инновации.

129. Повышенный интерес вызывают также суперкомпьютеры, искусственный интеллект и «промышленная метавселенная». В 2023 году был дан старт сотрудничеству между УАЭСК, «Делл технолоджиз», «Интел» и Кембриджским университетом. Цель этого сотрудничества состоит в изучении того, каким образом суперкомпьютеры и технологии искусственного интеллекта с расширенными возможностями прогнозирования могут создать цифрового двойника сферического токамака для производства энергии (STEP) — прототипа термоядерной электростанции, созданного в Соединенном Королевстве. Кроме того, Министерство энергетики США объявило о выделении 29 млн долл. США на присуждение семи коллективных премий за научные исследования в области машинного обучения, искусственного интеллекта и информационных ресурсов, составляющих основу научных знаний об энергии термоядерного синтеза. Одна из этих семи премий была присуждена PSFC при МТИ, который получил финансовые средства в размере 5 млн долл. США на одобренный Агентством проект «Open and FAIR Fusion for Machine Learning Applications» (Программы машинного обучения по термоядерному синтезу, отвечающие принципам открытости и FAIR (легкости поиска, доступности, взаимодействия и повторного использования)). Данный проект увязан с соглашением о центре сотрудничества между МАГАТЭ и PSFC и проектом координированных исследований Агентства «Применение искусственного интеллекта для ускорения исследований и разработок в области термоядерного синтеза», техническим координатором которого является PSFC.

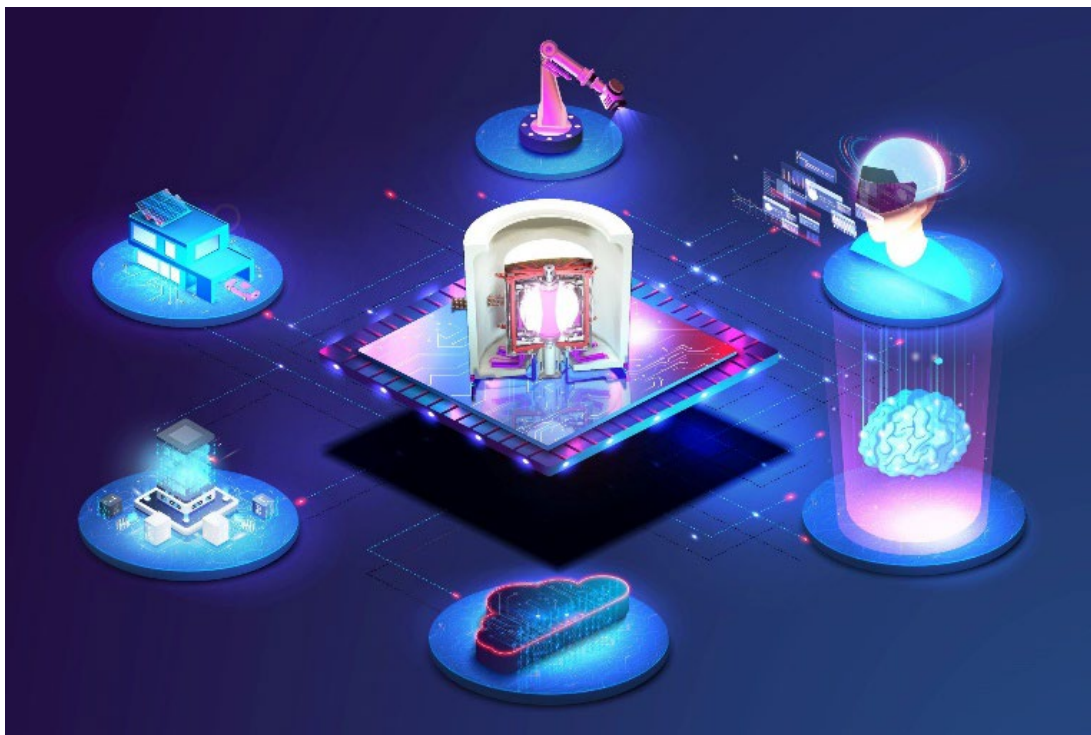


РИС. D.9. Суперкомпьютеры, искусственный интеллект и «промышленная метавселенная» помогут продвинуться вперед в создании STEP — прототипа термоядерной электростанции в Соединенном Королевстве (источник: УАЭСК).

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

Е.1. Исследовательские реакторы

Текущее состояние

130. На конец 2023 года в 54 странах насчитывалось 234 действующих исследовательских реактора, включая временно остановленные. Эти исследовательские реакторы продолжали генерировать пучки нейтронов; играть важнейшую роль облучательных установок для научных, медицинских и промышленных нужд, а также способствовать повышению качества учебно-образовательных программ. В таблице Е-1 приложения указаны наиболее распространенные виды применения исследовательских реакторов.

131. Осознание государствами-членами того, что удовлетворение большей части мирового спроса на важные медицинские радиоизотопы, такие как технеций-99m, иод-131, лютеций-177 или гольмий-166, а также испытания ядерного топлива и конструкционных материалов для будущих усовершенствованных энергетических реакторов в настоящее время обеспечиваются менее чем 10% из числа имеющихся в мире исследовательских реакторов, привело к появлению ряда проектов по созданию новых мощных и многоцелевых исследовательских реакторов. В качестве примеров можно привести завершение в ближайшее время строительства исследовательского реактора RA-10 в Аргентине и продолжающееся строительство исследовательского реактора в Киджане, Республика Корея, реактора «Жюль Горовиц» во

Франции, для которого было одобрено продолжение финансирования на цели завершения строительства, и многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах в Российской Федерации; объявление о финансировании в полном объеме и начале подготовительных строительных работ для сооружения реактора PALLAS в Нидерландах; подтверждение правительством обязательства по созданию Бразильского многоцелевого реактора в Бразилии; недавнее одобрение правительством замены 58-летнего реактора SAFARI-1 в Южной Африке.

132. В настоящее время ведется строительство в общей сложности 11 новых исследовательских реакторов, включая 1 электроядерную систему, в 10 странах: Аргентине, Многонациональном Государстве Боливия, Бразилии, Исламской Республике Иран, Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине и Франции. В 2023 году в Чешской Республике была пущена в строй новая подкритическая ядерная установка VR-2.





РИС. Е.1 а. Строительство исследовательского реактора RA-10 в Аргентине близится к завершению (источник: Национальная комиссия по атомной энергии Аргентины).



РИС. Е.1 б. В 2023 году в Чешской Республике начала работу подкритическая ядерная установка VR-2 (источник: Чешский технический университет).

133. На конец 2023 года официальные планы строительства новых исследовательских реакторов имелись у 14 государств-членов: Бангладеш, Беларуси, Бельгии, Вьетнама, Замбии, Индии, Китая, Нигерии, Нидерландов, Соединенных Штатов Америки, Таджикистана, Таиланда, Филиппин и Южной Африки. Кроме того, возможность сооружения исследовательских реакторов изучает значительное число стран: Азербайджан, Индия, Ирак, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Руанда, Сенегал, Судан, Тунис, Уганда, Филиппины и Эфиопия.

134. Продолжались международные усилия по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском секторе. После полного перехода с ВОУ на НОУ при производстве молибдена-99 в Бельгии все крупные мировые производители этого востребованного медицинского радиоизотопа с апреля 2023 года используют методы производства без участия ВОУ. На сегодняшний день в общей сложности 109 исследовательских реакторов и крупных установок по производству медицинских изотопов были переведены с ВОУ на НОУ или, согласно подтвержденным данным, были остановлены, а 6925 кг ВОУ было возвращено в страну происхождения или иным образом удалено из 48 стран (и Тайваня, Китай).

Тенденции

135. Государства-члены расширяют использование действующих исследовательских реакторов, чтобы поддержать энергетический переход и декарбонизацию в соответствии с ЦУР 7 («Недорогостоящая и чистая энергия»). Нейтронные методы, такие как нейтронная визуализация и нейтронное профилирование по глубине, используются для определения характеристик водородных топливных элементов и литий-ионных аккумуляторов. Ряд исследовательских реакторов используется для облучения и испытания конструкционных материалов и топлива — деятельности, которая необходима для разработки новых энергетических концепций ядерного деления и синтеза, а также для содействия возрождению интереса к ядерным исследованиям, разработкам и демонстрациям, имеющему место в ряде стран, включая Соединенные Штаты Америки. Реактор для нейтронной радиографии (NRAD) в Айдахской национальной лаборатории (АНЛ) служит уникальной экспериментальной площадкой для регулярного анализа высокорadioактивных образцов, что позволяет сотрудникам проводить исследования облученного ядерного топлива и конструкционных материалов, способствуя выработке инновационных технических решений в области ядерной энергетики. В 2023 году АНЛ пересмотрела свою стратегию, взяв курс на более широкое использование NRAD для содействия разработке инновационных технических решений в области ядерной энергетики.

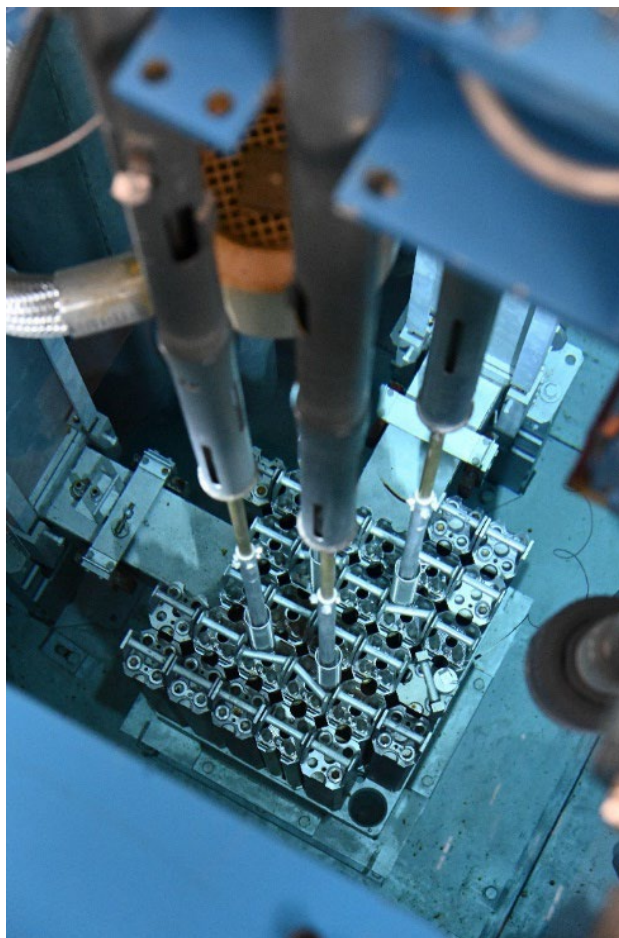


РИС. Е.2. Внешний вид активной зоны реактора NRAD с внутренним оборудованием для материаловедческих исследований в АНЛ (источник: АНЛ).

136. Расширяются также возможности исследовательского реактора МТИ для ведения более активной деятельности в области облучения материалов, имеющего отношение к ядерному делению и синтезу, в дополнение к работе АНЛ и других американских центров ядерных исследований. Агентство оказало поддержку обоим учреждениям в проектах расширения их деятельности, проведя в середине 2023 года миссии по комплексному обзору использования исследовательских реакторов.

137. Одним из важных направлений применения исследовательских реакторов остается отработка перспективных реакторных технологий. Российская Федерация готовится к строительству первого в стране исследовательского жидкосолевого реактора мощностью 10 МВт, задачей которого будет демонстрация практической осуществимости технологии топлива на основе расплава солей и сжигания минорных актинидов. Получение лицензии на строительство ожидается в 2027 году.

138. Постепенное старение парка исследовательских реакторов по всему миру побуждает операторов и регулирующие органы применять новые методы и методики оценки условий эксплуатации исследовательских реакторов в интересах обеспечения их постоянной безопасной работы. Одна из таких методик — анализ ограниченного по времени старения (АОВС), который имеет целью оценку условий эксплуатации и оставшегося срока службы конструкций, систем и элементов, особенно тех, которые требуют больших затрат на осмотр и замену и оказывают значительное влияние на эксплуатационную готовность реактора. АОВС успешно применяется для нужд ДСЭ АЭС. Операторы ряда исследовательских реакторов уже начали использовать

АОВС, чтобы обосновать продление своих лицензий на эксплуатацию. Ввиду отличий от энергетических реакторов применение АОВС на исследовательских реакторах требует соответствующего дифференцированного подхода. В настоящее время рассматривается вопрос о совместных усилиях по созданию общей методологии, применимой ко всем государствам-членам.

139. Многие страны пользуются возможностями доступа к исследовательским реакторам благодаря международным и региональным инициативам по сотрудничеству, таким как система международных центров МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов. В настоящее время существует семь таких центров на четырех континентах; последний из них был создан в Марокко в 2023 году.

Е.2. Ускорители частиц

Текущее состояние

140. Успех детальных научных исследований в любых областях — от двигателей и лекарств до пластмасс и белков — будет зависеть от того, какое количество нейтронов сможет произвести и дать в распоряжение исследователей источник нейтронов. Поэтому, помимо исследовательских реакторов, ученые и инженеры продолжали разрабатывать новое поколение источников нейтронов, основанных на ускорителях частиц и технологии мишени скальвания. В 2023 году уверенно продвигалось вперед строительство Европейского источника нейтронов скальвания (ESS) — одного из крупнейших в мире научно-технических инфраструктурных проектов. Кроме того, благодаря сотрудничеству между государствами-членами и многочисленным взносам в натуральной форме на этой установке удалось значительно приблизить срок запуска самого мощного из когда-либо построенных линейных ускорителей протонов, охлаждаемого гелием вольфрамового колеса-мишени, а также связанных с ним новейших нейтронных приборов. Среди основных рубежей, недавно достигнутых на ESS, — завершение пусконаладочных работ на ускорителе протонов и установка постоянной защиты для монолитного корпуса мишени, а также замедлителя и вращающегося колеса-мишени для получения нейтронов. Параллельно с этим был достигнут значительный прогресс в установке сложных экспериментальных устройств для 15 выбранных пучков нейтронного излучения, которые представляют наибольший интерес, и рассеивающих приборов (также называемых конечными станциями нейтронного пучка)⁵.

⁵ Веб-страница по приборам ESS: <https://europenspallationsource.se/instruments>.

