

Норвегия

В ноябре 2022 года финско-немецко-норвежский консорциум GeoReN¹ заключил рамочное соглашение с норвежским государственным «Управлением по выводу из эксплуатации ядерных объектов» (англ. Norwegian Nuclear Decommissioning), ответственным за вывод из эксплуатации (ВЭ) исследовательских установок в Халдене и Хьеллере и реализацию национальной программы по окончательному захоронению радиоактивных отходов (РАО). В рамках данного соглашения на проведение экспертами GeoReN исследования вопросов обеспечения долгосрочной безопасности РАО из государственного бюджета страны было выделено 40 миллионов евро (41 миллион долларов США) [1]. Соглашение предусматривало разработку технических решений по окончательной изоляции отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и других видов РАО в Норвегии. В состав консорциума GeoReN входят компании A-Insinöörin Oy (AINS) (Финляндия), BGE Technology GmbH (Германия), Геологическая служба Финляндии (GTK), Mitta Oy (Финляндия), Posiva Solutions Oy (Финляндия) и Технический исследовательский центр Финляндии (VTT). Кроме того, в качестве субподрядчика к его работе была привлечена норвежская проектно-конструкторская компания Ramboll. Следует отметить, что всего на изучение возможных подходов к решению задачи окончательной изоляции ОЯТ и РАО, реализуемое по стандартной для норвежских государственных инвестиционных проектов процедуре KVU (государственное стратегическое исследование государственных инвестиционных проектов), было выделено в общей сложности более 1 млрд норвежских крон (96,5 млн долларов США) [1].

Для осуществления поставленных перед GeoReN задач команду экспертов разделили на

две группы: одна занималась изучением концепции глубинного скважинного захоронения в контексте целесообразности ее применения в отношении РАО с наиболее высоким уровнем активности, а другая — более широким кругом вопросов, сравнивая перспективы реализации альтернативных концепций захоронения для различных видов РАО — от низкоактивных до наиболее высокоактивных.

К весне 2025 года по итогам работы были опубликованы два отчета: один о перспективах использования глубоких скважин для захоронения высокоактивных отходов (ВАО), а другой — об оценке различных концепций захоронения применительно к их осуществимости в Норвегии. Согласно представленным выводам, ВАО рекомендуется окончательно изолировать в пункте глубинного геологического захоронения (ПГЗРО), представляющем собой комплекс подземных выработок на глубине 400–500 метров, аналогично подходу, реализуемому в Финляндии и Швеции. При этом эксперты также не исключают возможности использования и альтернативного варианта, предусматривающего изоляцию таких РАО в глубокой скважине. Для захоронения низко- и среднеактивных отходов (НАО и САО) эксперты рекомендовали разработать проект пункта геологического захоронения РАО (ПЗРО) на средней глубине, к примеру, камерного или бункерного типа, с заложением выработок на уровне 100–200 метров под землей. Опыт строительства подобных ПЗРО имеется в целом ряде стран, например в Словении, Южной Корее и Финляндии [1].

Италия

Весной 2025 года на площадке итальянской АЭС «Каорсо»² стартовали работы по сносу и последующей реконструкции одного из трех

¹ Geological Repositories for Norway (англ. Геологические ПЗРО для Норвегии).

² Кипящий реактор мощностью 860 МВт (э) на АЭС «Каорсо» был закрыт в 1990 году, он проработал всего 12 лет, и в настоящее время на площадке проводятся работы по ВЭ. Соответствующая лицензия была получена в 2014 году.

пунктов временного хранения (ПХ) РАО. Согласно разработанному проекту, после реконструкции он будет соответствовать самым современным стандартам безопасности, установленным отраслевыми нормами и законодательством Италии [2].

РАО, образовавшиеся на площадке АЭС «Каорсо» как в результате ее эксплуатации, так и при ВЭ, в настоящее время хранятся в трех пунктах, организованных на ее территории. Твердые НАО размещены в ПХ ERSBA 1 и ERSBA 2, а САО — в ПХ ERSMA. В них поступают как уже кондиционированные отходы, так и подлежащие последующей переработке и кондиционированию. Впоследствии хранящиеся здесь РАО планируется передать на окончательную изоляцию в ПГЗРО, как только такой объект появится в Италии.

Согласно утвержденной программе, все имеющиеся на площадке ПХ планируется модернизировать, обеспечив их соответствие наиболее современным стандартам безопасности. Для ПХ ERSBA 1 и ERSBA 2 была утверждена программа сноса и реконструкции, а для ПХ ERSMA — модернизации после демонтажа внутренних конструкций здания. К настоящему времени работы на площадке ERSBA 2 завершены, но продолжаются на территории ПХ ERSMA, а весной 2025 года Societa Gestione Impianti Nucleari SpA (Sogin), итальянская государственная компания, ответственная за ВЭ АЭС, объявила о начале сноса объекта ERSBA 1¹ (рис. 1) [2].



