Швеция

В январе 2025 года шведский оператор по обращению с радиоактивными отходами (РАО), компания Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), объявил о начале практических работ по сооружению пункта глубинного геологического захоронения (ПГЗРО) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в Форсмарке (муниципалитет Эстхаммар) [1]. Процесс получения лицензии на создание этого объекта был запущен оператором еще в 2011 году, когда компания SKB обратилась с соответствующей заявкой в Суд по вопросам охраны окружающей среды и землепользования Швеции (далее — Суд).

Проведя экспертизу представленных оператором материалов, в 2018 году он направил собственное заключение по данному проекту на рассмотрение правительству, которое 27 января 2022 года официально подтвердило соответствие указанной в заявке SKB деятельности положениям Экологического кодекса Швеции. В конце октября 2024 года компания, получив экологическое разрешение на строительство и эксплуатацию ПГЗРО в Форсмарке (рис. 1) и завода по инкапсуляции ОЯТ в Оскарсхамне, приступила к проведению подготовительных работ на площадках обоих объектов [1].

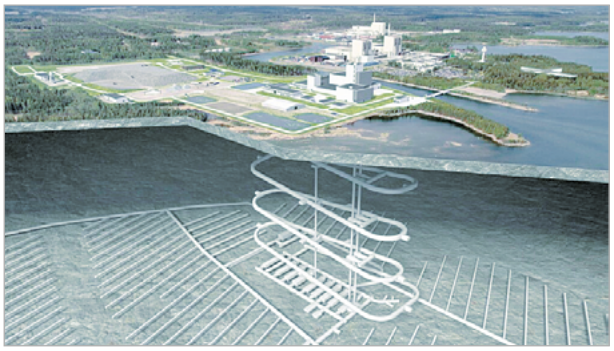

Рис. 1. Визуализация проекта шведского ПГЗРО в Форсмарке [1]

Согласно текущему графику, строительные работы займут около десяти лет, после чего ПГЗРО сможет принимать ОЯТ на захоронение параллельно с дальнейшим постепенным расширением подземных секций объекта, которое продлится в течение нескольких десятилетий. Текущий этап продолжительностью два года предусматривает проведение строительных работ на поверхности площадки, включая организацию зоны для хранения отвалов пород, сооружение моста через канал с охлаждающей водой, оборудование рабочей зоны и установок для очистки воздуха. После завершения данной стадии планируется приступить непосредственно к проходке выработок в массиве горных пород, но сделать это SKB сможет только после того, как шведский ядерный регулятор (SMM) выдаст соответствующее разрешение на основании результатов экспертизы материалов отчета по безопасности ПГЗРО.

В настоящее время SMM продолжает поэтапное изучение проектной документации по пункту захоронения, оценивая ее соответствие положениям национального закона «О ядерной деятельности». Согласно данным материалам, в Форсмарке могут быть захоронены РАО с площадок 12 реакторов[1]. При этом положения выданного Судом разрешения не распространяются на отходы, которые могут образоваться в случае потенциально возможного запуска в Швеции новой программы в сфере атомной энергетики.

Всего в ПГЗРО на глубине около 500 метров SKB планирует разместить около 6000 контейнеров, содержащих примерно 12000 тонн ОЯТ. Его подземная часть площадью около 24 гектаров (60 акров) после завершения строительных работ будет включать в себя более шести километров туннелей. Согласно текущим планам, этап захоронения ОЯТ растянется приблизительно на 70 лет, но может продлиться и дольше, если, к примеру, срок эксплуатации существующих реакторов будет решено продлить.

Помимо проекта по созданию ПГЗРО, в Швеции также активно ведутся работы по расширению подземных секций действующего пункта геологического захоронения (ПЗРО) SFR низко- и среднеактивных отходов (НАО и САО) в Форсмарке

[1] В Швеции в 1980 году был проведен «необязывающий» референдум, в ходе которого население высказалось за постепенный отказ от атомной энергетики. С тех пор шесть из 12 реакторов были остановлены, а оставшиеся производят около 30 % электроэнергии в Швеции.