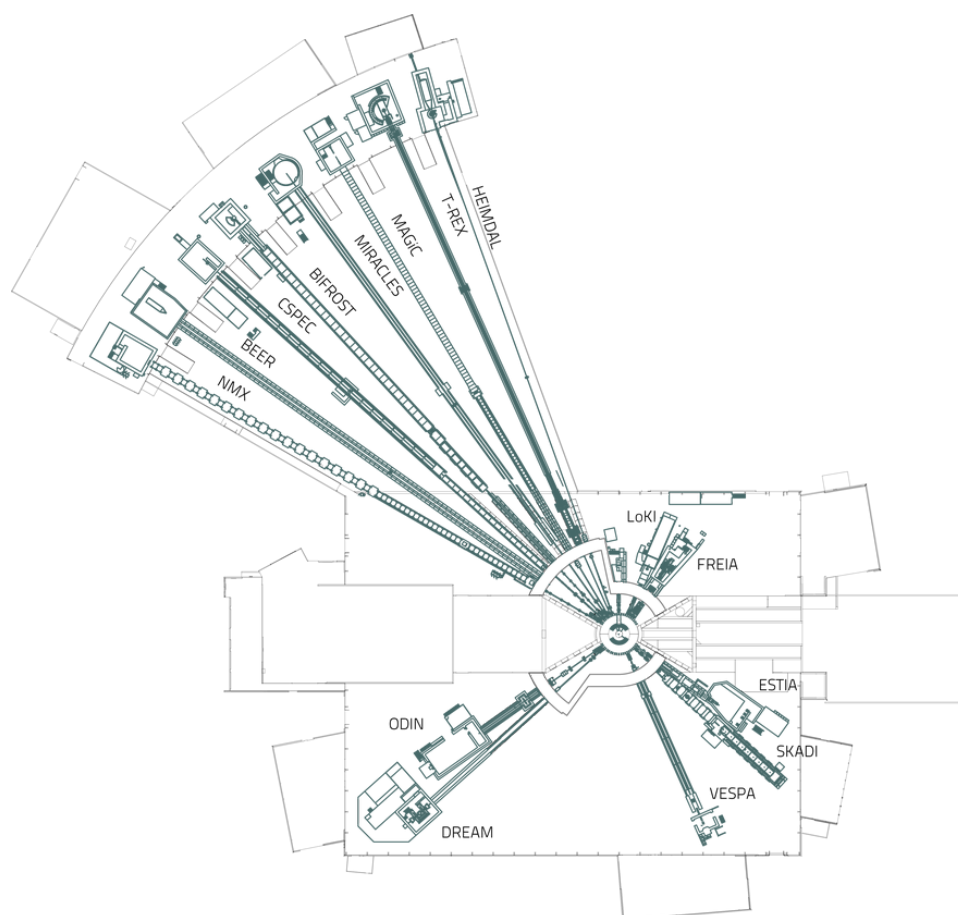


Рис. Е.3. Комплекс приборов для рассеивания нейтронов и спектроскопии, который будет иметься на источнике нейтронов следующего поколения на базе ускорителя в ESS (источник: ESS).

141. В начале 2023 года на первом заседании руководящего комитета Международной установки по облучению материалов для термоядерного синтеза — Источника нейтронов для исследований в рамках проекта DEMO (ИФМИФ-DONES)⁶, высшего руководящего органа программы ИФМИФ-DONES, было официально объявлено о начале этапа строительства ИФМИФ-DONES в Эскусаре, Гранада, Испания. Это крупная веха в развитии международной программы термоядерного синтеза, базирующейся на трех основных элементах: ИТЭР, DEMO и ИФМИФ-DONES⁷. Эта установка, состоящая из современного ускорителя, мишени из жидкого лития и модуля для испытаний под облучением, даст DEMO необходимые экспериментальные данные для облучения материалов и откроет возможности для проведения испытаний в сопоставимых условиях облучения. Параллельно с сооружением инфраструктуры проводились мероприятия по поощрению и активизации сотрудничества по линии проектов научных исследований, разработок и инноваций в области термоядерного синтеза и других смежных научно-технических областях, таких как производство радиоизотопов и измерение ядерных данных.

⁶ <https://fusion.bsc.es/index.php/2023/04/13/ifmif-dones-starts-construction-phase/>

⁷ Домашняя страница ИФМИФ-DONES: <https://ifmif-dones.es/>

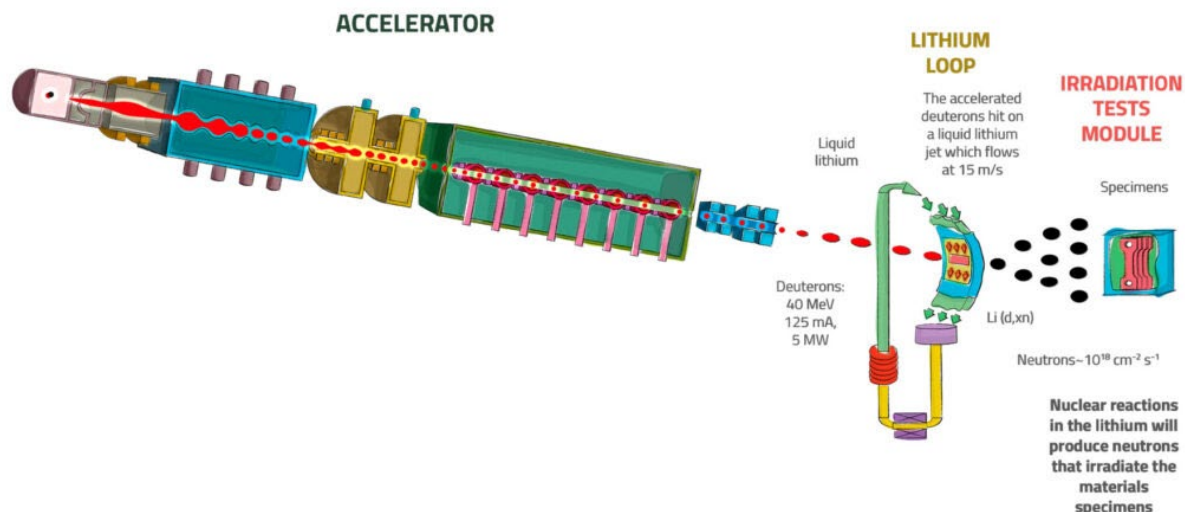


Рис. Е.4. Схема установки ИФМИФ-DONES, включающей в себя мощный ускоритель дейтронов, мишень в виде петли из жидкого лития для получения высокоэнергетических нейтронов и модуль для испытания материалов под облучением (источник: ИФМИФ-DONES).

Тенденции

142. Ускорители частиц играют ключевую роль в субклеточной визуализации и облучении для лечения онкологических заболеваний. Для нужд медицинской диагностики регулярно используется широкий спектр методов визуализации, таких как ультразвук, компьютерная томография и магнитно-резонансная визуализация. По мере того как методы манипулирования с ионным и рентгеновским излучением становятся все более сложными, появляется возможность фокусировать ионные или рентгеновские пучки с точностью до нанометра. Благодаря сканированию таким микроскопическим лучом артефакта в сочетании с использованием различных детекторных систем все более важное значение приобретает не только получаемая аналитическая информация, но и изображение артефакта как таковое. С появлением новых методов мультиспектральной визуализации стали возможны идентификация пигментов, обнаружение скрытых под картиной эскизов и даже выявление внутренней структуры старинных свитков. Кроме того, как и в медицинской визуализации для диагностических целей, разрабатываются сложные методы обработки изображений, основанные на машинном обучении, чтобы улучшить визуализацию артефакта или даже его недостающих деталей.



РИС. Е.5. Полученное в Австралии методом синхротронной рентгеновской флуоресцентной микроскопии высокой четкости изображение герцога Козимо Медичи кисти Бронзино XVI века (слева) позволило выявить портрет под ним, а также неинвазивным способом обнаружить и отметить на схеме металлы в пигментах краски (справа). Карта распределения элементов свинца (Pb) четко показывает оригинальную картину, например, вокруг головы и плеча (а также указывает на глаз другого человека под ней) (источник: Художественная галерея Нового Южного Уэльса (слева), Австралийская организация по ядерной науке и технике (в центре и справа)).

143. Последняя тенденция в области визуализации объектов наследия — применение гибридной визуализации в сочетании с обработкой изображений. Существует и некоторое дополнительное сходство с медицинской визуализацией: например, и пациенты, и артефакты требуют бережного к себе отношения, а доза радиации, применяемая для облучения или для анализа, принципиально важна для того, чтобы минимизировать возможные радиационные повреждения с целью получения максимального эффекта от лучевой терапии или сбора важнейшей аналитической информации. Поэтому медицинское применение — это серьезный побудительный мотив для проведения научно-технических исследований в области ускорителей, связанных с точной и контролируемой доставкой дозы частиц/рентгеновского излучения⁸. Такие требования в области медицины, наряду с мультиспектральной визуализацией, радикально меняют и возможности визуализации объектов наследия⁹.

Е.3. Ядерные контрольно-измерительные приборы

Текущее состояние

144. Наряду с традиционными ранцами и беспилотниками с контрольно-измерительной аппаратурой, множество преимуществ в области радиационного картирования дает использование беспилотных наземных транспортных средств (БПНТС). Эти наземные платформы могут быть самых разных форм: наибольшее распространение получили шагающие роботы и роботы на колесном и гусеничном ходу. БПНТС могут быть специально сконструированы так, чтобы выдерживать высокую мощность дозы, что позволяет им выполнять такие задачи, как демонтаж и вывод из эксплуатации ядерных установок. Роботы могут работать в одном из двух режимов: они могут быть дистанционно управляемыми (телеуправляемыми) или

⁸ Bertrand, L. et al. Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects. TrAC Trends in Analytical Chemistry, Volume 164 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078>

⁹ Gibson, AP. Medical imaging applied to heritage. The British Journal of Radiology 96, No 1152 (2023). <https://doi.org/10.1259/bjr.20230611>

действовать автономно, используя специально приспособленные датчики и сложные алгоритмы. Вне помещений иногда в дело вступает спутниковая навигация, но преобладающей тенденцией является одновременная локализация и картирование при помощи лазерной системы обнаружения и измерения дальности (ЛИДАР), которая также может использоваться в помещениях. В настоящее время для обеспечения автономной навигации могут использоваться средства локализации, имеющиеся на рынке. Набор датчиков, обычно применяемых в этой области, включает в себя ЛИДАР, радары, системы RGB, камеры глубины и тепловизоры, а также различные измерители мощности дозы, спектрометры и другие системы обнаружения излучений. В настоящее время наблюдается тенденция к слиянию данных об исследуемом месте: этот метод предполагает объединение нескольких источников данных для обогащения радиационных измерений контекстной информацией. Обработка данных может выполняться в режиме реального времени — с помощью бортовых компьютеров либо удаленных станций, — что требует потоковой передачи соответствующих данных на местные наземные станции управления или в облако. В качестве альтернативы информация может собираться регистраторами данных для последующей обработки.

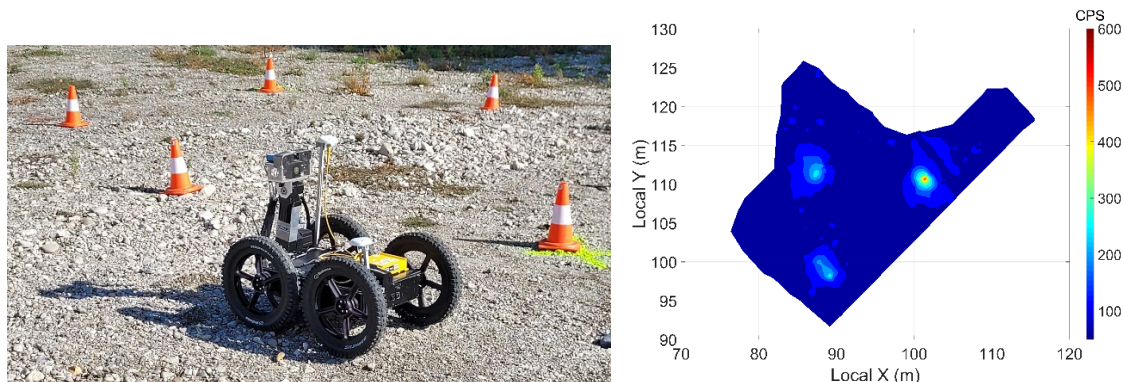


РИС. Е.6. БПНТС с контрольно-измерительной аппаратурой, используемое в ходе учебного семинара-практикума в Лаборатории ядерной науки и приборов в Зайберсдорфе, Австрия (слева), вместе с полученной радиационной картой «горячих зон» (справа). CPS означает количество импульсов в секунду (источник: МАГАТЭ).

Тенденции

145. В качестве неотъемлемой части систем сбора данных с детекторов излучений (СДД) все чаще используются программируемые пользователем вентиляльные матрицы (ППВМ). Они служат самым разным целям — от настройки параметров СДД и потоковой передачи/маршрутизации данных до тонкой дискриминации сигналов или даже полной реконструкции событий. В основе более сложных функций лежат применяемые алгоритмы обработки данных — обычные или базирующиеся на использовании искусственного интеллекта. Одним из таких примеров является реализация алгоритмов дискриминации гамма-лучей и нейтронов в системных приложениях, встроенных в ППВМ. Смешанные поля излучения встречаются во многих областях практического применения ионизирующих излучений, где невозможно обойтись без детекторов с дискриминационной способностью. Например, вместо традиционного метода определения формы импульса во временной области можно применить алгоритмы, которые могут работать в частотной области. Тщательно выбрав соответствующий значимый показатель, можно ускорить анализ, необходимый для определения формы импульса (и поля излучения) (см. рис. Е.7). Это привело к применению таких алгоритмов в режиме реального времени, и их реализация в современных системах СДД стала тенденцией последних лет, причем они применяются в самых разных областях — от ядерных наук и физической ядерной безопасности до радиационной защиты и медицинской физики. Более того,

распространение высокоуровневого синтеза, т.е. возможности кодирования платы ППВМ на языке высокого уровня, сделало ППВМ доступными для большего числа разработчиков.

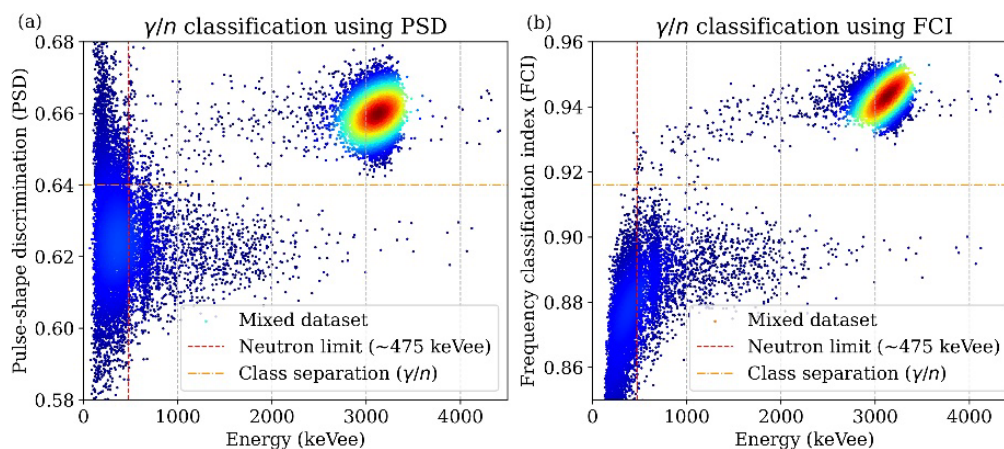


РИС. Е.7. Сравнение разделения γ/n с традиционной дискриминацией по форме импульса (слева) и с индексом классификации по частотам (справа), где последний демонстрирует более высокую дискриминационную способность во всем диапазоне энергий.

Экспериментальные данные были получены на установке для нейтронных исследований МАГАТЭ в Зайберсдорфе, Австрия (источник: Morales, I. R. et al., *Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications*)¹⁰.

Г. Атомные и ядерные данные

Текущее состояние

146. Ввиду постоянного совершенствования кодов ядерного моделирования создание ИТЭР предполагает более активное использование цифровых баз ядерных и атомных данных. Если говорить о физике нейтронов и активации материалов, то речь идет об использовании Библиотеки оцененных ядерных данных для термоядерного синтеза, а для атомных взаимодействий в термоядерной плазме ИТЭР использует базу данных CollisionDB.