Рис. 1. Здание ПХ ERSBA 1 на площадке АЭС «Каорсо» [2]

В ходе этих работ планируется выполнить демонтаж крыши, бетонных стен и фундамента здания, после чего ПХ будет реконструирован на той же площади, причем его полезная емкость не изменится. По завершении строительства внутри сооружения планируется установить два мостовых крана для перемещения контейнеров с отходами и демонтированных элементов систем выводимой из эксплуатации АЭС.

¹ Сооружение длиной 50 м, шириной 30 м и высотой около 6 м.

Специалисты отмечают, что реконструкция трех ПХ позволит избежать возведения новых пунктов временного хранения РАО на территории АЭС, где в ноябре 2024 года был начат демонтаж систем и компонентов внутри здания реактора. Всего, согласно оценкам экспертов, в результате проведения данных работ образуется около 3400 тонн строительного мусора: 88% этого материала планируется использовать повторно после необходимой обработки и дезактивации, а оставшиеся 12%, отнесенные к категории РАО, подлежат окончательной изоляции. До их размещения в ПГЗРО они будут находиться в пунктах временного хранения на территории АЭС.

США

Уже на протяжении нескольких лет американский стартап Deerp Fission работает над инновационным проектом по созданию модульных ядерных микрореакторов. В августе 2024 года компания презентовала проект собственной разработки — реактор с водой под давлением (PWR) мощностью 15 МВт(э), который планируется установить под землей на глубине 1,6 км в скважине диаметром 76 см [3]. Он работает на том же топливе, что и стандартные установки типа PWR, используя те же топливные сборки и аналогичные методы управления мощностью (регулирующие стержни и бор в охлаждающей жидкости). Согласно разработанному проекту, генерируемое в ходе эксплуатации реактора тепло передается размещенному на глубине парогенератору; нерадиоактивный пар, образующийся в результате вскипания воды, быстро поднимается на поверхность, где паровая турбина преобразует энергию в электричество. Исходя из размера и конфигурации стандартного микрореактора PWR, он не имеет движущихся частей, за исключением стержней управления и потока жидкости водяного теплоносителя. Такая конструкция минимизирует потребность в техническом обслуживании установки, хотя кабели, прикрепленные к реактору, все же позволяют поднять его на поверхность (на что может уйти от одного до двух часов), если возникнет необходимость в его осмотре. Также проект не предусматривает наличия емкостей высокого давления и защитных конструкций, что снизит затраты и одновременно повысит безопасность, устойчивость и эксплуатационную эффективность установки. Еще одним преимуществом такого устройства является простота масштабирования данной технологии, когда в зависимости от потребностей конечных пользователей в

пределах одной площадки может быть запущено необходимое количество реакторов [3].

Весной 2025 года руководство компании Deep Fission подписало меморандум о взаимопонимании с компанией Deep Isolation, занимающейся разработкой концепции окончательной изоляции ОЯТ и ВАО путем их заключения в коррозионно-стойкие контейнеры, размещаемые в глубоких скважинах на глубине от 1 до 3 километров под землей. На сегодняшний день калифорнийская компания получила в общей сложности около 70 патентов, связанных с данной технологией. Ранее в этом году она объявила о создании в сотрудничестве с Британским центром передовых производственных исследований, NAC International Inc., и Шеффилдским университетом первого в своем роде прототипа контейнера для скважинного захоронения РАО [3].

Согласно положениям подписанного меморандума, специалисты двух компаний совместно изучат перспективы применения запатентованной Deep Isolation технологии глубинного скважинного захоронения в отношении ОЯТ, образующегося в результате эксплуатации разрабатываемых Deep Fission реакторов. Цель партнерства — предоставить последней комплексное решение, в рамках которого производство энергии было бы совмещено с технологией долгосрочного обращения с образующимися в ходе эксплуатации таких реакторов отходами [3].

Еще одной важной новостью в области обращения с ОЯТ в США стало заявление компании Oklo Inc о планах по созданию завода по переработке отработанного топлива в Ок-Ридже (штат Теннесси) (рис. 2). В релизе не указывается мощность будущего перерабатывающего завода, но говорится о планах по переработке «ОЯТ, образующегося на действующих в настоящее время американских АЭС». Полученный в результате материал планируется применять в производстве топлива для быстрых реакторов, в частности реакторов типа Augora — собственной разработки компании Oklo [4].