Рис. 2. Проект расширения ПЗРО SFR для НАО и САО в Форсмарке [2]

(рис. 2). Он расположен на глубине 60 м под дном Балтийского моря, был введен в эксплуатацию в 1988 году и состоит из четырех туннелей протяженностью 160 м каждый и камеры из бетона высотой 50 м, предназначенной для изоляции отходов с наиболее высоким уровнем активности. Подземные секции SFR связаны с поверхностными установками комплекса посредством двух параллельно проложенных туннелей длиной один километр. В настоящее время его проектная вместимость составляет около 63 000 кубометров РАО. Большая часть короткоживущих отходов, принимаемых на захоронение SFR, поступает с АЭС, но также сюда доставляют и РАО, образовавшиеся в результате деятельности, осуществляемой с использованием радиоактивных веществ в медицинских учреждениях, исследовательских организациях и на промышленных предприятиях [2].

В декабре 2014 года компания SKB подала заявку на трехкратное увеличение полезного объема ПЗРО — до 180 000 кубических метров. Согласно разработанному проекту, его планируется расширить за счет сооружения шести новых туннелей протяженностью от 240 до 275 м на глубине 120—140 м. В ноябре 2024 года регулятор завершил процедуру экспертизы и одобрил материалы предварительного отчета, обосновывающего безопасность данного проекта, а это значит, что оператор наконец сможет приступить к проведению строительства на площадке.

В декабре 2024 года стартовал подготовительный этап, а 23 января 2025 года на глубине 45 метров начались буровзрывные работы, за проведение которых отвечает строительная компания Skanska. Ожидается, что на создание новых секций ПЗРО SFR уйдет около 6 лет: три года на реализацию горнопроходческих работ и еще три — на оборудование туннелей захоронения [2].

Финляндия

В начале марта 2025 года финский оператор по обращению с РАО, компания Posiva, объявил об успешном завершении опытных работ, направленных на демонстрацию функциональных возможностей нового завода по инкапсуляции ОЯТ на площадке в Олкилуото, который станет частью развертываемого комплекса по окончательному захоронению топлива. Согласно проекту, перед непосредственным захоронением ОЯТ в ПГЗРО[1] его требуется транспортировать из пункта промежуточного хранения на завод по инкапсуляции: здесь ОЯТ изолируют в герметичных пеналах из меди и чугуна с шаровидным графитом (рис. 3), предназначенных для окончательного захоронения. Затем их планируется доставлять в подземные туннели ПГЗРО, расположенные на глубине 400—450 м, и далее устанавливать в скважины захоронения, обсаженные буфером из бентонита [3].

Рис. 3. Пеналы для окончательного захоронения ОЯТ в ПГЗРО Олкилуото [3]

К настоящему времени оператор отчитался о завершении данного этапа работ на заводе по инкапсуляции ОЯТ в рамках проекта по «Опытной эксплуатации объектов окончательного захоронения»[2] (англ. Trial Run of Final Disposal,

[1] Работы по сооружению ПГЗРО на площадке в Олкилуото стартовали в декабре 2016 года, после того как в ноябре 2015 года оператором была получена соответствующая лицензия. По состоянию на конец мая 2025 года разрешение на эксплуатацию объекта до сих пор не выдано. Осенью 2024 года, ссылаясь на большой объем как изначально предоставленных оператором материалов, так и обновленных и уточненных данных по проекту, финский ядерный регулятор STUK обратился к Министерству экономики и занятости Финляндии с просьбой о продлении сроков проведения экспертизы. В результате его решением предельная дата окончания процедуры рассмотрения материалов заявки была сдвинута на 31 декабря 2025 года.

[2] В рамках данного проекта вместо настоящего ОЯТ специалисты используют специально спроектированные нерадиоактивные элементы-имитаторы.