Тенденции

147. В рамках ИТЭР различные государства-члены расходуют больше времени и средств на то, чтобы получить высококачественные данные о гамма-взаимодействиях. Основные области применения таких данных — активный нейтронный опрос, более точные оценки гамма-нагрева в экранировании атомных реакторов и термоядерных устройств, а также инновации, связанные с освоением космоса. Чтобы получить высококачественные данные о гамма-взаимодействиях, старые базы ядерных данных, содержащие данные о гамма-реакциях, должны быть пополнены более современной экспериментальной и теоретической информацией. Для этого в настоящее время предпринимаются новые усилия по оценке ядерных данных.

148. Существенное влияние на ядерные данные также оказывает быстро растущий мировой спрос на медицинские радиоизотопы как в диагностических, так и в лечебных целях. Необходимо значительно более точный структурный анализ производственного процесса, в частности оптимизированных путей производства изотопов с минимальным уровнем примесей.

¹⁰ Morales, I. R. et al. Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications. Nuclear Engineering and Technology (2023). <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.013>

Проведение более точного структурного анализа производства требует дальнейших усилий со стороны специалистов по экспериментальной ядерной физике и теоретическому моделированию ядерных реакций.

Г. Применение искусственного интеллекта в ядерной энергетике и ядерном топливном цикле

Текущее состояние

149. Под искусственным интеллектом (ИИ) в широком смысле понимаются различные технологии, которые разрабатывались на протяжении десятилетий. ИИ открывает широкие возможности для совершенствования производства энергии с помощью ядерных технологий. Сложные системы ИИ решают задачи и принимают решения, используя аналог человеческой логики. Благодаря своей способности повышать эффективность, расширять автоматизацию, укреплять безопасность, оптимизировать прогнозное техническое обслуживание и другие процессы, ИИ уже находит применение в ряде отраслей в ядерной сфере.

150. Приложения на основе ИИ используются на действующих АЭС и установках топливного цикла. В настоящее время эти приложения не зависят от систем, процессов или функций, связанных с безопасностью. Например, в случае приложений для неразрушающего контроля это позволяет обеспечить повышение скорости и точности проверок, информирование лиц, принимающих решения, об оптимальном проектировании загрузки активной зоны, и оптимизацию сложных графиков технического обслуживания во время остановов. Другие приложения ИИ дают возможность улучшенной оценки и оптимизации усовершенствованных конструкций ядерных компонентов благодаря кодам и математическим моделям, созданным при помощи ИИ.

151. Текущие направления работ, касающиеся безопасности, защищенности и надежности ИИ, ориентируются на выявление возможных рисков и последствий сбоя, «объясняемость» результатов, их достоверность, а также этические соображения, которые необходимо принимать во внимание при дальнейшем внедрении ИИ. Сценарии развертывания ИИ в будущем, затрагивающие цифровые системы или процессы на установках, могут повлечь за собой определенные последствия с точки зрения ядерной безопасности или физической безопасности атомной электростанции. Кроме того, как это принято и для других цифровых систем, параллельно с различными сценариями применения разрабатываются соответствующие меры для обеспечения валидации и кибербезопасности. Заинтересованные организации занимают активную позицию в вопросах регламентирования применения ИИ на ядерных и радиационных объектах.

Тенденции

152. ИИ все чаще применяется при проектировании и эксплуатации промышленных объектов ядерной энергетике и ядерного топливного цикла. Это может способствовать повышению безопасности, эксплуатационной эффективности и экономичности, а также развитию передовых ядерных технологий. Системы на основе ИИ помогают в анализе больших наборов данных, собираемых в процессе эксплуатации, в интересах повышения эксплуатационной надежности и предотвращения несчастных случаев. Эти достижения способствуют повышению устойчивости и конкурентоспособности ядерной энергетике на современном энергетическом рынке.

153. ИИ используется различными способами для повышения безопасности, эффективности и экономичности ядерной отрасли. Что касается безопасности и технического обслуживания, то ИИ применяется для прогнозирования отказов оборудования, анализа данных датчиков и оптимизации графиков технического обслуживания с целью сократить время простоя и повысить уровень безопасности. Например, отдельные алгоритмы машинного обучения в настоящее время могут применяться для обнаружения аномалий и совершенствования систем раннего предупреждения. ИИ также все чаще используется для эффективного выявления низкоуровневых корреляций между событиями (в том числе повторяющимися) в исторических неструктурированных источниках данных и документах. Такой подход позволяет выявить системно повторяющиеся события, по которым не были приняты корректирующие меры, а также на порядок сократить время поиска значимых событий (расследование нарушений, отклонений, существенных дефектов и т.д.).

154. Исследования и разработки в области применения ИИ продемонстрировали свой потенциал для эффективной оптимизации конструкции активной зоны, определяющей проектный облик энергетических реакторов и усовершенствованных ядерных реакторов. Решения, основанные на применении ИИ, могут быть полезны в контексте оптимизации схемы загрузки топлива и увеличения продолжительности топливной кампании. Это может дать результаты в виде повышения выходной мощности, минимизации образования отходов и снижения эксплуатационных затрат. Кроме того, ИИ имеет потенциал применения при проектировании усовершенствованных ядерных реакторов и установок топливного цикла — с его помощью моделируются сложные физические процессы, благодаря чему можно оптимизировать проектные решения и сокращать сроки разработки.

155. ИИ все чаще используется при анализе видеоданных, помогая эксплуатационному персоналу обеспечивать безопасность на производственных объектах и действующих установках. Это касается как механизмов контроля средств индивидуальной защиты, так и безопасности персонала на площадке.

Н. Здоровье человека

Н.1. Неинвазивная оценка пищеварительной функции кишечника: оптимизированный дыхательный тест с применением ¹³C-сахарозы

Положение дел

156. Один из самых актуальных вопросов питания в рамках общественного здравоохранения — почему у детей в странах с низким и средним уровнем дохода (СНСД) наблюдается задержка роста (слишком низкий рост для своего возраста), несмотря на многочисленные меры, принимаемые в области общественного здравоохранения, включая введение в рацион пищевых добавок и улучшение санитарного состояния воды. В последнем совместном докладе учреждений системы Организации Объединенных Наций о продовольственной безопасности и питании указывается, что задержка в росте наблюдается примерно у 150 млн детей в возрасте до пяти лет, что имеет тяжелые последствия для их психомоторного развития и повышает риск

хронических заболеваний в более старшем возрасте¹¹. Хотя факторы, обуславливающие задержку роста, сложны и изучены недостаточно, у детей, живущих в СНСД в антисанитарных условиях, ее все чаще связывают с кишечной дисфункцией, вызванной факторами окружающей среды (КДОС), которая характеризуется системным и хроническим нарушением структурной целостности и функции кишечника¹². Задержку роста могут вызывать разные проявления КДОС, включая повышенную проницаемость кишечника, воспаление и снижение усвоения питательных веществ (мальабсорбция)². Диагностические критерии КДОС проработаны недостаточно, и наиболее надежные результаты достигаются путем проведения инвазивной биопсии для диагностики повреждения кишечника. В большинстве СНСД, где распространена КДОС, такой подход не является ни практически осуществимым, ни этически обоснованным.

157. Дыхательные тесты, которые применяются в сфере здравоохранения, в частности в гастроэнтерологии, являются неинвазивными и могут применяться во всех возрастных группах, в том числе и среди детей¹³. Обычно в дыхательных тестах используется водород (H₂), метан (CH₄) и меченный углеродом-13 (¹³C) углекислый газ (¹³CO₂). Дыхательные тесты с применением H₂ и CH₄ проводятся в основном для оценки общей мальабсорбции углеводов^{3, 14}, в то время как дыхательные тесты с ¹³C используются для оценки самых разных гастроэнтерологических симптомов, поскольку в них используются специальные молекулы, меченные ¹³C, которые связаны с конкретными функциями и применяются для измерения содержания в выдыхаемом воздухе ¹³CO₂ как конечного продукта метаболизма. В клинической практике широко применяется ¹³C-дыхательный тест с использованием ¹³C-мочевины для обнаружения бактерии *Helicobacter pylori*¹⁵. Однако дыхательные тесты в основном применяются только в клинических условиях и имеют лишь ограниченное применение в области питания в рамках общественного здравоохранения.

158. Дыхательный тест с применением ¹³C-сахарозы (¹³C-SBT) ранее применялся для изучения усвоения сахарозы на фоне врожденного дефицита сукразы-изомальтазы¹⁶. Обогащение выдыхаемого углекислого газа углеродом-13 (¹³C) после приема внутрь ¹³C-сахарозы говорит о нарушении способности кишечника переваривать сахарозу, что свидетельствует о снижении активности в двенадцатиперстной кишке сукразы-изомальтазы (фермента в кишечнике, который расщепляет сахарозу на глюкозу и фруктозу, после чего они усваиваются и метаболизируются) (рис. Н.1 и Н.2). ¹³C-SBT используется также для выявления потребления с пищей добавленного

¹¹ Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, Международный фонд сельскохозяйственного развития, Детский фонд Организации Объединенных Наций, Всемирная продовольственная программа и Всемирная организация здравоохранения. Положение дел в области продовольственной безопасности и питания в мире — 2023. Урбанизация, преобразование агропродовольственных систем и здоровый рацион питания в сельско-городском континууме, ФАО, Рим (2023).

¹² Owino, V., et al., Environmental Enteric Dysfunction and Growth Failure/Stunting in Global Child Health, *Pediatrics*. 138 6 (2016).

¹³ Broekaert, I.J., et al., An ESPGHAN Position Paper on the Use of Breath Testing in Paediatric Gastroenterology, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 74 1 (2022) 123–37.

¹⁴ Hammer, H.F., et al., European guideline on indications, performance, and clinical impact of hydrogen and methane breath tests in adult and pediatric patients: European Association for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Neurogastroenterology and Motility, and European Society for Paediatric Gastroenterology Hepatology and Nutrition consensus, *United European Gastroenterology Journal*. 10 1 (2022) 15–40.

¹⁵ Keller, J., et al., European guideline on indications, performance and clinical impact of ¹³C-breath tests in adult and pediatric patients: An EAGEN, ESNM, and ESPGHAN consensus, supported by EPC, *United European Gastroenterology Journal*. 9 5 (2021) 598–625.

¹⁶ Robayo-Torres, C.C., et al., ¹³C-breath tests for sucrose digestion in congenital sucrase isomaltase-deficient and sacrosidase-supplemented patients, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 48 4 (2009) 412–8.

сахара у крыс¹⁷. Б. К. Ритчи с коллегами первыми применили ^{13}C -СВТ для оценки КДОС у австралийских детей с диареей¹⁸. В этом исследовании дети-аборигены с острой диареей и без нее, а также контрольная группа здоровых детей не из числа аборигенов принимали дозу естественно обогащенной сахарозы (полученной из кукурузы, которая в некоторой степени обогащена изотопом ^{13}C по сравнению со свекольным сахаром). Показатели восстановления $^{13}\text{CO}_2$ через 90 минут у детей-аборигенов с диареей были ниже по сравнению с детьми без диареи; у здоровых детей не из числа аборигенов показатели восстановления $^{13}\text{CO}_2$ были еще выше. Однако этот тест был не совсем точным, главным образом потому, что сигнал, издаваемый изотопом ^{13}C , содержащимся в кукурузной сахарозе, даже при очень больших дозах сахарозы недостаточно силен по сравнению с варьирующимся естественным фоном изотопа ^{13}C , содержащегося в больших количествах (около 1,1%)^{19, 20}.

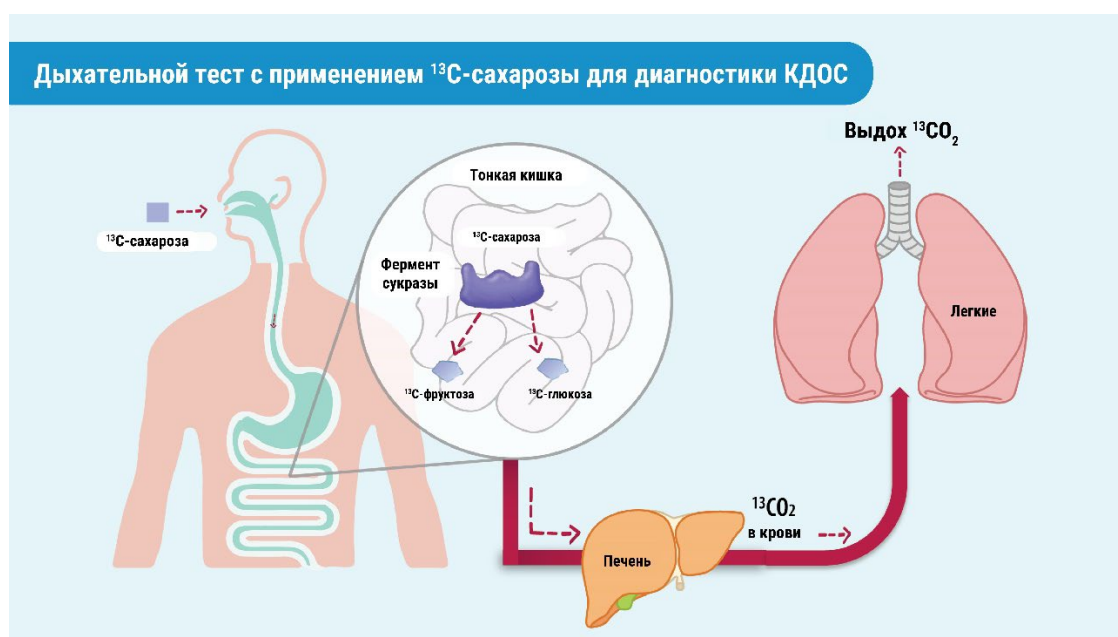


РИС. Н.1. Человек потребляет точно взвешенную дозу сахарозы, меченной изотопом ^{13}C , растворенной в небольшом количестве воды. ^{13}C -сахароза транспортируется через кишечный эпителий в щеточную кайму, где она гидролизуется ферментом суказы-изомальтазой на ^{13}C -фруктозу и ^{13}C -глюкозу, которые попадают в кровоток и транспортируются в печень, где они расщепляются с разной скоростью для получения энергии с выделением выдыхаемого $^{13}\text{CO}_2$. Процент восстановления ^{13}C в $^{13}\text{CO}_2$ по отношению к исходному ^{13}C в меченой сахарозе является показателем всасывательной способности кишечника и коррелирует с активностью суказы-изомальтазы (иллюстрация: МАГАТЭ).

¹⁷ Yazbeck, R., et al., Breath $^{13}\text{CO}_2$ -evidence for a noninvasive biomarker to measure added refined sugar uptake, Journal of Applied Physiology. 130 4 (2021) 1025–32.

¹⁸ Ritchie, B.K., et al., ^{13}C -Sucrose Breath Test: Novel Use of a Noninvasive Biomarker of Environmental Gut Health, Pediatrics. 124 2 (2009) 620–6.

¹⁹ International Atomic Energy Agency, New approaches for stable isotope ratio measurements Proceedings of an Advisory Group meeting held in Vienna, 20–23 September 1999, IAEA-TECDOC-1247, IAEA, Vienna (2001).