Augora — это микрореактор мощностью всего около 1,5 МВт(э), сконструированный по принципу функционирования и саморегулирования преимущественно за счет естественных физических процессов, что подразумевает использование в нем очень малого количества движущихся элементов. Топливо для него предполагается изготавливать на основе высокообогащенного урана, что позволит реактору функционировать десятилетиями без необходимости его перегрузки. В 2020 году компания подала заявку на получение лицензии



Рис. 2. Проект завода по переработке ОЯТ в Ок-Ридже [4]

на строительство и эксплуатацию первой установки этого типа на территории Национальной лаборатории Айдахо. Стоимость строительства микрореактора Augora оценивается в 10 миллионов долларов, а расходы на его эксплуатацию и обслуживание — в менее 3 миллионов долларов.

Следует отметить, что Oklo — одна из 11 компаний, которым Министерство энергетики США решило оказать поддержку в рамках реализуемой в настоящее время государственной программы «Пилотные ядерные реакторы» (англ. Nuclear Reactor Pilot Program), цель которой — «обеспечить выход передовых реакторов на критическую мощность как минимум в течение ближайшего года». Ожидается, что строительство завода в Ок-Ридже ознаменует первый этап в реализации национального проекта по созданию «Центра передового топлива» общей стоимостью 1,68 млрд долларов США. К настоящему времени сотрудники компании Oklo совместно с экспертами Комиссии по ядерному регулированию США (NRC) уже завершили разработку плана по лицензированию данного объекта и приступили к подготовке заявки на получение соответствующей лицензии. Руководство компании заявило, что, согласно имеющимся планам, производство металлического топлива для электростанций Augora будет запущено к началу 2030-х годов после получения необходимых разрешений и лицензий от регулирующих органов.

В целом данный проект ознаменовал некоторый важный сдвиг в национальной политике по обращению с ОЯТ в США, ведь переработка топлива от коммерческих реакторов в этой стране была остановлена еще в 1977 году: в те времена это было политическое решение, продиктованное соображениями о нераспространении ядерного оружия. В 2025 году в ряду указов, подписанных президентом Дональдом Трампом, были и поручения Министерству энергетики США о разработке национальной политики в области обращения с ОЯТ и ВАО, а также анализе частных инициатив в сфере их переработки.

Среди наиболее активно участвующих в данной инициативе организаций следует также отметить TVA — крупнейшую государственную энергетическую компанию США, располагающую диверсифицированным портфелем генерирующих мощностей — от атомных и гидроэлектростанций до угольных, газовых и солнечных станций. В начале 2025 года компания подала заявку на получение разрешения на строительство реактора малой и средней мощности (SMR) на базе технологии BWRX-300, разработанной компанией GE Vernova Hitachi Nuclear Energy. Его планируется возвести на площадке Клинч-Ривер, недалеко от Ок-Риджа. Кроме того, компания подписала соглашение о сотрудничестве с ENTRA1 Energy по сооружению реактора малой и средней мощности NuScale мощностью до 6 ГВт и заключила контракт с Kairos Power на покупку до 50 МВт электроэнергии с демонстрационного реактора Hermes 2, который будет построен также в Ок-Ридже [4].

Швейцария

В августе 2025 года был завершен важный международный исследовательский проект, участие в котором приняли ученые из Массачусетского технологического института, Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли (LBNL) и Орлеанского университета во Франции. В его рамках ученым предстояло оценить эффективность использования нового высокопроизводительного программного обеспечения (ПО) при моделировании взаимодействия захороненных под землей РАО со средой ПГЗРО. Полученные результаты моделирования были сопоставлены с результатами эксперимента, проведенного в швейцарской подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) Монт-Терри [5].

При создании нового ПО перед специалистами LBNL была поставлена задача более точного моделирования процессов взаимодействия захороненных под землей РАО как с искусственными, так и природными материалами барьеров безопасности. Работа велась на базе известного программного обеспечения CrunchFlow, используемого для имитации многокомпонентного реактивного переноса. Усилиями специалистов в новом ПО CrunchODiTi был реализован уникальный функционал по учету электростатических эффектов, обусловленных свойствами глиняных материалов, обладающих отрицательным зарядом. Таким образом, CrunchODiTi можно считать уникальным продуктом, способным моделировать подобные взаимодействия в трехмерном пространстве.



Рис. 3. Выработка внутри ПИЛ Монт-Терри в Швейцарии [5]

За основу при тестировании возможностей нового продукта были взяты результаты эксперимента, проведенного в швейцарской ПИЛ Монт-Терри (рис. 3), где с 1966 года реализуются международные программы исследований по определению гидрогеологических, геохимических и геотехнических характеристик формации опалиновой глины. Расположенная на глубине около 300 метров под землей лаборатория по праву считается одной из важнейших экспериментальных площадок, которая на протяжении многих десятилетий является источником ценных данных о взаимодействии цемента и глины — основных материалов, предлагаемых для сооружения систем инженерных барьеров безопасности (ИББ) в ПГЗРО.