TRFD), запущенного в августе 2024 года. В начале 2025 года пятая, и последняя, из запланированных в ходе данных испытаний упаковка с топливом была успешно инкапсулирована, прошла все необходимые проверки и была доставлена в подземную секцию ПГЗРО на глубине 430 метров. Помимо этого, в рамках этапа опытной эксплуатации в соответствии с разработанными инструкциями было произведено повторное извлечение одного доставленного раннее на глубину захоронения пенала: он был транспортирован на площадку завода по инкапсуляции. Результаты проведенных работ позволили финским специалистам выделить технические области, связанные с его эксплуатацией и требующие дальнейшей доработки, в том числе усовершенствования конструкции некоторых элементов оборудования.

В соответствии с проектом TRFD экспериментально тестируются и другие аспекты, связанные с практической реализацией окончательного захоронения ОЯТ в финском ПГЗРО. Так, в марте 2025 года представители компании Posiva объявили об успешном завершении квалификационных испытаний установки для загрузки буферного материала в подземных секциях будущего ПГЗРО[1], в ходе которых с использованием специально спроектированной системы материалом из глины была выполнена засыпка подземного туннеля протяженностью около 12 метров (рис. 4) [4].

Рис. 4. Система установки засыпки в туннеле финского ПГЗРО [4]

В рамках этих квалификационных испытаний требовалось продемонстрировать функциональные возможности систем и оборудования, созданных для установки засыпки, в условиях их работы под землей на глубине 435 метров и использование тех же методов и процедур, которые предусмотрены проектной документацией на этапе промышленной эксплуатации ПГЗРО. При проведении исследований, продлившихся около трех недель, перед командой финских специалистов была поставлена задача заполнить материалом засыпки не менее 10 метров от общей протяженности туннеля[2].

Для практической реализации этой задачи была использована специально сконструированная машина, которую также именуют «комбинированной системой для обратной засыпки туннелей». Этот крупный агрегат вытянутой формы почти полностью занимает все поперечное сечение туннеля и позволяет достаточно равномерно распределять и уплотнять материал засыпки по всему его объему. Гранулированный бентонит подается в машину из специальных транспортных средств (включая автономно управляемые, AGV), которые доставляют глину из наземного хранилища в подземный туннель. Изнутри она оснащена мощными механизмами (в том числе крупными винтами), которые не только проталкивают глину внутрь выработки, но и одновременно уплотняют ее. По мере заполнения туннеля материалом засыпки, машина медленно движется назад, обеспечивая равномерное и контролируемое заполнение по всей его протяженности.

Следует отметить, что поскольку такие манипуляции проводятся на большой глубине под землей, разработчики проекта предусмотрели высокую степень автоматизации выполняемых данным агрегатом операций с возможностью дистанционного управления, что потребовало внедрения систем машинного зрения, лазерных датчиков и камер, которые позволяют операторам контролировать процесс с безопасного расстояния.

Одной из проблем, с которыми столкнулась команда специалистов Posiva во время проведения этих испытаний, оказались неровности пола туннеля, что поначалу слегка сказалось на скорости выполнения работ. Однако изначально машина была спроектирована с учетом того,

[1] ПГЗРО планируется разместить на глубине около 430 метров. Система захоронения состоит из герметичного пенала из железа и меди, буфера из бентонита, заключающего в себе пенал, материала для засыпки туннеля из разбухающей глины, уплотнительных конструкций для герметизации туннелей и помещений и вмещающей породы.

[2] Согласно проектной документации, общая протяженность одного туннеля ПГЗРО составляет 50 м. Оставшиеся 40 м планируется заполнить материалом засыпки позднее, на этапе опытной эксплуатации ПГЗРО.

чтобы максимально эффективно справляться с такими условиями и обеспечивать равномерную засыпку, несмотря на любые возможные дефекты поверхности, по которой она перемещается. Участники испытаний отметили, что им довольно быстро удалось настроить оборудование, обеспечив изначально предусмотренный проектом темп выполнения работ.