²⁰ Butler, R.N., et al., Stable Isotope Techniques for the Assessment of Host and Microbiota Response During Gastrointestinal Dysfunction, Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition. 64 1 (2017) 8–14.



РИС. Н.2. У детей старшего возраста и взрослых дыхательные пробы собираются путем выдыхания в мешок для забора дыхательных проб, как показано на рисунке. Для сбора дыхательных проб у младенцев и маленьких детей к мешку прикрепляется маска (иллюстрация: МАГАТЭ).

159. Для повышения чувствительности теста ^{13}C -SBT можно использовать высокообогащенную сахарозу (99%)²¹. В рамках проекта координированных исследований (ПКИ) Агентства «Применение методов стабильных изотопов для оценки кишечной дисфункции, вызванной факторами окружающей среды, и понимания ее влияния на рост ребенка» девяти странам было оказано содействие в оптимизации и применении ^{13}C -SBT для оценки КДОС и понимания ее влияния на рост ребенка. На первом этапе проекта²² были проведены оптимизация и валидация теста путем сравнения результатов, полученных при применении сахарозы, обогащенной в естественных условиях в Соединенном Королевстве, и индикаторов на основе высокообогащенной сахарозы. Оптимизированный тест применяли на детях с целиакией в Австралии и сравнивали с результатами биопсии у взрослых жителей Замбии и результатами теста на проницаемость кишечника у детей из Перу. На втором этапе проекта тест использовался в рамках поперечных исследований в Бангладеш, Замбии, Индии, Кении, Перу и на Ямайке для оценки КДОС у детей в возрасте 12–15 месяцев.

Тенденции

160. ^{13}C -SBT — это неинвазивный дыхательный тест для измерения повреждения тонкого кишечника при КДОС, при котором внутрь принимается доза ^{13}C -сахарозы. Валидационные исследования в Замбии и Соединенном Королевстве показали, что небольшая доза высокообогащенной ^{13}C -сахарозы может применяться для точной оценки активности ферментов щеточной каймы, в частности активности сукказы-изомальтазы, присутствующей в кишечнике¹¹. Однако у этого теста есть недостаток: его результаты не были напрямую связаны с основными биологическими процессами в кишечнике. Поэтому исследователи работают над созданием

²¹ Schillinger, R.J., et al., ^{13}C -sucrose breath test for the non-invasive assessment of environmental enteropathy in Zambian adults, *Frontiers in Medicine*. 9 (2022).

²² Lee, G.O., et al., Optimisation, validation and field applicability of a ^{13}C -sucrose breath test to assess intestinal function in environmental enteropathy among children in resource poor settings: study protocol for a prospective study in Bangladesh, India, Kenya, Jamaica, Peru and Zambia, *BMJ Open*. 10 11 (2020).

новых механистических моделей, чтобы лучше понять динамику метаболизма в кишечнике²³. Эти модели говорят о том, что важно различать процессы метаболизма фруктозы и глюкозы, присутствующих в ¹³C-сахарозе. Для более точного воспроизведения биологических механизмов, задействованных в ¹³C-SBT, рекомендуется использовать ¹³C-сахарозу, меченную глюкозой. Для получения более полных результатов ¹³C-SBT можно применять в комбинации с другими тестами, чтобы охватить дополнительные области КДОС помимо усваивания сахарозы.

Н.2. Обеспечение качества: новые разработки в сфере брахитерапии

Положение дел

161. Рак шейки матки по-прежнему представляет собой серьезную проблему — это четвертая по распространенности разновидность рака среди женщин во всем мире. В 2020 году около 90% новых случаев заболевания и смертельных исходов пришлось на СНСД²⁴. Инициатива МАГАТЭ «Лучи надежды» направлена на повышение доступности услуг по лечению рака, и особое внимание в рамках этой инициативы уделяется Африке, где 70% населения не имеет доступа к услугам лучевой терапии. На первом этапе инициативы основное внимание уделяется семи странам — Бенину, Демократической Республике Конго, Кении, Малави, Нигеру, Сенегалу и Чаду, — в которых рак шейки матки является либо первой, либо второй по распространенности разновидностью рака среди женщин. Инициатива направлена на решение проблем, связанных с раком шейки матки, путем повышения осведомленности, организации подготовки кадров и создания потенциала, а также повышения доступности лечения и ухода.



РИС. Н.3. В ходе 67-й сессии Генеральной конференции на параллельном мероприятии, посвященном инициативе «Лучи надежды», было официально создано пять опорных центров (фото: МАГАТЭ).

²³ Brouwer, A.F., et al., Mechanistic inference of the metabolic rates underlying ¹³C breath test curves, Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics. 50 3 (2023) 203–14.

²⁴ Sung, H., et al., Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, CA Cancer Journal for Clinicians. 71 (2021) 209–49.

162. Лечение рака шейки матки требует сочетания хирургического вмешательства, химиотерапии и лучевой терапии. Ключевую роль в лечении этого заболевания играет брахитерапия — жизненно важный компонент лучевой терапии, и на сегодняшний день уже получен большой объем данных, подтверждающих взаимосвязь между подводимой дозой и клиническим эффектом. Однако, поскольку брахитерапия предполагает использование значительно более высоких доз, чем дистанционная лучевая радиотерапия, в этой связи возникает уникальная терапевтическая проблема: необходима тщательная оптимизация процедур брахитерапии, чтобы избежать неблагоприятных клинических проявлений из-за недостаточной или избыточной дозировки.

163. Решающее значение для эффективности и безопасности этого метода лечения имеет обеспечение единообразия подводимых доз. Это может также укрепить доверие общественности к брахитерапии, которое было подорвано из-за инцидентов в прошлом, включая один случай летального исхода, который был отнесен на счет человеческой ошибки. Дозиметрические аудиты могут помочь избежать инцидентов с катастрофическими последствиями и свести к минимуму систематические вариации дозировки.

164. С момента своего создания в 1969 году в рамках программы почтового дозиметрического аудита Агентство в своей Дозиметрической лаборатории предоставляет услуги по аудиту различных технологий лучевой терапии, которыми пользуются государства-члены, не имеющие возможности проводить такие аудиты на национальном уровне. Эта важнейшая услуга внесла значительный вклад в обеспечение безопасности методов лучевой терапии во всем мире и принесла пользу миллионам онкобольных.

165. Что касается брахитерапии, то здесь также накапливаются проблемы с обучением и подготовкой кадров, которые усугубляются по причине усложнения технологии и нехватки учебного оборудования. У СНСД практически нет возможности готовить необходимые людские ресурсы, способные использовать этот метод безопасным и эффективным образом.

166. Для устранения этого пробела в навыках экономически эффективным способом Агентство использует инновационные инструменты виртуальной реальности. Оно разработало материалы электронного обучения процедурам гинекологической брахитерапии в трехмерной учебной среде с применением технологии виртуальной реальности (рис. Н.4). Для участников обучения эта технология является альтернативой практике брахитерапии на реальных пациентах, помогая повысить эффективность лечения рака шейки матки, особенно в условиях нехватки ресурсов.



РИС. Н.4. Новый модуль электронного обучения Агентства по процедурам гинекологической брахитерапии, рассчитанный на использование гарнитуры виртуальной реальности (фото: МАГАТЭ).

Тенденции

167. В 2021 году Агентство начало ПКИ «Разработка методологии дозиметрического аудита в брахитерапии», целью которого является разработка методологии дозиметрического аудита, включающего три уровня сложности для проверки клинической практики. Эта методология принесет пользу странам, обеспечив безопасное и эффективное лечение онкогинекологических заболеваний. На сегодняшний день разработан базовый уровень аудита для оценки точности важнейшего дозиметрического параметра — стандартной мощности кермы в воздухе. Был также создан простой, легкий и недорогой фантом, подходящий для дистанционного почтового дозиметрического аудита (рис. Н.5).

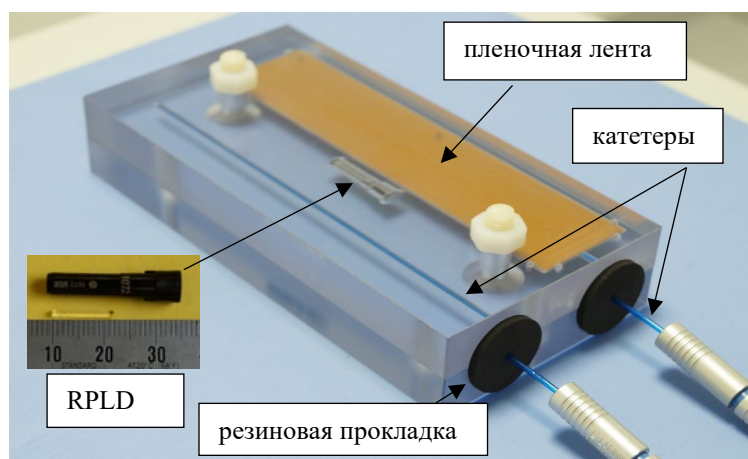


РИС. Н.5. Простой, легкий и недорогой фантом, разработанный в Дозиметрической лаборатории Агентства и используемый для аудита брахитерапии (RPLD — радиофотолюминесцентный дозиметр) (фото: МАГАТЭ).

168. Методология прошла испытания в десяти странах-участницах (Бразилия, Греция, Индия, Исламская Республика Иран, Китай, Мексика, Российская Федерация, Соединенное Королевство, Хорватия и Южная Африка) с различными клиническими условиями, что гарантирует ее надежность. Благодаря столь многообещающим результатам пилотного проекта услуга аудита брахитерапии вскоре будет доступна в рамках реализуемой Агентством программы почтового дозиметрического аудита.

169. Исследования, ведущиеся в настоящее время в рамках ПКИ, также направлены на разработку методологии для более сложного аудита. Благодаря сквозному аудиту больницы смогут использовать собственные аппликаторы и таким образом проводить весь процесс лечения самостоятельно. Это нововведение, в свою очередь, повысит доверие к клинической практике брахитерапии, обеспечив безопасность пациентов и качество лечения.

170. Преимущества нового инструмента виртуальной реальности Агентства для целей обучения и подготовки кадров в области брахитерапии были продемонстрированы в июле 2023 года на семинаре-практикуме Агентства в Мозамбике. Специалистам из этой страны удалось освоить различные процессы, связанные с гинекологической брахитерапией, до внедрения этого метода в клиническую практику (рис. Н.6). Кроме того, более 150 радиационных онкологов, медицинских физиков, дозиметристов и специалистов по лучевой терапии со всей Африки практиковались в работе с этим инструментом на семинаре-практикуме Агентства по электронному оконтуриванию в рамках 14-й Международной конференции по раковым заболеваниям в Африке, которую Африканская организация профессиональной подготовки и исследований по проблемам рака провела в ноябре 2023 года в Сенегале.



РИС. Н.6. Медицинские работники (медицинский физик и радиационный онколог) в Мозамбике обучаются брахитерапии с помощью нового инструмента виртуальной реальности Агентства (фото: МАГАТЭ).

171. Инструмент виртуальной реальности Агентства — это крайне ценная технология, которая расширяет доступ к высококачественной подготовке медицинских работников и помогает им приобрести навыки в интерактивном формате. Она может помочь преодолеть физические, географические и логистические ограничения и способствовать подготовке высококвалифицированных, профессиональных специалистов в сфере медицинской онкологии, что в конечном счете положительно отразится на здоровье и благополучии населения всех стран.

Н.3. Заглянуть в самое сердце: решающая роль ядерной визуализации в выявлении амилоидоза сердца

Положение дел

172. Сердечная недостаточность возникает, когда сердцу становится трудно эффективно перекачивать кровь, что вызывает дефицит кислорода и питательных веществ в тканях и органах тела. Это может проявляться в таких симптомах, как усталость, одышка и задержка жидкости. В тяжелых случаях сердечная недостаточность может привести к опасным для жизни осложнениям. Раннее выявление этого заболевания и правильная терапия играют ключевую роль в улучшении результатов и снижении риска осложнений.

173. Обычно различают два основных вида сердечной недостаточности в зависимости от фракции выброса (ФВ) — процентной доли крови, выбрасываемой с каждым ударом сердца. Например, ФВ 60% означает, что при каждом сокращении сердца оно выталкивает 60% крови. Нормальное значение ФВ обычно составляет от 50% до 70%, однако этот показатель может незначительно варьироваться в зависимости от клинических рекомендаций и метода визуализации, используемого для измерения. ФВ ниже диапазона нормальных значений указывает на снижение способности сердца эффективно перекачивать кровь, что является общим признаком сердечной недостаточности.

174. При сердечной недостаточности с низкой фракцией выброса (СНнФВ) сердечная мышца ослаблена, и сердце перекачивает кровь менее эффективно. У людей с этим заболеванием ФВ обычно ниже 40%. При сердечной недостаточности с сохраненной фракцией выброса (СНсФВ) сердце перекачивает кровь нормально, но сердечная мышца слишком жесткая и между ударами не расслабляется так, как должна. Нормальная или почти нормальная ФВ обычно равна или превышает 50%. Поскольку есть различные причины сердечной недостаточности и стратегии ведения пациентов, эта классификация помогает выработать подходы к лечению. Следует отметить, что сердечная недостаточность — это комплексное заболевание, у которого могут быть разные первопричины и способствующие факторы.

175. СНсФВ часто вызывается сочетанием факторов. К распространенным причинам развития этого заболевания относят гипертонию, которая может привести к утолщению и снижению эластичности сердечной мышцы; старение, которое может повлиять на структуру и работу сердца; сахарный диабет, который может способствовать снижению эластичности сердечной мышцы; ожирение, в частности абдоминальное ожирение; коронарную болезнь сердца, в результате которой уменьшается приток крови к сердечной мышце из-за сужения или закупорки коронарных артерий. В последние пять лет повышенное внимание уделяется такому важному фактору, как транстиретиновая амилоидная кардиомиопатия (АТТР-КМП) — нарушению, которое характеризуется амилоидными (белковыми) отложениями в тканях сердца. По оценкам, им страдают 13–18% взрослых старше 65 лет с сердечной недостаточностью, а медиана выживаемости составляет 25–41 месяц.

176. Последние достижения в области медицинских исследований и терапевтических стратегий открыли новую эру, подарив надежду больным с амилоидозом сердца. Появившиеся в начале 2019 года инновационные лекарственные средства, направленные на борьбу с основными механизмами амилоидных отложений, в сочетании с усовершенствованными средствами диагностической визуализации, такими как ядерная кардиология, позволили медицинским работникам осуществлять вмешательство раньше и эффективнее. Эта смена парадигмы, обусловленная более глубоким пониманием амилоидоза сердца и доступностью лечения, представляет собой значительный прорыв, поскольку перспективы больных при этом улучшаются. Несмотря на эти положительные изменения, из-за недостаточно распространенной диагностики АТТР-КМП не удастся в полной мере задействовать потенциал этих прорывов в лечении.

Тенденции

177. Ядерная кардиология играет ключевую роль в диагностике амилоидоза сердца. Благодаря передовым методам визуализации, таким как сканирование с использованием пирофосфата технеция-99m ($^{99m}\text{Tc-PYP}$), она позволяет точно выявлять амилоидоз сердца и отличать его от других болезней сердца. Эти методы визуализации дают ценную информацию о вовлечении миокарда, помогая в ранней диагностике и стратификации риска (рис. Н.7 и Н.8). Позволяя оценить степень и объем амилоидных отложений, ядерная кардиология помогает врачам подбирать соответствующие терапевтические методы и следить за развитием болезни. Более того, неинвазивный характер этих методов делает их особенно ценными для комплексной оценки амилоидоза сердца, что в свою очередь способствует более раннему и точному лечению этого заболевания.