В рамках недавнего эксперимента, проведенного в ПИЛ Монт-Терри, ученые ввели в скважину, расположенную в центре цементного блока, смесь из положительно и отрицательно заряженных ионов. В центре внимания исследователей оказалась небольшая зона толщиной всего в 1 см на границе между радионуклидами и цементно-глинистой породой. Полученные показатели были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования, выполненного в CrunchODiTi. Результаты анализа продемонстрировали полное совпадение двух наборов данных, что свидетельствует о высокой точности разработки, а значит CrunchODiTi может стать надежным инструментом для имитации поведения ионов и радионуклидов в условиях ПГЗРО и прийти на смену средствам, использовавшимся ранее для оценки безопасности и надежности проектов глубинного геологического захоронения РАО [5].

Германия

В настоящее время одной из наиболее приоритетных задач, стоящих перед компанией BGE — немецким оператором по обращению с

РАО,¹ является решение проблемы удаления отходов из закрытого рудника Ассе II, в горных выработках которого в период с 1967 по 1978 год по поручению федерального правительства Германии были захоронены тысячи упаковок в основном с НАО: их разместили в 13 подземных камерах закрытого к тому времени соляного рудника. Со временем выяснилось, что объект нестабилен, и в 2013 году на законодательном уровне было принято решение об обязательном извлечении из него отходов [6].

В соответствии с текущим графиком, к удалению хранящихся в Ассе II РАО планируется приступить в 2033 году. Согласно оценкам экспертов, затраты на реализацию работ на площадке еще до поднятия РАО на поверхность составят около 4,7 млрд евро (5,5 млрд долларов США), включая издержки на поддержание рудника в рабочем состоянии и реализацию мер по обеспечению безопасности в рамках программы аварийного планирования. Расходы на извлечение, временное хранение и окончательное захоронение РАО после 2033 года в эту сумму не входят.

Летом 2025 года представители компании BGE заявили о «значительном прогрессе» в подготовке к удалению отходов из объекта Ассе II: были завершены работы по бурению первой разведочной скважины, которая позволила оценить состояние хранящихся в одной из камер ПЗРО бочек с РАО. Речь идет о камере № 12, в которую отходы были помещены в период с 1973 по 1974 г. Среди всех камер Ассе II именно она является наиболее мощным источником поступления радона. Согласно архивным данным, в ней размещено 7464 упаковок с РАО, включая 6747 обычных бочек и 717 бочек, залитых бетоном.

Работы по бурению скважины в направлении камеры № 12 стартовали в конце мая 2024 года с соблюдением всех необходимых мер радиационной защиты. В результате на глубине 750 метров была создана проходка длиной около 117 метров. 6 августа в ходе проводимых во время бурения измерений радиационных показателей были выявлены повышенные концентрации радона, что указывало на приближение к месту заложения камеры. В итоге через отверстие размером с теннисный мяч специалисты впервые за десятилетия смогли заглянуть внутрь камеры: оказалось, что



Рис. 4. Внешний вид бочек с РАО в камере № 12 шахты Ассе II [6]

попадающие в поле обзора видеокамеры бочки находились в хорошем состоянии (рис. 4). На следующем этапе работ специалистам предстоит определить точный состав воздуха внутри камеры и измерить уровень радиоактивного излучения, для чего потребуются еще больше расширить диаметр пробуренной скважины. Газовый анализ позволит определить состав атмосферы и влияющие на него факторы. Параллельно в Ассе II продолжаются и геологоразведочные работы. Результаты предварительных исследований показали, что потолок камеры находится на большей глубине, чем предполагалось изначально. Первые изображения оттуда подтвердили данные, полученные в ходе радиолокационных и магнитных измерений, а запланированное 3D-сканирование позволит создать еще более полное представление о ее внутреннем пространстве.

Результаты всех проведенных измерений будут учтены при дальнейшем планировании работ по извлечению РАО и при осуществлении необходимых для их практической реализации процедур лицензирования. Среди прочего они позволят BGE сделать обоснованный выбор в пользу той или иной технологии, которая бы обеспечила наиболее высокий уровень безопасности и эффективности в дальнейшем при выполнении практических работ по извлечению РАО из камеры № 12 [6].

Великобритания

В начале 2025 года правительство Великобритании официально объявило о планах государства по иммобилизации и окончательному захоронению накопленных в результате десятилетий переработки ОЯТ запасов плутония. В настоящее время его объем оценивается в 140 тонн. Эти материалы хранятся на территории ядерного комплекса Селлафилд (графство Камбрия) при соблюдении всех нормативных требований [7].

¹ В апреле 2017 года федеральная компания BGE, находящаяся в ведении Федерального министерства окружающей среды, была официально признана оператором рудника Ассе II и ПЗРО Конрад и Морслебен. В соответствии с «Законом о выборе площадки для захоронения», вступившим в силу в мае 2017 года, она также отвечает за поиск места для размещения ПЗРО для окончательной изоляции РАО в Германии.