Следующий, заключительный этап квалификационных испытаний в рамках проекта TRFD будет сосредоточен на тестировании осуществления герметизации туннелей захоронения пробками из бетона, а также диагностике транспортных средств, предназначенных для доставки и установки пеналов с ОЯТ в ПГЗРО, после чего, в случае их успешного проведения, планируется перейти к комплексной опытной эксплуатации, в ходе которой будут опробованы возможности всей системы захоронения в целом [4].

Франция

Во Франции продолжаются работы по созданию собственного ПГЗРО (фр. Centre Industriel de Stockage Géologique, Cigéo): этот проект предусматривает окончательное захоронение высокоактивных отходов (ВАО) и долгоживущих САО на глубине около 500 метров в системе подземных туннелей во вмещающей среде из калловей-оксфордской глины мощностью около 145 метров в районе Бюр, что на границе департаментов Мёз и Верхняя Марна, к востоку от Парижа (рис. 5). Ответственность за финансирование проекта, осуществляемого под руководством копании Andra, возложена на французских производителей РАО — компании EDF, Orano и CEA [5].

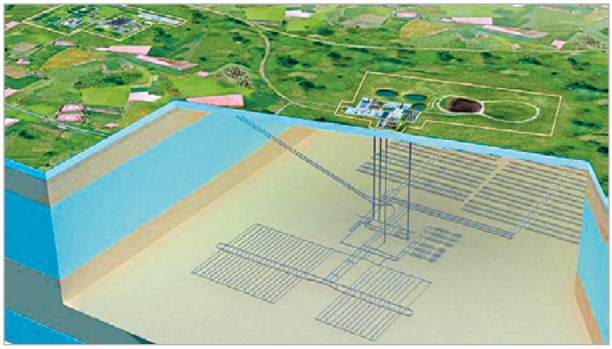

Рис. 5. Проект французского ПГЗРО Cigéo [5]

Что касается общей стоимости реализации данного проекта, то за последние годы Andra многократно проводила оценку соответствующих затрат. В 2005 году оператор определил стоимость проекта в сумму от 13,5 до 16,5 млрд евро. Однако в 2009 году после повторной переоценки она взлетела до 36 млрд евро. В октябре 2014 года Andra обновила результаты проведенного ранее анализа, оценив суммарные затраты на выполнение проекта в размере 34,4 млрд евро по курсу 2012 года, в том числе 19,8 млрд евро на строительство самого объекта; 8,8 млрд евро — на его эксплуатацию в течение следующих 100 лет; 4,1 млрд евро — на налоговые сборы и 1,7 млрд евро — на прочие расходы.

В мае 2025 года Andra опубликовала результаты последней оценки затрат на реализацию проекта Cigéo, согласно которым стоимость строительства и ввода ПГЗРО в эксплуатацию составит от 7,9 до 9,6 млрд евро, с учетом проектирования (без НИОКР), строительства объектов инфраструктуры на поверхности и оборудования первых зон для захоронения РАО под землей, а также издержек, связанных с налоговым обложением и страхованием.

С момента ввода ПГЗРО в эксплуатацию в 2050 году[1] в среднем расходы на проект Cigéo оцениваются в пределах от 140 до 220 млн евро в год, включая эксплуатацию, проведение строительных работ по постепенному увеличению полезного объема ПГЗРО, технического обслуживания и реконструкции в течение примерно 100 лет; после чего последует этап вывода из эксплуатации (ВЭ) и закрытия ПГЗРО, который растянется примерно на 20 лет. На его осуществление, согласно расчетам, уйдет в общей сложности от 16,5 до 25,9 млрд евро. Стоимость НИОКР, определенная на сегодняшний день, в том числе на эксплуатацию и закрытие подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), оценивается в пределах от 1,7 до 2 млрд евро [5].