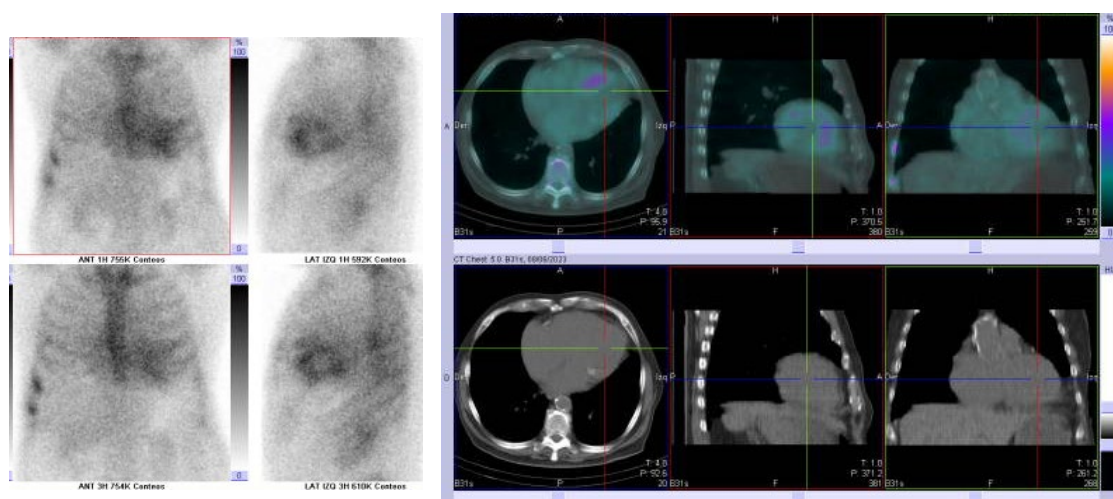


РИС. Н.7. Статические изображения спереди и сбоку (слева) и томограмма, полученная с помощью однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, совмещенной с рентгеновской компьютерной томографией (ОФЭКТ/КТ), (справа) пациента с аномально интенсивным очаговым накоплением $^{99m}\text{Tc-PYP}$ в миокарде, характерным для АТТР-КМП (фото: А. Хименес-Хефферман/Больница им. Хуана Рамона Хименеса).

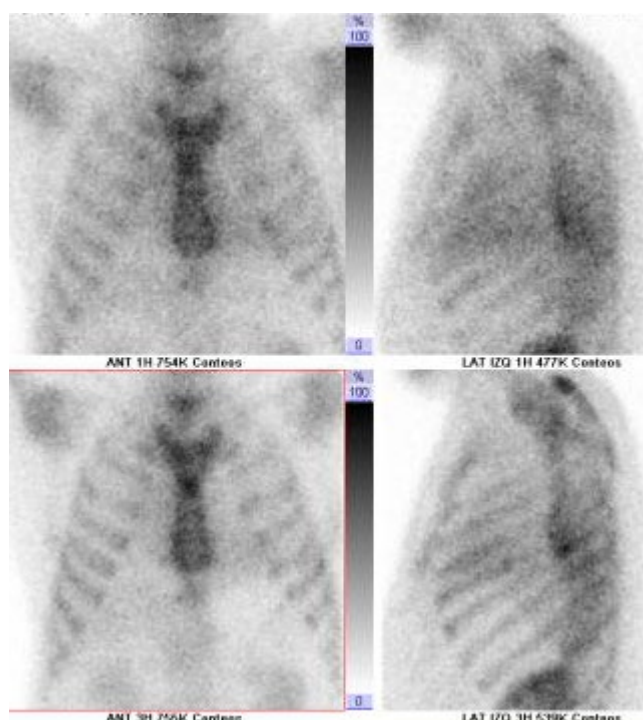


РИС. Н.8. Статические изображения больного спереди и сбоку без аномального накопления $^{99m}\text{Tc-PYP}$ в миокарде, что исключает АТТР-КМП как причину сердечной недостаточности больного (фото: А. Хименес-Хефферман/Больница им. Хуана Рамона Хименеса).

178. Несмотря на наличие технологий и опыта проведения ОФЭКТ с $^{99m}\text{Tc-PYP}$, ее практическое применение для диагностики АТТР-КМП во многих странах ограничено. Поскольку текущие диагностические критерии этого заболевания были разработаны экспертами в Европе и

Соединенных Штатах Америки, неизвестна применимость этих критериев в отношении населения других регионов планеты, которое характеризуется этническим и социально-экономическим разнообразием.

179. Агентство проводит ПКИ «Исследование транстиретиновой амилоидной кардиомиопатии МАГАТЭ (ИТАК-М)», целью которого является обеспечение стабильно высокого профессионального уровня проведения точной визуализации РУР в глобальном масштабе для эффективной диагностики АТТР-КМП. Это будет способствовать повышению качества выявления и лечения СНсФВ во всем мире. На фоне появления новых методов раннего обнаружения и лечения, которые спасают жизни людей, ядерная кардиология дает новую надежду людям с амилоидозом сердца.

I. Продовольствие и сельское хозяйство

I.1. Технологии облучения для разработки вакцин: применение ядерных технологий для профилактики инфекционных болезней домашнего скота

Положение дел

180. Инфекционные болезни в животноводстве могут вызывать огромные экономические потери мирового масштаба. Например, эпидемии чумы крупного рогатого скота столетиями приводили к гибели многих видов домашнего скота по всему миру, из-за чего в сельских районах, особенно в Африке и Азии, постоянно возникали периоды массового голода и нехватки продовольствия. В 2011 году было объявлено, что мир избавился от этого разрушительного заболевания благодаря разработке эффективной вакцины и проведению широкомасштабных программ иммунизации.

181. В качестве экономичного метода профилактики болезней домашнего скота часто рассматривается вакцинация. Существует большая потребность в ускоренной разработке и производстве вакцин против новых и вновь возникающих патогенов, с которыми трудно бороться и которые могут вызывать опустошительные эпидемии. На фоне растущего спроса на безопасные вакцины для борьбы с приоритетными заболеваниями особую роль приобретает оценка новых платформ производства вакцин, для которых требуется недорогая, но эффективная инфраструктура. Эффективным и быстрым способом создания новых вакцин остается традиционный подход к производству, который заключается в инаktivации патогенов.

182. В настоящее время при производстве вакцин в основном применяется химическая инаktivация. Однако радиационная инаktivация по сравнению с ней имеет множество потенциально важных преимуществ. Вещества, используемые при химической инаktivации, способны изменять основные белки патогенов, которые отвечают за запуск иммунного ответа. Радиационная инаktivация, напротив, сохраняет эти белки, а также структурную целостность патогенов, что помогает спровоцировать иммунный ответ у вакцинированного человека при контакте с патогеном. При этом радиационная инаktivация приводит к повреждению генетического материала патогена, из-за которого он лишается способности размножаться и вызывать инфекцию. Эта технология используется уже более 50 лет, но интерес к использованию облучения для производства вакцин возродился лишь недавно благодаря новым облучателям, которые могут обеспечивать точность дозы при более краткой продолжительности облучения, а также благодаря лучшему пониманию работы иммунной системы, что позволяет эффективнее оценивать реакцию на вакцинацию.

183. Благодаря работе Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства Агентство за последнее десятилетие добилось значительного прогресса в этой области, проводя исследования и разработки по применению радиационной инактивации для создания вакцин против более чем 20 возбудителей болезней животных и зоонозов. Эти исследования проводятся в том числе для того, чтобы определить правильную дозу облучения для уничтожения патогенов, установить параметры вакцинации и выяснить, что происходит после вакцинации²⁵. Например, прототип облученной вакцины против гриппа показал многообещающие результаты при тестировании на курах²⁶.

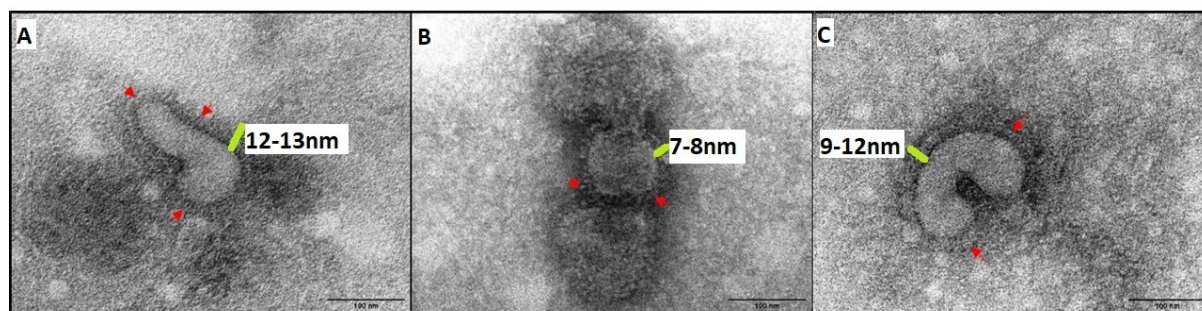


РИС. 1.1. Характеристики облученных и традиционных химически инактивированных вакцин: А: живой вирус гриппа; В: структурно поврежденный химически инактивированный вирус гриппа; С: инактивированный радиацией вирус гриппа, напоминающий по структуре живой вирус, благодаря чему при иммунизации у вакцинированного человека формируется надежная память о патогене, которая позволяет иммунитету бороться с ним в случае контакта. Красные стрелки показывают молекулы в вакцине-кандидате, которые отвечают за формирование иммунитета, а зеленые линии показывают длину этих молекул (источник: F. Bonfante/IZSVe, Italy and Frontiers in Veterinary Science, 11 July 2022).

Тенденции

184. Помимо использования в производстве инактивированных вакцин, облучение может применяться для получения метаболически активных, но не воспроизводящихся организмов, на основе которых могут создаваться вакцины-кандидаты, особенно против бактериальных и паразитарных заболеваний. Доза излучения может быть подобрана и установлена на таком уровне, при котором микробы, подвергшиеся его воздействию, не смогут размножиться (т.е. не смогут вызывать инфекцию), но сохраняют при этом свою метаболическую функцию. Преимущество этого метода заключается в том, что таким образом создается иммунологическая память не только о структуре патогена, но и о его функциях. Этот метод был использован для производства вакцины против нематоды — паразита, поражающего легкие крупного рогатого скота, и впоследствии эта вакцина поступила в продажу. В настоящее время на Шри-Ланке ведутся исследования этого метода в рамках ПККИ для производства облученной вакцины против нематодоза овец и коз по всему миру.

185. Благодаря достигнутому в последнее время техническому прогрессу стало возможным использовать электронно-лучевые и другие методы облучения для инактивации патогенов, что позволило отказаться от использования радиоактивных веществ при производстве вакцин, облученных с использованием гамма-излучения.

²⁵ Cattoli, G., Ulbert, S. and Wijewardana, V., Editorial: Irradiation Technologies for Vaccine Development, Frontiers in Immunology, 9 January 2023.

²⁶ Alessio Bortolami, et al., Protective Efficacy of H9N2 Avian Influenza Vaccines Inactivated by Ionizing Radiation Methods Administered by the Parenteral or Mucosal Routes, Frontiers in Veterinary Science, Vol. 9, 11 July 2022.

186. Кроме того, использование новых радиопротекторов, таких как ионы марганца (Mn^{2+}) и трегалоза, позволяет обеспечить лучшую сохранность молекул патогенов, ответственных за формирование иммунитета, во время радиационной инактивации.

187. Благодаря технологическим инновациям были также усовершенствованы процессы производства облученных вакцин. Одним из примеров этого является использование тонкого слоя жидкости в производстве вакцины, инактивированной пучком электронов, разработанной Институтом им. Фраунгофера в Германии; в настоящее время в Тунисе ведутся ее исследования в рамках ПКИ для производства облученной вакцины против нодавируса, поражающего морского окуня.



*РИС. 1.2. Ученые из Шри-Ланки оценивают иммунный ответ у козы, привитой облученной вакциной против *Haemonchus contortus* — нематоды, которая может приводить к падежу целых стад овец и коз, нанося огромный экономический ущерб (фото: Т. Анупама/Университет Перадени, Шри-Ланка).*

1.2. Сочетание ядерной технологии зондирования с источником нейтронов космического излучения и изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования, для управления водными ресурсами в сельском хозяйстве

Положение дел

188. В сельскохозяйственных районах в условиях острого или крайне острого дефицита воды живут 3 млрд человек. Согласно текущим прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), к 2050 году около 57% населения планеты может сталкиваться с нехваткой воды как минимум месяц в году. Эту проблему дополнительно усугубит изменение климата, поскольку экстремальные погодные явления, такие как засухи и наводнения, влияют на водообеспеченность сельскохозяйственного производства. Поэтому очень важно иметь доступ к точной и достоверной информации о том, как эти экстремальные явления влияют на влажность почвы и продуктивность использования воды растениями.

189. Мониторинг влажности почвы крайне важен не только для управления ирригацией, но и для гидрологического моделирования, пополнения подземных вод, а также прогнозирования наводнений и засух. С помощью традиционных и ядерных методов можно точно оценить влажность почвы на локальном уровне (например, в конкретном участке поля), в то время как технология дистанционного зондирования позволяет получить комплексные данные в большем масштабе.

190. За последние десять лет были достигнуты значительные успехи в разработке зонда с источником нейтронов космического излучения (CRNS). Действуя по линии Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства, Агентство возглавило эту инновационную работу в рамках ПКИ «Повышение невосприимчивости сельского хозяйства к внешним воздействиям и укрепление безопасности водоснабжения с помощью зонда с источником нейтронов космического излучения». Целью этого ПКИ является решение проблемы точного измерения влажности почвы путем восполнения пробела между крупномасштабной спутниковой съемкой и локализованными наземными датчиками для эффективного управления водопользованием в сельском хозяйстве. Принцип работы CRNS основан на обнаружении нейтронов низких энергий у поверхности почвы, что позволяет отслеживать влажность почвы на больших площадях (до 40 гектаров). Эта технология была усовершенствована, что сделало ее более доступной и экономически приемлемой как для лиц, принимающих решения, так и для фермеров. Поэтому она стремительно набирает популярность среди различных заинтересованных сторон.

191. Чтобы максимально увеличить отдачу от помощи МАГАТЭ государствам-членам через Совместный центр ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства, в ходе Всемирного продовольственного форума в Риме в октябре 2023 года Генеральный директор МАГАТЭ Гросси совместно с Генеральным директором ФАО Цюй Дунъюем представили инициативу «Атом4Food» (рис. I.3). Эта инициатива, наряду с новыми исследованиями и разработками, направлена на решение проблем, связанных с растущими потребностями в том, что касается укрепления продовольственной безопасности и повышения устойчивости к изменению климата во всем мире.



РИС. 1.3. Во время Всемирного продовольственного форума в Риме 18 октября 2023 года Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси и Генеральный директор ФАО Цюй Дунъюй представили инициативу «Atoms4Food» (фото: МАГАТЭ).