В течение последних десятилетий в Великобритании не утихали дискуссии по поводу перспектив реализации иного подхода в отношении обращения с накопленными объемами плутония, а именно его повторного использования в производстве МОКС-топлива. В 2011 году после проведения публичных консультаций правительство Великобритании сформировало предварительную политическую позицию, отдав предпочтение именно данному выбору, но при этом оставшись открытым для любых альтернативных предложений по поводу возможной стратегии обращения с этим материалом в будущем. После этого специалисты Управления по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании (NDA) приступили к скрупулезному технико-экономическому анализу ряда различных стратегий, включая способы как повторного использования плутония, так и его иммобилизации и окончательного захоронения. В итоге именно последний вариант был рекомендован NDA правительству в качестве наиболее предпочтительного.

К осени 2025 года правительство Великобритании выделило NDA 154 млн фунтов стерлингов (207 млн долларов США) на проведение НИОКР, направленных на доработку и испытание технологий, предложенных для иммобилизации плутония [7]: по методу DMOX с получением пригодных для окончательного захоронения керамических таблеток и горячее изостатическое прессование (HIP), когда под действием высокого давления и температуры формируется похожий на камень керамический материал.

Ожидается, что в течение ближайших пяти лет выделенные на реализацию данного проекта средства позволят NDA спроектировать, построить и ввести в эксплуатацию в Селлафилде специализированные лаборатории для испытания указанных выше технологий. Кроме того, 2,5 млн фунтов стерлингов планируется инвестировать в создание «Академического центра по плутониевой керамике» в партнерстве с университетами Манчестера и Шеффилда [7], которые должны сыграть ключевую роль в развитии технических компетенций и профильных знаний, необходимых для осуществления столь уникального проекта.

Nuclear Waste Services, дочерняя компания группы NDA, отвечает за проведение исследований пригодности получаемых в результате применения данных технологий конечных форм отходов для захоронения в ПГЗРО. Наряду с инвестициями в НИОКР следующий этап работ также предполагает получение одобрения от правительства на реализацию крупномасштабной программы по захоронению плутония,

в том числе на строительство завода по переработке ядерных материалов и пункта временного хранения в Селлафилде [7].

Что касается ПГЗРО, в котором планируется изолировать эти и другие ВАО, в Великобритании уже в течение нескольких десятилетий реализуется процедура поиска площадки для его сооружения. В ее основе лежит принцип добровольного участия и партнерства с муниципалитетами: местные органы власти самостоятельно принимают решение об участии в этом процессе и в любой момент свободны выйти из него. Так, в июне 2025 года стало известно о том, что графство Линкольншир, где перспективы размещения ПГЗРО изучались с 2022 года, решило отказаться от дальнейшего участия в процессе поиска площадки. При этом за последние годы компания Nuclear Waste Services (NWS), ответственная за реализацию проекта глубинного геологического захоронения РАО в Великобритании, инвестировала более 2 миллионов фунтов стерлингов (2,7 миллиона долларов США) в местные социальные проекты. Несмотря на предпринятые усилия, 3 июня 2025 года исполнительный Совет графства Линкольншир проголосовал за выход из данного процесса. Теперь усилия NWS по поиску подходящего места для размещения ПГЗРО в Великобритании будут сосредоточены на двух оставшихся муниципалитетах — Мид-Коупленд и Саут-Коупленд в графстве Камбрия на северо-западе Англии [8].

Помимо задачи поиска подходящей площадки для создания ПГЗРО, в Великобритании достаточно остро стоит и другая проблема — повышение эффективности работ по обращению с историческими РАО и реабилитации объектов ядерного наследия. Уже упомянутый выше атомный комплекс Селлафилд по праву можно считать крупнейшим не только в Великобритании, но и в целом в Западной Европе: на его территории расположено более 1 000 различных зданий и сооружений, в том числе установки, задействованные в реализации программы по переработке Magnox топлива, заводы по производству смешанного оксидного топлива, переработке оксидного топлива и переработке РАО. На его территории также находятся объекты, некогда участвовавшие в оборонных проектах 1950-х годов, включая программу производства оружейного плутония. Согласно оценкам NDA, работы по очистке загрязненных территорий и ликвидации объектов ядерного наследия в Селлафилде завершатся не ранее 2125 года, а прогнозируемая суммарная стоимость реализации данной программы оценивается в 136 млрд фунтов стерлингов (176 млрд долларов США).

При этом, согласно материалам финансовой отчетности, в 2023—2024 гг. на проведение данных работ NDA потратил около 2,7 млрд фунтов стерлингов, в то время как доход, полученный с данной площадки за тот же период, составил всего 0,8 млрд фунтов стерлингов [9].