К концу 2025 года планируется подписание соответствующего указа о затратах на проект Cigéo министром промышленности и энергетики Франции. Окончательные суммы установят по итогам предстоящих консультаций с представителями Управления по ядерной безопасности и радиационной защите (ASNR) и основных производителей РАО (EDF, Orano, CEA). Они

[1] При условии получения разрешения на сооружение ПГЗРО в конце 2027 — начале 2028 года доставка первых партий отходов на площадку для их окончательного захоронения в настоящее время намечена на 2050 год.

послужат ориентиром для принятия дальнейших управленческих решений в сфере обращения с РАО во Франции [5].

Южная Корея

В конце февраля 2025 года, после девяти лет дискуссий и споров между представителями правящей и оппозиционной партий, Национальная Ассамблея Южной Кореи приняла «Специальный закон об обращении с высокоактивными радиоактивными отходами (ВАО), предусматривающий к 2050 году строительство пунктов их временного хранения и пункта окончательного захоронения к 2060 году. Это стало важнейшей вехой на пути разрешения давно наболевшего для страны вопроса: Южная Корея, являясь одним из государств с развитой атомной энергетикой, до недавнего времени не обладала однозначной и всеобъемлющей законодательной базой, позволяющей решить проблемы в области долгосрочного обращения с ВАО и ОЯТ. Все эти годы топливо накапливалось на площадках южнокорейских АЭС в пристанционных временных хранилищах, ресурс которых в скором времени мог быть полностью исчерпан. По сути, принятие этого закона наконец предоставило государству необходимый правовой инструмент для решения этой критически важной для страны проблемы.

Важно, что положения закона фиксируют конкретные сроки строительства и ввода в эксплуатацию двух категорий объектов: пункта временного хранения (ПХ) ВАО — его необходимо построить к 2050 году, и пункта окончательного геологического захоронения (ПГЗРО), который должен быть введен в эксплуатацию к 2060 году. После завершения работ по сооружению ПХ, ОЯТ будет в короткие сроки вывезено из пристанционных хранилищ, а его дальнейший ввоз с других АЭС, с целью размещения в них, будет запрещен [6].

Таким образом, принятием этого закона была обозначена дорожная карта для реализации Правительством Южной Кореи и ответственными организациями дальнейшей деятельности по долгосрочному обращению с РАО. Так, согласно его положениям, при премьер-министре страны будет учрежден специальный Комитет по обращению с ВАО. Также положения закона определили комплексный подход к обращению с ВАО и ОЯТ: широкий спектр вопросов, связанных с этой сферой, включая сооружение и эксплуатацию ПХ и ПГЗРО; процедуру выбора площадок для их размещения; создание подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) для проведения исследований и испытания технологий, необходимых для строительства и безопасной эксплуатации ПГЗРО.

Помимо этого, в положениях закона оговорены процедуры по взаимодействию с общественностью и меры по поддержке местных жителей в близлежащих районах при создании ПХ и ПГЗРО, а также описаны механизмы учета их мнения и диалога с населением, призванные снизить социальную напряженность, как правило, возникающую в случае реализации подобных проектов. Кроме того, закон стимулирует дальнейшие исследования и разработки в области обращения с ВАО и ОЯТ, включая методы хранения, транспортировки и окончательного захоронения РАО, что, очевидно, станет стимулом для дальнейшего развития технологий и инноваций в этой сфере [6].

Великобритания

В конце января 2025 года правительство Великобритании объявило о планах государства по иммобилизации и окончательной изоляции в национальном ПГЗРО около 140 тонн плутония, образовавшегося в результате нескольких десятилетий переработки ОЯТ от эксплуатируемых АЭС и в настоящее время находящегося на хранении в Селлафилде (Камбрия) (рис. 6) [7].