Тенденции

192. До недавнего времени в CRNS чаще всего использовались пропорциональные газовые счетчики, как правило на основе таких газов, как гелий-3 или трифторид бора-10. Эти счетчики обладают высокой чувствительностью к нейтронам (косвенный индикатор влажности почвы), однако они относительно дороги, что препятствует распространению этой технологии в мировом масштабе. Однако в настоящее время исследовательские институты и коммерческие компании используют или испытывают детекторы на основе лития, специальных пластиков и металлических материалов, что привело к значительному снижению цен на такие детекторы с момента их создания в начале XXI века.

193. Технология CRNS теперь используется в комбинации с изображениями высокого разрешения, получаемыми с помощью дистанционного зондирования. Сочетание ядерных и цифровых методов позволяет еженедельно отслеживать влажность почвы на больших площадях суши или на уровне водораздела. Эта передовая технология способна произвести революцию в области дистанционного зондирования для целей климатически оптимизированного орошения, что значительно улучшит доступ к исходной информации для лиц, принимающих решения, и фермеров. Это позволит сделать водопользование в сельском хозяйстве более рациональным, что будет способствовать достижению задачи 6.4 ЦУР, предусматривающей повышение эффективности водопользования и увеличение запасов пресной воды.

194. Такое сочетание ядерных и цифровых методов впервые применяется в странах по всему миру, чтобы помочь сохранить водные ресурсы для устойчивого производства продовольствия. В Африке эта технология была внедрена в 23 странах, прежде всего в засушливых, в которых применяются наиболее распространенные на континенте подходы к землепользованию и которые располагаются в его основных климатических зонах. Кроме того, благодаря этой работе

открывается ряд потенциальных областей применения экологических исследований, таких как проверка данных дистанционного зондирования, анализ тенденций изменения влажности почвы и моделирование продуктивности использования воды растениями и изменений водообеспеченности водно-болотных угодий.



РИС. I.4. CRNS, установленный в боливийских Андах в высокогорных водно-болотных угодьях для изучения их роли в удержании воды в условиях изменения климата (фото: Т. Франц, Университет Небраски в Линкольне).

195. В Многонациональном Государстве Боливия CRNS был установлен на высоте около 4500 метров над уровнем моря в высокогорных водно-болотных угодьях (рис. I.4). Они находятся неподалеку от снеговой границы горы Уайна-Потоси высотой 6088 метров, расположенной в Кордильера-Реаль, которая из-за изменения климата потеряла более трети своего ледяного покрова, что повлияло на снабжение водой миллионов боливийцев. Устройство поможет ученым оценить способность водно-болотных угодий удерживать воду и спрогнозировать масштабы и вероятность засух, что в свою очередь поможет лицам, принимающим решения, в разработке политики адаптации к изменению климата.



РИС. I.5. Учебный курс по использованию CRNS, проведенный в Зайберсдорфе, Австрия, в рамках регионального проекта технического сотрудничества RAF5086 «Содействие развитию устойчивого сельского хозяйства в меняющихся климатических условиях с использованием ядерных технологий (АФРА)» (фото: МАГАТЭ).

196. Используя учебные программы и передачу технологий, Агентство через Совместный центр ФАО/МАГАТЭ стремится оптимизировать и укрепить потенциал стран по применению этого ядерного метода для достижения устойчивого использования их водных ресурсов в целях обеспечения продовольственной безопасности (рис. I.5).

197. 29 декабря 2023 года МАГАТЭ и Аргентина подписали Меморандум о взаимопонимании (МОВ), направленный на расширение сотрудничества в области продовольствия и сельского хозяйства в рамках недавно представленной инициативы «Atoms4Food» (рис. I.6). В этом меморандуме определены четыре приоритетные области: технология облучения пищевых продуктов, здоровье животных, метод стерильных насекомых и идентификация биогенного углерода в продуктах на биооснове.



РИС. I.6. 29 декабря 2023 года Генеральный директор МАГАТЭ Гросси (справа) и декан агрономического факультета Буэнос-Айресского университета профессор Фернандо Вилелья подписали МОВ между МАГАТЭ и секретариатом по продовольствию и биоэкономике при министерстве сельского хозяйства, животноводства и рыболовства Аргентины о сотрудничестве в реализации инициативы «Atoms4Food» (фото: МАГАТЭ).

J. Радиоизотопные и радиационные технологии

J.1. Новые системы доставки радиофармпрепаратов к клеткам-мишеням

Положение дел

198. Радиофармпрепараты позволяют безопасно и эффективно доставлять радионуклиды к органам, тканям или клеткам-мишеням, представляющим интерес для целей диагностики или терапии. Радионуклиды должны доставляться к конкретной мишени и находиться рядом с ней

не дольше, чем это установлено в клинических требованиях, чтобы не допустить накопления радионуклидов в здоровых тканях и их ненужного облучения. Первым радионуклидом, который использовался таким образом, был радиоактивный йод, применяемый для диагностики и лечения заболеваний щитовидной железы с начала 1940-х годов. Кроме того, для визуализации костей и радионуклидной терапии костных метастазов используются соответственно ^{18}F -фторид натрия и хлориды радия-223/стронция-89, которые являются еще одним примером простых радиофармпрепаратов. Однако использование радиофармпрепаратов усложняется, если применяется комбинация нескольких радионуклидов, которые необходимо помечать различными типами векторов, такими как малые молекулы, пептиды, антитела и их фрагменты, которые могут точно распознавать мишени, экспрессируемые на поверхности раковых клеток²⁷ (рис. J.1).

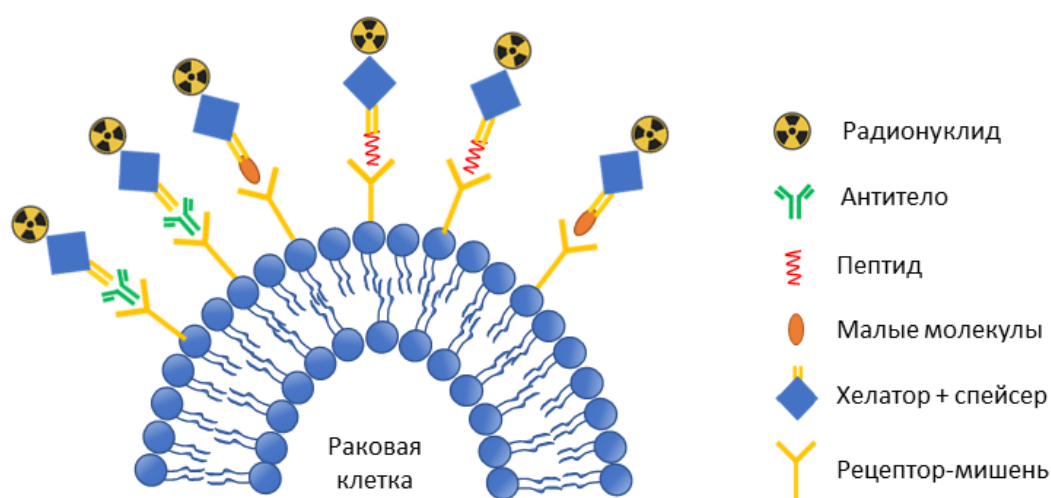


РИС. J.1. Схематическое изображение составов радиофармпрепаратов
(иллюстрация: МАГАТЭ).

199. К настоящему дню радиофармпрепараты доказали свою клиническую ценность не только для функциональной визуализации органов, но и для неинвазивной визуализации раковых клеток с помощью радиофармпрепаратов, специфичных к подобранной мишени. Они делают возможным индивидуализированное лечение с использованием инновационных лекарственных средств, включая иммунотерапевтические препараты и терапевтические радиофармпрепараты, в том числе недавно одобренные для лечения рака предстательной железы и нейроэндокринных раковых заболеваний²⁸. За ходом лечения можно наблюдать с помощью диагностических радиофармпрепаратов.

200. Благодаря техническим разработкам и сетям сотрудничества, действующим во многих странах, повышается доступность радионуклидов с физическими свойствами, подходящими для диагностической визуализации или терапии²⁹. Биомедицинские исследования также способствуют разработке молекул, которые могут использоваться для изотопного мечения

²⁷ Bodei L., Herrmann K., Schöder H., Scott A. M. and Lewis J. S. Radiotheranostics in oncology: current challenges and emerging opportunities. *Nature Reviews Clinical Oncology* 19, 534–550 (2022).

²⁸ Веб-страница Управления по контролю за качеством продуктов питания и медицинских препаратов: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/daf/index.cfm>

²⁹ Первый общий обзор программы PRISMAP (PRISMAP, 2022): https://www.prismap.eu/members/repository/Public/Publishable_summaries/PRISMAP_PubSum_1.pdf

новых клеток-мишеней, характерных для конкретного заболевания, и в доклинических разработках. Тем не менее внедрению препаратов в клиническую практику препятствуют различные проблемы, связанные с биологическими барьерами и механизмами взаимодействия на клеточном уровне, которые приводят к деградации, метаболизму и нежелательным реакциям, вызывающим отравление. Оптимизация рецептур радиофармпрепаратов усложняется при использовании радионуклидов, распад которых сопровождается короткопробежным излучением частиц (бета-, альфа- и оже-электроны) без соответствующего гамма-излучения, подходящего для целей визуализации.

Тенденции

201. Один из способов преодолеть эти проблемы, затрудняющие применение радиофармпрепаратов, — использовать системы доставки, аналогичные тем, которые используются для доставки нерадиоактивных препаратов и вакцин. Для повышения безопасности и эффективности лекарств в настоящее время активно изучаются наносистемы доставки, включая тераностические наносистемы, с различными сочетаниями и комбинациями методов визуализации, лекарств и радионуклидов. В биологических системах в естественных условиях многие внутриклеточные механизмы действуют на нанометровом уровне (10^{-9}). Поэтому ожидается, что доставка с помощью наночастиц (НЧ) даст много преимуществ, таких как повышение концентрации терапевтических радионуклидов в мишени при уменьшении побочных эффектов³⁰ за счет изменения фармакокинетики лекарств. В основе систем доставки НЧ лежат такие структуры, как дендримеры, липосомы, мицеллы, нанокапсулы и наносферы, а также различные типы НЧ, такие как неорганические, полимерные, твердые липидные и другие³¹ (рис. J.2).

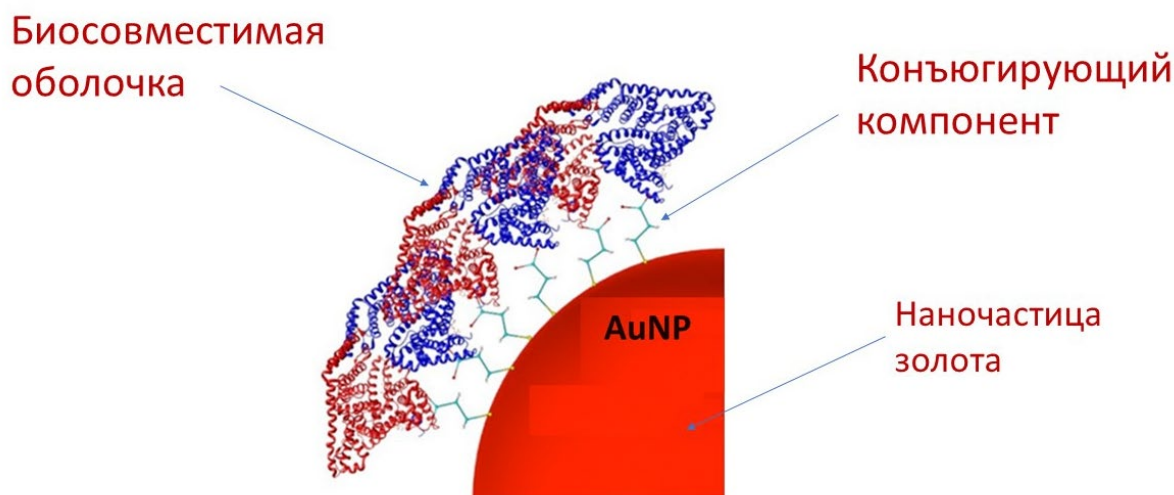


РИС. J.2. Схематическое изображение конъюгированных наночастиц золота (Au), используемых в разработке радиофармпрепаратов (иллюстрация: МАГАТЭ).

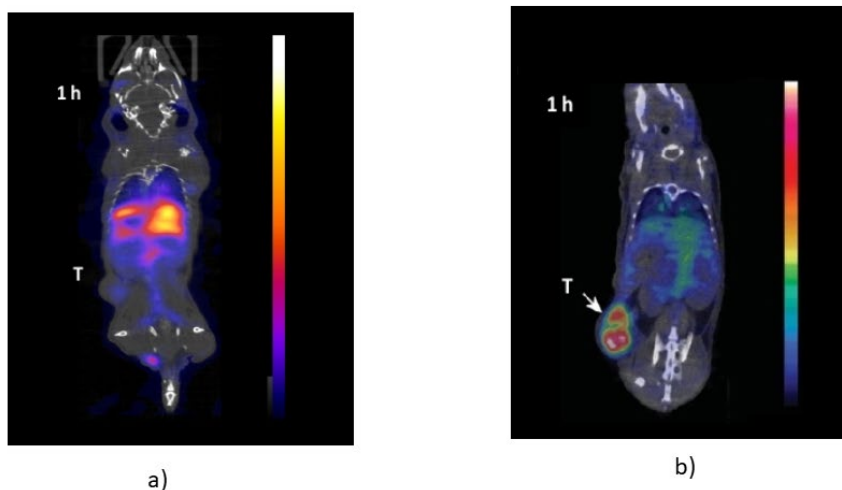
202. В основе многих радиофармпрепаратов, которые в настоящее время проходят доклиническую оценку, лежат антитела, белки или нанопрепараты, которые потенциально способны активно или пассивно воздействовать на микроокружение опухоли. Разработка

³⁰ Jani, P. Subramanian, S., Korde, A., Rathod, L. and Sawant, K. Theranostic Nanocarriers in Cancer: Dual Capabilities on a Single Platform. Functional Bionanomaterials Nanotechnology in the Life Sciences, 293 Thangadurai, D. et al. Functional Bionanomaterials. Nanotechnology in the Life Sciences, 293–310 (2020).

³¹ Jalilian, A. R., Ocampo-García, B. et al. IAEA Contribution to Nanosized Targeted Radiopharmaceuticals for Drug Delivery, Pharmaceutics 14, 1060 (2022).

усовершенствованных систем доставки позволяет раскрыть потенциал таргетной радионуклидной терапии. Принципы клик-химии и биоортогональной химии, интерес к которым возрос в 2022 году после присуждения исследователям, работающим в этих областях, Нобелевской премии по химии, также применяются в радиохимии и системах доставки, в основном для обеспечения эффективной доставки радиоиммуноконъюгатов (диагностических или терапевтических радионуклидов в сочетании со специфическими иммунными веществами)³².

203. Все эти системы таргетной доставки можно сочетать с методами предварительного таргетирования, комбинированными методами химиотерапии или радиационными сенситизаторами. Методы предварительного таргетирования способны произвести революцию в современных стратегиях в области тераностики, поскольку они могут увеличить соотношение «мишень/фон» до 150 раз, причем на ранних этапах, как это показано на рисунке J.3. Первые результаты свидетельствуют о том, что эти методы превосходят даже традиционные методы таргетной радионуклидной терапии. Быстрое повышение соотношения «мишень/фон» и предварительное накопление антител позволяют использовать радионуклиды с коротким периодом полураспада, что снижает вероятность облучения здоровых тканей.