Летом 2025 года Комитет по государственным счетам Палаты общин Великобритании (англ. UK House of Commons Public Accounts Committee, PAC¹), опубликовал отчет о результатах деятельности оператора площадки (компания Sellafield Ltd). Главным выводом PAC в отношении работ, осуществляемых в Селлафилде, стало то, что «компания Sellafield Ltd не удалось достигнуть большинства утвержденных целевых показателей по извлечению РАО из нескольких объектов на территории комплекса, в том числе из специализированного пункта хранения металлической стружки Magnox (MSSS)». В ходе проведенного расследования было установлено, что именно эта установка занимает первое место по уровню опасности. В отчете, переданном PAC на рассмотрение правительству, предлагается предусмотреть меры по привлечению NDA и Sellafield Ltd к ответственности за допущенные задержки в реализации чрезвычайно важных для скорейшего снижения рисков работ. По мнению экспертов, подобные задержки в выполнении программы по ликвидации ядерного наследия в Селлафилде приводят лишь к еще большему удорожанию проекта. Кроме того, к увеличению затрат также может привести и срыв графика ввода в эксплуатацию упомянутого выше ПГЗРО: к настоящему времени он уже сдвинулся с 2040 года на конец 2050-х годов. Каждая такая задержка сроком на 10 лет может потребовать от оператора площадки строительства еще одного нового ПХ для РАО стоимостью 500—760 миллионов фунтов стерлингов [9].

К подходам, способным повысить эффективность и уменьшить трудоемкость осуществляемых на территории комплекса работ, несомненно, следует отнести внедрение инновационных роботизированных технологий. Так, в июне 2025 года NDA объявила о заключении партнерского соглашения с компаниями AtkinsRéalis и Createc (объединенными в ARCTEC), в рамках которого на площадке закрытой АЭС «Олдбери» впервые в истории Великобритании планируется внедрить инновационную технологию по дистанционной и автономной сортировке

и разделению РАО. В проект, получивший название Auto-SAS, NDA в течение следующих четырех лет собирается инвестировать до 9,5 млн фунтов стерлингов (13 млн долларов США). Также о своем участии в проекте заявили такие компании, как Nuclear Restoration Services, Sellafield Ltd и Nuclear Waste Services.

Эксперты отмечают, что внедрение роботизированных систем и автоматизация играют важнейшую роль в сокращении времени, затрат и рисков при реализации работ по ВЭ ядерных установок. Ручная сортировка РАО — это трудоемкий и сложный процесс, требующий высокой степени осторожности и повышенных мер безопасности. В настоящее время в Великобритании все смешанные отходы относят к категории CAO или загрязненных плутонием материалов и не сортируют по типу или уровням радиоактивного загрязнения. Использование робототехнических средств откроет возможности для более точной категоризации РАО, что позволит сократить затраты на их переработку, а также избежать привлечения персонала к работам в радиационно опасных условиях.

Система, разработанная ARCTEC, оснащена набором датчиков, которые позволят разделить отходы, прежде чем роботизированные манипуляторы захватят их и передадут далее в соответствии с установленным для данной категории отходов технологическим маршрутом. Система Auto-SAS, планируемая к запуску на площадке закрытой АЭС в Олдбери, будет использоваться для разделения потоков НАО и CAO, извлекаемых из расположенных на приреакторной площадке ПХ. Проект предполагается реализовать в два этапа: первый продлится с июня 2025 года по август 2027 года: система в полностью работоспособном состоянии будет протестирована в неактивной среде, второй предусматривает полномасштабную демонстрацию возможностей системы на площадке в Олдбери.

Другим примером внедрения современных роботизированных технологий является система, установленная в специализированном хранилище оболочек ядерного топлива (PFCS) в Селлафиле. Этот объект был построен в 1950-х годах и по своей конструкции напоминает обычный зерновой элеватор. Сооружение из бетона длиной 29 м, шириной 10 м и высотой 18 м разделено на шесть высоких отсеков. В PFCS до начала 1970-х гг. помещали на хранение облученные материалы оболочек, снятых с тепловыделяющих сборок, использовавшихся в самых первых реакторах в Уиндскейле и Чапел-кроссе. На сегодняшний день в этом ПХ размещено более 3 200 м³ CAO [11].

¹ Главная функция PAC — анализ финансовой отчетности государственных органов, оценка надлежащего использования средств налогоплательщиков и того, насколько экономно, эффективно и результативно правительство тратит деньги на предоставление государственных услуг.

В рамках проекта по выводу хранилища из эксплуатации, оно было оборудовано всеми необходимыми системами для безопасного удаления РАО. Внутри объекта размещена установка для обработки контейнеров с отходами — это бетонное помещение, внутри которого все операции осуществляются специальными роботами. Один из них — большой шестиосевой промышленный манипулятор (рис. 5) — вскрывает пустые контейнеры, передает их на заполнение отходами, после чего надежно их герметизирует и закручивает болты. Также он берет мазок с внешней поверхности каждого контейнера для последующего анализа на наличие загрязнения и помещает его в специальную пробирку.



Рис. 5. Большой шестиосевой промышленный манипулятор внутри специализированного хранилища оболочек ядерного топлива (PFCS) в Селлафилде [11]

Все рутинные операции робот выполняет в соответствии с предустановленной программой. Однако в случаях, когда требуется физическая модернизация оборудования, например смена инструментов для взятия мазка, операторам приходится его отключать и в полной защитной экипировке входить в зону радиоактивного загрязнения для выполнения необходимых работ вручную. После установки нового инструмента зачастую требуется несколько тестовых пусков системы, в ходе которых операторам приходится снова возвращаться в зону радиоактивного загрязнения для донастройки системы, что обуславливает дополнительные риски для здоровья персонала, а также увеличивает время простоя оборудования.

Озадаченные этой проблемой специалисты компании Robotics and Artificial Intelligence Collaboration (RAICo)¹ разработали специальную

симуляцию PFCS Operational Simulator (OpSim), которая позволяет тестировать и оценивать правильность предложений по замене рабочих инструментов или внесению изменений в технологические процедуры посредством предварительного моделирования связанных с этим операций перед их практической реализацией непосредственно на объекте. После такой проверки все необходимые обновления ПО могут быть переданы роботу в цифровом формате, что практически исключает необходимость останова оборудования, а при установке новых инструментов операторам не придется так часто заходить внутрь зоны с радиоактивным загрязнением.

Разработка симулятора PFCS Operational Simulator (OpSim) включала два основных этапа [11]: создание цифрового двойника объекта и интеграцию в него виртуальной модели робота. Для получения точной 3D-модели хранилища использовался робот-квадрокоптер Spot, оснащенный лидаром (LiDAR scanner) — сканером, использующим лазерное излучение для сбора точных данных о положении всех объектов в пространстве. Такая технология позволяет создавать так называемое «точечное облако». Эти данные затем были преобразованы в 3D-модели (CAD assets) и задействованы для построения точной цифровой копии хранилища. Для создания гиперреалистичной виртуальной среды использовалась собственная программная платформа RAICo — RHOVR (Remote Handling Operations Virtual Reality), работающая на движке Unreal Engine, который широко известен из-за применения в видеоиграх.

После создания цифрового двойника объекта команда разработчиков приобрела готовую модель симулятора для аппаратного и программного обеспечения робота и интегрировала ее в платформу RHOVR, благодаря чему появилась возможность запуска его алгоритма в фотореалистичной виртуальной среде. По словам разработчиков, с технической точки зрения именно этот этап оказался самым сложным. На заключительной стадии проекта в течение шести месяцев проводилась валидация симулятора для подтверждения точности и надежности его работы, а в марте 2025 года состоялась официальная презентация уже готового продукта [11].

Финляндия

В июне 2025 года финский оператор по обращению с РАО Posiva, ответственный за реализацию проекта создания финского ПГЗРО, объявил о выпуске первой медной заготовки будущего

¹ RAICo — это совместный проект Управления по атомной энергии Великобритании (UKAEA), NDA, компании Sellafield Ltd, Манчестерского университета и компании AWE Nuclear Security Technologies, направленный на ускорение внедрения последних достижений в области робототехники и искусственного интеллекта для решения общих задач ВЭ ядерных объектов и термоядерной инженерии.

контейнера для окончательного захоронения ОЯТ. К работам по созданию первых шести заготовок контейнеров на литейном заводе в Пори, принадлежащем мировому лидеру в выплавке металлов Luvata (дочернему предприятию японской Mitsubishi Materials), специалисты приступили в начале лета 2025 года. Контроль за качеством данного процесса осуществлялся непосредственно сотрудниками Управлением по радиационной и ядерной безопасности Финляндии (STUK) [12].

В финском проекте ПГЗРО медный контейнер является одним из элементов системы ИББ, а сами упаковки с ОЯТ планируется разместить во вмещающих породах на глубине около 430 метров. Система захоронения состоит из герметичного контейнера из меди и железа; бентонитового буферного слоя, окружающего контейнер; материала засыпки туннеля из набухающей глины; конструкций для закупорки и герметизации туннелей и помещений, а также вмещающей породы.

Медный цилиндр, изготовленный из литой заготовки, вместе с приваренными к нему медным днищем и крышкой образует герметичный контейнер с толщиной стенок 5 см. При окончательном захоронении ОЯТ он служит надежным барьером, защищающим от коррозии чугунную вставку контейнера, способную вместить 12 тепловыделяющих сборок.