*РИС. J.3. Радиоиммуновизуализация моноклонального антитела СС49 к опухолеассоциированному гликопротеину 72 с использованием а) традиционного подхода и б) метода предварительного таргетирования для эффективной доставки радиофармпрепарата (источник: *Pharmaceuticals* 15, 685 (2022)³³).*

204. Дальнейшая деятельность Агентства будет направлена на то, чтобы организовать взаимодействие многопрофильных экспертов в этой области для определения наиболее перспективных систем, выявления сопутствующих проблем и выработки решений для внедрения этих разработок в клиническую практику. На 2025 год запланирован ПККИ, призванный помочь государствам-членам в подготовке к постепенному внедрению этих разработок для обеспечения эффективной доставки радиофармпрепаратов. В этой связи большое значение имеет обмен знаниями и передача технологий в рамках деятельности Агентства.

³² Kondengadan, S. M., Bansla, S., Yang, C. et al. Click chemistry and drug delivery: A bird's-eye view. *Acta Pharmaceutica Sinica B* 13, 1990 (2023).

³³ García-Vázquez, R., Battisti, U. M. and Herth, M. M. Recent Advances in the Development of Tetrazine Ligation Tools for Pretargeted Nuclear Imaging. *Pharmaceuticals* 15, 685 (2022).

Ж.2. Применение технологии радиоиндикации и искусственных водно-болотных угодий для восстановления сточных вод горнодобывающей промышленности

Положение дел

205. Горнодобывающая и горноперерабатывающая отрасли вносят значительный вклад в мировую экономику, но, как известно, они также наносят ущерб окружающей среде. Прямой сброс в окружающую среду сточных вод горнодобывающей промышленности, содержащих органические и неорганические загрязнители, причиняет вред окружающей среде и приводит к нерациональной трате дефицитных водных ресурсов. Следовательно, переработка и повторное использование этих сточных вод имеют большое значение для развития экономики замкнутого типа в горноперерабатывающей промышленности.

206. Традиционные системы очистки сточных вод имеют серьезные ограничения, поскольку они не могут полностью удалять стойкие загрязнители, присутствующие в различных видах сточных вод; кроме того, у таких систем есть недостатки, связанные с накоплением осадка, его обработкой и сбросом. Помимо того, что традиционные системы очистки сточных вод часто выходят из строя в результате механических повреждений или неправильного обращения, они дорого стоят, а для их сооружения, эксплуатации и обслуживания требуется высококвалифицированный технический персонал. За последние десятилетия Агентство способствовало промышленному применению радиоиндикаторной технологии для проверки различных видов оборудования для очистки сточных вод, такого как смесители, аэротенки, отстойники, метантенки, седиментационные и фильтрационные установки.



РИС. Ж.4. Сточные воды, образующиеся при добыче полезных ископаемых, долина Бойнас, Бельмонте-де-Миранда, Астурия, Испания (источник: Adobe Stock).

207. Радиоиндикаторная технология играет важную роль в горноперерабатывающей промышленности, поскольку она используется для анализа и устранения неисправностей в процессах на промышленных предприятиях, позволяя дополнительно оптимизировать эти процессы. Технология имеет широкий спектр промышленных применений, однако ее основными целевыми группами пользователей являются нефтяная и нефтехимическая промышленность, горноперерабатывающая промышленность и отрасль очистки сточных вод. Радиоиндикаторная технология предполагает использование закрытых радиоактивных источников, открытых радиоактивных источников или ядерных контрольно-управляющих систем, по отдельности или в комбинации, в зависимости от конкретной задачи. В радиоиндикаторной технологии с использованием открытых источников, которая обычно используется для изучения гидродинамики, радиоактивный индикатор вводится в промышленную систему путем инъекции. С помощью детекторов излучения и комплексной системы сбора данных измеряется активность индикатора на выходе из системы и формируется кривая времени жизни на выходе, которая может дать важную информацию о потоке жидкости.

208. Радиоиндикаторная технология помогла повысить эффективность традиционных очистных сооружений, однако по-прежнему востребованы и альтернативные виды очистных сооружений, которые проще в сооружении, эксплуатации и обслуживании. Благодаря этому были достигнуты дальнейшие успехи в области очистки сточных вод, направленные на преодоление этих сохраняющихся трудностей.

209. Перспективной альтернативой традиционным очистным сооружениям являются искусственные водно-болотные угодья. Они представляют собой инженерно-технические системы, сконструированные таким образом, чтобы задействовать естественные функции местных растений, почвы и микроорганизмов для удаления загрязнителей из поверхностных и подземных вод или потоков отходов. Благодаря своему низкому энергопотреблению и простой механической инфраструктуре эти системы являются экономичным и экологически чистым решением. Поэтому за последние пять десятилетий использование искусственных водно-болотных угодий зарекомендовало себя как надежный способ очистки, подходящий для всех типов сточных вод, включая канализационные, промышленные и сельскохозяйственные стоки, фильтрат полигонов и ливневые стоки. Несмотря на преимущества искусственных водно-болотных угодий по сравнению с обычными очистными сооружениями, их сложная гидродинамика по-прежнему не вполне изучена и освоена, что затрудняет эффективное осуществление и оптимизацию процесса очистки. Чтобы устранить этот пробел, Агентство запустило ПКИ, цель которого — разработать метод использования радиоиндикаторов для исследования искусственных водно-болотных угодий, создать соответствующие протоколы и руководства, а также проверить модели потока в условиях искусственных водно-болотных угодий.



РИС. J.5. Традиционная система очистки сточных вод, Беларусь (источник: МАГАТЭ, модификация изображения, предоставленного Graphithèque/Adobe Stock).

Тенденции

210. На фоне постоянно растущего спроса на новые технологии, основанные на критически важных материалах, в обозримом будущем ожидается рост горнодобывающей промышленности. Для успешного осуществления планов рекультивации и закрытия рудников необходимы водные ресурсы, запасы которых истощаются. Эти планы учитывают все потенциальные проблемы, связанные как с рудником, так и с его очистными сооружениями, и могут включать в той или иной степени очистку воды после закрытия рудника, а также долгосрочный отбор проб. Кроме того, в рамках поиска подходов к реагированию на этот сложный сценарий в последнее время уделяется все больше внимания модели экономики замкнутого цикла, предполагающей внедрение новых технологий и стратегий переработки.

211. Эффективность использования искусственных водно-болотных угодий для удаления различных загрязнителей хорошо известна. Тем не менее исследования в этой области в основном касались процессов биологической и химической очистки, при этом в испытаниях использовался метод «черного ящика», при котором сравнивались концентрации загрязняющих веществ в поступающем и выходящем потоке, но не учитывалась важность характеристик потока — ключевого средства переноса и удаления загрязняющих веществ — для общей эффективности системы.

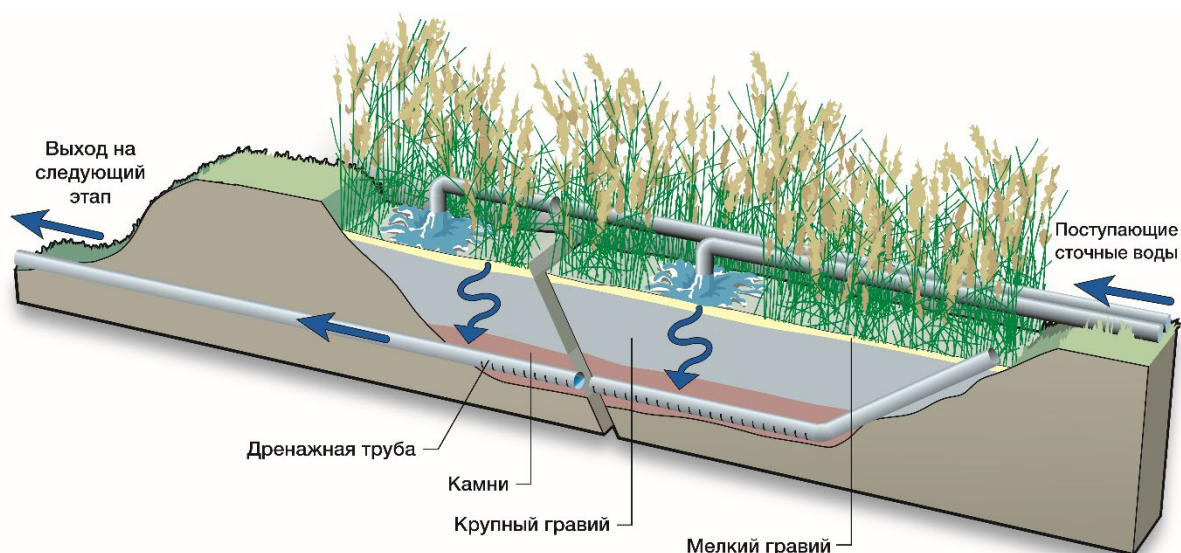


РИС. J.6. Схематическая диаграмма искусственного водно-болотного угодья
(источник: МАГАТЭ, модификация изображения, предоставленного Graphithèque/Adobe Stock).

212. В настоящее время Агентство разрабатывает новый ПКИ по гидравлическим характеристикам искусственных водно-болотных угодий для восстановления сточных вод горнодобывающей промышленности с целью изучения проектных параметров, связанных с гидравлическими процессами, и взаимозависимости гидравлических процессов и процессов обеспечения качества воды путем применения радиоиндикаторной технологии с использованием открытых источников. Этот ПКИ будет направлен на разработку моделей и инструментов для оптимизации эффективности удаления загрязнителей в искусственных водно-болотных угодьях за счет предоставления подробной пространственной и временной информации, а также на прогнозирование динамической реакции водно-болотных угодий на различные условия. В новом ПКИ найдут применение протоколы и руководства по использованию радиоиндикаторов в искусственных водно-болотных угодьях, разработанные в рамках существующего ПКИ.

К. Изотопная гидрология

К.1. Определение гидрологического цикла: новые разработки в области анализа трития

Положение дел

213. Тритий — единственный радиоактивный изотоп, входящий в состав молекулы воды, что дает возможность отслеживать с его помощью процессы гидрологического цикла. Из-за короткого периода полураспада (12,3 года) тритий в основном используется в гидрологии для оценки пополнения подземных вод и степени подверженности загрязнению. Тритий образуется естественным образом в результате взаимодействия космического излучения с азотом-14 в верхних слоях атмосферы в количестве примерно 258 граммов в год. Он также производится как побочный продукт ядерной промышленности в сравнимом количестве.

214. В 1945–1963 годах в результате термоядерных испытаний в атмосфере в нее попало более 500 килограммов трития, что привело к глобальному увеличению содержания трития на несколько порядков по сравнению с естественным уровнем его содержания в осадках. После

запрета атмосферных испытаний в 1963 году уровни трития в атмосферных водах медленно снижались до стабильных значений. Из-за низкой концентрации трития в современных природных водах измерение его содержания стало технически сложной задачей. Чтобы получить достаточное количество распадов для получения точных и достоверных результатов, стабильно пригодных для гидрологических применений в коммерчески доступных жидкостных сцинтилляционных счетчиках, требуется значительное обогащение трития (предварительное концентрирование в 15–100 раз).

215. Для обогащения трития обычно используются щелочные электролизные ячейки (ЩЭЯ) с электродами «никель — никель» или «нержавеющая сталь — низкоуглеродистая сталь», которые были разработаны в начале 1960-х годов. В 2018 году были проведены квалификационные испытания по взаимному сравнению содержания трития, в которых приняли участие около 90 лабораторий, и результаты испытания показали, что в более чем 75% лабораторий, проводящих анализ трития по всему миру, для измерения содержания трития в пробах воды, отобранных в окружающей среде, используются системы ЩЭЯ объемом 250 или 500 мл с электродами из низкоуглеродистой стали. При этом почти в половине этих лабораторий были получены неточные результаты в отношении низких и сверхнизких уровней трития в пробах воды, из-за чего эти результаты были признаны непригодными для гидрологических применений. Такие неудовлетворительные результаты были обусловлены либо недостаточной степенью обогащения трития, либо общими проблемами с последующей обработкой данных.



Рис. К.1. Гидрологический цикл (иллюстрация: МАГАТЭ).

Тенденции

216. Чтобы удовлетворить потребность в более высокой степени обогащения трития, Лаборатория изотопной гидрологии Агентства разработала инновационную систему обогащения трития на основе полимерных электролитных мембран (ПЭМ) и провела масштабные испытания

этой системы. Эта новая система способна радикально расширить возможности государств-членов по измерению сверхнизких концентраций трития в пробах воды, отобранных в окружающей среде, для целей как гидрологического, так и радиологического надзора.

217. Новая система обогащения трития позволяет получить более высокую степень предварительного концентрирования (более чем в 60 раз) и избежать некоторых недостатков традиционных методов обогащения трития, включая использование опасных химикатов для электролиза и нейтрализации, а также сложной аппаратуры для электролиза, требующей значительного охлаждения и регулирования температуры. Кроме того, новая система ПЭМ призвана упростить и сократить аналитическую процедуру, сделав анализ трития гораздо более простой задачей для государств-членов, заинтересованных в использовании трития в качестве индикатора для оценки водных ресурсов и управления ими.

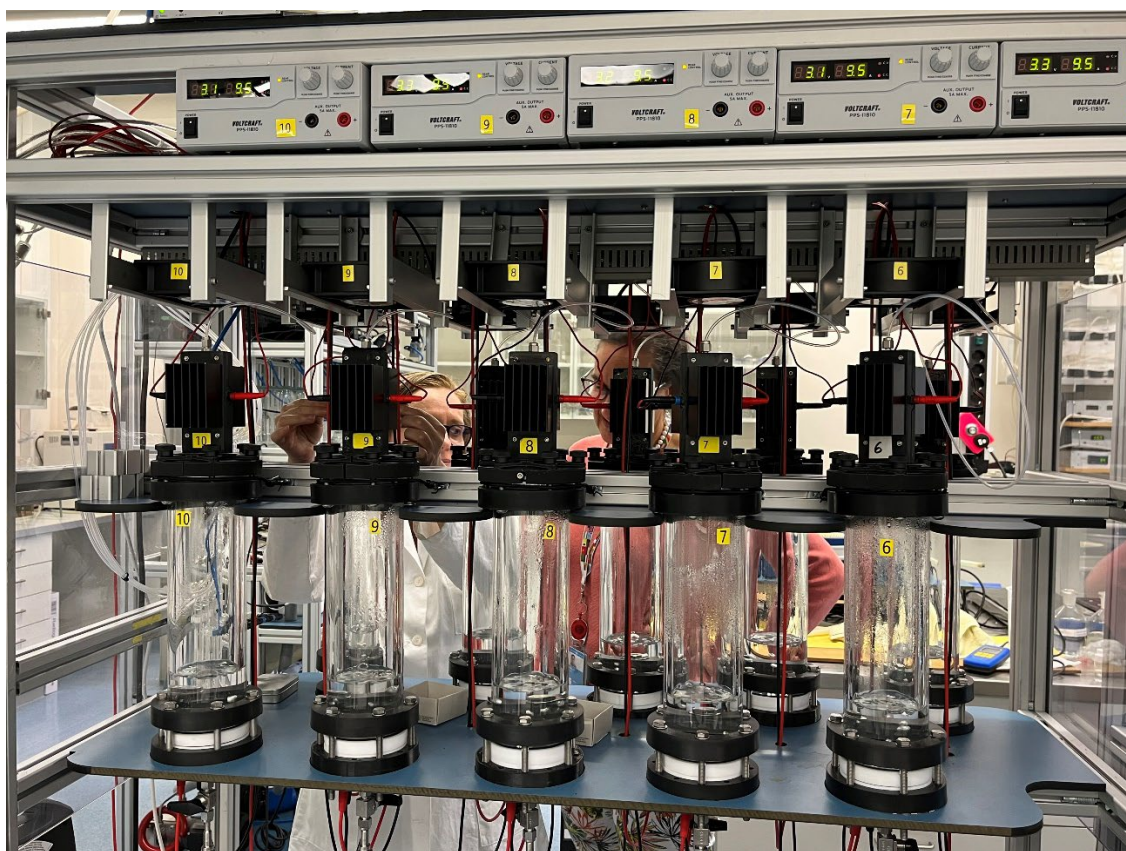


РИС. К.2. Разработанная Агентством система ПЭМ для обогащения трития (вид спереди), состоящая из десяти электролизных ячеек с набором эталонных образцов для проверки точности и прецизионности (фото: МАГАТЭ).