Отливка первой заготовки весом более 17 тонн была завершена за одну смену. Перед ее измерением и взвешиванием был взят предварительный образец материала для последующего анализа. Затем заготовку передали на распиловку, где ее передняя и задняя части были разделены по заданным размерам. На этом этапе также были отобраны пробы для изучения. После распиловки до необходимой длины ее поверхность подвергли механической обработке, далее она прошла этапы неразрушающего контроля, визуального осмотра и капиллярной дефектоскопии.

На заключительном этапе производственного процесса специалисты Posiva проводят проверку качества отливки и готовят всю необходимую документацию. При успешном прохождении данного этапа ее направляют в отсек упаковки, после чего она готова к отправке производителю контейнеров для захоронения ОЯТ. Конечный вес заготовки составил около 12 тонн [12].

Швеция

Летом 2025 года шведский оператор по обращению с РАО Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) назначил швейцарскую строительную

фирму Implenia подрядчиком по строительству первой подземной секции ПГЗРО в Форсмарке. В рамках подписанного соглашения Implenia займется проектированием и строительством туннеля доступа к первому уровню ПГЗРО, трех вертикальных вентиляционных шахт и лифта, выработок центральной зоны пункта захоронения, а также главного и транспортного туннелей — все эти объекты предполагается разместить под землей на глубине до 500 метров (рис. 6). Этап планирования работ стартует в конце 2025 года, за ним последуют стадии проектирования и строительства. Завершить все мероприятия в рамках данного контракта планируется в 2033 году [13].

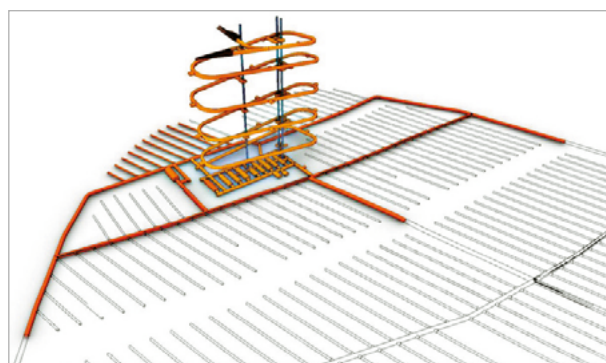


Рис. 6. Выработки шведского ПГЗРО, проходкой которых займется строительная фирма Implenia [13]

До начала сооружения подземных выработок Implenia займется возведением хозяйственных построек, мастерских и других объектов инфраструктуры на поверхности. Согласно текущим планам, на сооружение первой секции ПГЗРО и всех необходимых строений на площадке должно уйти чуть больше десяти лет, после чего в течение длительного периода времени под землей продолжатся работы по проходке дополнительных подземных секций ПГЗРО, которые позволят увеличить полезную емкость объекта [13].

Литература

1. Expert group recommends options for Norwegian waste disposal, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/expert-group-recommends-options-for-norwegian-waste-disposal> (дата обращения: 29.04.2025).
2. Reconstruction of Italian waste store begins, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/reconstruction-of-italian-waste-store-begins> (дата обращения: 22.04.2025).
3. Deep Fission, Deep Isolation ink MoU, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/deep-fission-deep-isolation-ink-mou>

org/articles/deep-fission-deep-isolation-ink-mou (дата обращения: 07.04.2025).

4. Oklo announces plans for Tennessee fuel recycling plant, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/oklo-announces-plans-for-tennessee-recycling-plant> (дата обращения: 08.09.2025).

5. Computer modelling confirms Mont Terri findings, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/computer-modelling-confirms-mont-terri-findings> (дата обращения: 04.08.2025).

6. Assessment of Asse storage chamber conditions begins, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/assessment-of-asse-storage-chamber-conditions-begins> (дата обращения: 19.08.2025).

7. Funding allocated for UK plutonium disposal research, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/funding-allocated-for-uk-plutonium-disposal-research> (дата обращения: 01.09.2025).

8. Lincolnshire withdraws from UK repository siting process, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/lincolnshire-withdraws-from-uk-repository-siting-process> (дата обращения: 04.06.2025).

9. UK parliament committee calls for speedier Sellafield clean-up, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-parliament-committee-calls-for-speedier-sellafield-clean-up> (дата обращения: 05.06.2025).

10. UK looks to robots to assist in waste management tasks, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-looks-to-robots-to-assist-in-waste-management-tasks> (дата обращения: 27.06.2025).

11. Simulator aids upgrade of Sellafield robots, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-looks-to-robots-to-assist-in-waste-management-tasks> (дата обращения: 16.07.2025).

12. Blank for first Finnish copper disposal canister produced, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/blank-for-first-finnish-copper-disposal-canister-produced> (дата обращения: 25.06.2025).

13. Collaborative partner selected for Swedish repository, World Nuclear News, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/collaborative-partner-selected-for-swedish-repository> (дата обращения: 23.06.2025).

Обзор подготовлен М. В. Ведерниковой