218. Развитие технологии обогащения трития позволит лучше различать природные и антропогенные сигналы и повысит доступность исходных данных о природном тритии.



РИС. К.3. Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси выступает со вступительным словом на мероприятии, посвященном представлению Глобальной сети лабораторий по анализу водных ресурсов (ГлоВАЛ) на Конференции ООН по водным ресурсам 2023 года в Нью-Йорке (фото: МАГАТЭ).

L. Морская среда

L.1. Использование искусственного интеллекта для улучшения хода мониторинга и исследования загрязнения океана микропластиком

Положение дел

219. Морская среда превратилась в свалку пластиковых отходов, попадающих в океан с суши. Кризис морских экосистем усугубляется: ежегодно в океан смывает более 12 млн тонн пластика, из-за чего ситуация с загрязнением океана микропластиком и нанопластиком продолжает ухудшаться. Чтобы решить проблему резкого увеличения масштабов загрязнения пластиком, в рамках Инициативы МАГАТЭ по использованию ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком («НУТЕК пластикс») ведутся мониторинг присутствия микропластика и оценка его воздействия на морскую среду. Сегодня мы лучше понимаем проблему загрязнения морской среды пластиком, однако количественное определение и характеристика микропластика по-прежнему затруднены из-за сложности процессов его разложения и отсутствия всеобъемлющих баз данных о полимерах. В рамках исследования «НУТЕК пластикс» идет работа над созданием глобально доступной базы данных о микропластике, присутствующем в окружающей среде на различных стадиях разложения.

220. МАГАТЭ тесно сотрудничает с государствами-членами в создании экспериментальных установок по переработке пластиковых отходов в ценные продукты. Аргентина, Индонезия, Малайзия и Филиппины добились значительных успехов, намереваясь в сотрудничестве с промышленными партнерами построить к 2024 году пилотные производственные установки. Основные перспективные области применения направлены на создание доступных, долговечных и высококачественных строительных материалов, а также на термопиролиз с использованием излучения для производства топлива и присадок и усовершенствованных шпал для железных дорог.



РИС. L.1. Ученые Лабораторий морской среды МАГАТЭ анализируют химические характеристики микропластика в пробах морской среды с помощью колебательной спектроскопии, рамановской спектроскопии и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (фото: МАГАТЭ).

221. Для обнаружения и характеристики полимеров и микропластика используются несколько методов, предполагающих взаимодействие фотонов с веществом, таких как инфракрасная спектроскопия с использованием преобразования Фурье (ИКФС), рамановская спектроскопия и лазерная прямая инфракрасная (ЛПИК) спектроскопия. Эти методы применяются с опорой на базы данных об эталонных спектрах, с которыми сравниваются полученные спектры частиц. Эталонные спектры обычно определяются с использованием полимеров в идеальном состоянии, в то время как содержащиеся в пробах окружающей среды частицы редко остаются таковыми и часто подвергаются разложению в результате таких факторов, как воздействие ультрафиолетового света и окисление. Из-за этого меняются физико-химические свойства проб окружающей среды, что влияет на то, как они взаимодействуют с инфракрасным светом, и приводит к изменению спектральных профилей, в результате чего увеличивается риск ошибочной идентификации. Поскольку составление базы данных спектров полимеров на разных

стадиях разложения было бы трудоемкой и нецелесообразной задачей, необходимы альтернативные подходы, сочетающие более быстрые и современные методы анализа данных, чтобы использовать существующую информацию об образцах полимеров как в идеальном состоянии, так и подвергшихся разложению.

222. ЛПИК-спектроскопия недавно начала применяться в качестве альтернативного метода в Лабораториях морской среды МАГАТЭ для анализа микропластика и полимеров в пробах морской воды, морских отложений и морской биоты. ЛПИК-спектроскопия имеет преимущество перед такими методами, как ИКФС, позволяя сканировать пробы еще до визуализации и анализировать только те области, где были обнаружены частицы. Это позволяет сократить время анализа, особенно в случае проб с минимальным содержанием частиц. Вместе с тем, одним из недостатков этого метода является возможность ошибочной идентификации двух прилегающих частиц как одной, поскольку у каждой частицы регистрируется только один спектр. Кроме того, по сравнению с другими методами, такими как ИКФС, применение ЛПИК-спектроскопии чаще приводит к ошибочной идентификации при анализе частиц, подвергшихся влиянию атмосферных условий, из-за более узкого инфракрасного диапазона, регистрируемого приборами для ЛПИК-спектроскопии. Поэтому очень важно разработать более эффективные методы классификации, чтобы свести к минимуму риск ошибочной идентификации.

Тенденции

223. Ценным средством уточнения классификации может стать машинное обучение, хотя его применение в области идентификации микропластика остается ограниченным. Машинное обучение, включая глубокое обучение и обучение с подкреплением, стало неотъемлемой частью различных научных областей и промышленных секторов, включая биомедицинскую инженерию и гидрологические исследования. Машинное обучение предусматривает обучение математических моделей, позволяющих делать прогнозы или принимать решения на основе наблюдаемых данных, используя методы статистики и информатики. Поэтому применение машинного обучения для идентификации полимеров и микропластика может привести к повышению точности идентификации при работе с пробами окружающей среды.



РИС. L.2. В настоящее время Агентство совместно с Аргентинским институтом Антарктики участвует в проекте по анализу микропластика, обнаруженного в пробах морской воды и осадочных пород, собранных в Антарктике (фото: МАГАТЭ).

224. Искусственный интеллект (ИИ) становится важнейшим средством идентификации микропластика. Использование искусственным интеллектом алгоритмов машинного обучения для понимания сложных процессов разложения полимеров в морской среде влечет за собой фундаментальные перемены. Возможность создавать спектры разлагающихся полимеров в определенных условиях окружающей среды позволяет исследователям устанавливать типологию микропластика с невиданной ранее точностью. Такое углубленное понимание спектров не только помогает различать пластик разных составов, но и позволяет исследователям лучше понимать происхождение полимера и его поведение в различных условиях морской среды.

225. Природоохранный потенциал ИИ начал использоваться в решающий момент продолжающейся борьбы с загрязнением моря пластиком. Скорость спектрального анализа, производимого ИИ, в сочетании с моделированием физических, химических и биологических процессов для получения спектров разлагающихся полимеров позволяет использовать ИИ как многофункциональный инструмент анализа и решения сложных проблем, связанных с загрязнением микропластиком. Мы продолжаем изучать потенциал технологических инноваций для управления охраной окружающей среды, и ИИ обещает стать важнейшим средством борьбы за освобождение океана от пластика.

Приложение

Таблица А-1. Действующие и строящиеся АЭС в мире^а

Страна	АЭС, находящиеся в эксплуатации		АЭС, эксплуатация которых остановлена		АЭС в процессе строительства		Выработка электроэнергии за счет ядерных мощностей	
	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	ТВт (эл.)·ч	Доля ядерных мощностей (%)
АРГЕНТИНА	3	1 641			1	25	9,0	6,3
АРМЕНИЯ	1	416					2,5	31,1
БАНГЛАДЕШ					2	2 160		
БЕЛАРУСЬ	2	2 220					11,0	28,6
БЕЛЬГИЯ	5	3 908					31,3	41,2
БОЛГАРИЯ	2	2 006					15,5	40,5
БРАЗИЛИЯ	2	1 884			1	1 340	13,7	2,2
ВЕНГРИЯ	4	1 916					15,1	48,8
ЕГИПЕТ					3	3 300		
ИНДИЯ	19	6 290	4	639	8	6 028	44,6	3,1
ИРАН, ИСЛ. РЕСП.	1	915			1	974	6,1	1,7
ИСПАНИЯ	7	7 123					54,4	20,3
КАНАДА	19	13 699					83,5	13,7
КИТАЙ	55	53 152			24	24 948	406,5	4,9
КОРЕЯ, РЕСП.	26	25 825			2	2 680	171,6	31,5
МЕКСИКА	2	1 552					12,0	4,9
НИДЕРЛАНДЫ, КОРОЛЕВСТВО	1	482					3,8	3,4
ОАЭ	3	4 011			1	1 310	31,2	19,7
ПАКИСТАН	6	3 262					22,4	17,4
РОССИЯ	37	27 727			3	2 700	204,0	18,4
РУМЫНИЯ	2	1 300					10,3	18,9
СЛОВАКИЯ	5	2 308			1	440	17,0	61,3
СЛОВЕНИЯ	1	688					5,3	36,8
СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО	9	5 883			2	3 260	37,3	12,5
США	93	95 835			1	1 117	742,4	18,5
ТУРЦИЯ					4	4 456		
УКРАИНА	15	13 107			2	2 070	Н.Д.	Н.Д.
ФИНЛЯНДИЯ	5	4 394					32,8	42,0
ФРАНЦИЯ	56	61 370			1	1 630	323,8	64,8
ЧЕШСКАЯ РЕСП.	6	3 934					28,7	40,0
ШВЕЙЦАРИЯ	4	2 973					23,4	32,4
ШВЕЦИЯ	6	6 944					46,6	28,6
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 854					8,2	4,4
ЯПОНИЯ	12	11 046	21	20 633	2	2 653	77,5	5,5
Весь мир^б	413	371 539	25	21 272	59	61 091	2 508,7^с	Н/П

Примечание. Н.Д. — нет данных, Н/П — не применимо.

- ^a Источник: Информационная система по энергетическим реакторам (PRIS) Агентства (www.iaea.org/pris), согласно данным, представленным государствами-членами до 16 июня 2024 года.
- ^b Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 2 энергоблока, эксплуатируемая мощность 1874 МВт (эл.) и 17,2 ТВт·ч произведенной электроэнергии, на которую приходится 6,9% в общей структуре энергопроизводства.
- ^c В общем объеме выработки электроэнергии не учитывается Украина, так как не были представлены данные об эксплуатации за 2023 год.

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

Вид применения^а	Число соответствующих исследовательских реакторов^б	Число государств-членов, в которых имеются такие установки
Обучение/подготовка кадров	162	51
Нейтронно-активационный анализ	119	50
Производство радиоизотопов	83	40
Нейтронная радиография	69	34
Облучение материалов/топлива	67	26
Рассеяние нейтронов	45	28
Геохронология	25	22
Трансмутация (легирование кремния)	24	15
Трансмутация (драгоценные камни)	21	12
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	16	11
Измерение ядерных данных	17	11
Другие применения ^с	116	35

^а 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).

^б Из 234 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на декабрь 2023 года 225 реакторов находились в эксплуатации, 9 были временно остановлены).

^с 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 и акронимов

АНЛ	Айдахская национальная лаборатория
АОВС	анализ ограниченного по времени старения
АРАО	Агентство по обращению с радиоактивными отходами, Словения
АТТР-КМП	транстиретиновая амилоидная кардиомиопатия
АЭС	атомная электростанция
АЯЭ/ОЭСР	Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития
БПНТС	беспилотные наземные транспортные средства
ВНОУ	высокопробный низкообогащенный уран
ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
ВОУ	высокообогащенный уран
ГВт	гигаватт
ГВт (эл.)	гигаватт (электрической мощности)
ГДж	гигаджоуль
ДСЭ	долгосрочная эксплуатация
ИГСЯО	Инициатива по гармонизации и стандартизации в ядерной области
ИИ	искусственный интеллект
ИКФС	инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье
ИНИР	комплексная оценка ядерной инфраструктуры
ИФМИФ	Международная установка по облучению материалов для термоядерного синтеза
КДОС	кишечная дисфункция, вызванная факторами окружающей среды
КС-28 2023	Конференция сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата
КТ	компьютерная томография
кэВ	килоэлектронвольт
КЯР	Комиссия по ядерному регулированию
ЛИДАР	лазерная система обнаружения и измерения дальности
ЛЛНЛ	Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса
ЛПИК	лазерный прямой инфракрасный
МВт (эл.)	мегаватт (электрической мощности)
ММР	реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы
МО	машинное обучение
МТИ	Массачусетский технологический институт

МэВ	мегаэлектронвольт
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НИФ	Национальная установка по термоядерному зажиганию
НОУ	низкообогащенный уран
НСАО	низко- и среднеактивные отходы
НЧ	наночастица
ОФЭКТ/КТ	однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещенная с рентгеновской компьютерной томографией
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
ПКИ	проект координированных исследований
ППВМ	программируемая пользователем вентильная матрица
ПЭМ	полимерная электролитная мембрана
ПЭТ	позитронно-эмиссионная томография
РМПП	радиоактивный материал природного происхождения
СДД	сбор данных с детектора
СНнФВ	сердечная недостаточность с низкой фракцией выброса
СНСД	страны с низким и средним уровнем дохода
СНсФВ	сердечная недостаточность с сохраненной фракцией выброса
ТВт·ч	тераватт-час
тТМ	тонн тяжелого металла
УАЭС	Управление по атомным электростанциям
УАЭСК	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций
ФВ	фракция выброса
ЩЭЯ	щелочная электролизная ячейка
^{13}C -SBT	дыхательный тест с применением ^{13}C -сахарозы
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -PYP	пирофосфат технеция-99m
ATF	толерантное топливо
CFS	«Коммонуэлф фьюжн системз»
CIRES	Промышленный центр сбора, сортировки и захоронения
COVID-19	коронавирусная инфекция, выявленная в 2019 году
CRNS	зонд с источником нейтронов космического излучения
DEMO	демонстрационная термоядерная энергетическая установка
DTT	опытный реактор-токамак с дивертором
HPR-1000	реактор типа «Хуалун-1»

HTGR	высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
HTTR	высокотемпературный реактор для технических испытаний
JET	Объединенный европейский тор
LFR	быстрый реактор со свинцовым теплоносителем
LWR	легководный реактор
MARVEL	«Применение, исследование, валидация и оценка микрореакторов»
MHTGR	модульный высокотемпературный реактор с газообразным теплоносителем
MMR	микромодульный реактор
MSFR	быстрый реактор на солевых расплавах
MSR	реактор на солевых расплавах
NRAD	Реактор для нейтронной радиографии
PRIS	Информационная система по энергетическим реакторам
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
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