Рис. 6. Хранилище на территории завода по переработке ядерного топлива в Селлафилде [7]

В 2011 году в Великобритании была запущена процедура общественных консультаций, по итогам которых тогдашнее правительство страны сформировало предварительную позицию по поводу дальнейшей политики обращения

с накопленными объемами плутония, предусматривающую его переработку в смешанное оксидное (МОКС) топливо. Однако при этом власти страны оставались открытыми к рассмотрению любых других альтернативных предложений. В дальнейшем Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании (NDA) занялось углубленным анализом различных аспектов, связанных с этим вопросом, которые бы позволили на основании технических, экономических и производственных показателей определить наиболее предпочтительную стратегию обеспечения долгосрочной безопасности обращения с накопленными объемами плутония, включая варианты его переработки и повторного использования. В итоге на основе результатов проведенного многостороннего анализа и был выбран вариант иммобилизации и окончательного захоронения плутония в ПГЗРО.

Ожидается, что следующим этапом в реализации данной стратегии станет получение одобрения от правительства страны на запуск крупномасштабной программы по утилизации плутония. Она, в свою очередь, потребует строительства завода по переработке ядерных материалов и пункта временного хранения на территории Селлафилдского комплекса уже к концу этого десятилетия, а до этих пор плутоний будет по-прежнему храниться там в специально спроектированных для этих целей объектах, обеспечивающих его безопасность и сохранность в соответствии с современными нормативными требованиями.

Что касается самого ПГЗРО, в котором планируется окончательно изолировать указанные объемы плутония наряду с другими ВАО и долгоживущими САО, то в настоящее время в Великобритании активно ведется работа над созданием такого объекта. Предполагается, что он, в соответствии с опытом других стран, будет представлять собой сеть высокотехнологичных подземных камер и туннелей, расположенных глубоко под землей. В качестве среды, пригодной для размещения такого объекта, рассматриваются породы на глубине от 200 до 1 000 метров под землей или под морским дном (рис. 7). Согласно оценкам экспертов, процесс поиска подходящей площадки может занять 10—15 лет, а начало работ по захоронению РАО в ПГЗРО в настоящее время намечено на 2050—2060 гг. [8].

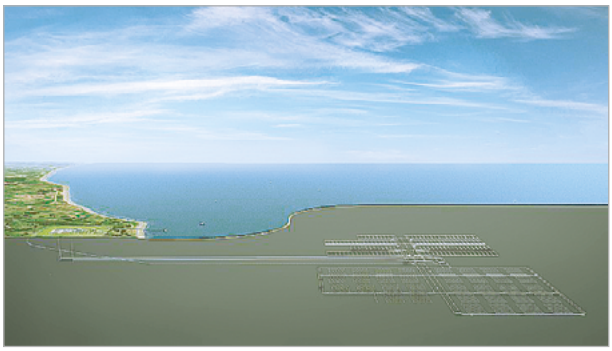

Рис. 7. Эскизный проект возможного варианта размещения ПГЗРО в Великобритании [8]

В своей работе Nuclear Waste Services (NWS) — компания, занимающаяся поиском потенциально пригодных для сооружения ПГЗРО площадок в Великобритании — руководствуется тремя ключевыми факторами, сочетание которых позволит выбрать оптимальную по всем параметрам: подходящая подземная вмещающая геологическая среда, расположенная на достаточной глубине, способная безопасно и надежно изолировать и удержать радиоактивные вещества на протяжении десятков тысяч лет; оптимальное с точки зрения возможностей для создания необходимой наземной инфраструктуры расположение на поверхности земли; возможность организации доступа к подземной и наземной частям объекта и сообщения между ними.

К январю 2025 года круг регионов, потенциально рассматриваемых в контексте строительства ПГЗРО, был сужен до трех — это Мид-Коупленд и Саут-Коупленд в Камбрии, на северо-западе страны, и Восточный Линкольншир (северо-восточная Англия). В пределах каждого региона были обозначены так называемые приоритетные области (англ. Areas of Focus): две из них — на поверхности в Мид-Коупленде к востоку от Селлафилда и Сискейла и в Саут-Коупленде — надземная площадка к западу от Хэвеpигга. При этом приоритетная область размещения подземных объектов для этих расположенных у побережья территорий является общей. В Восточном Линкольншире была определена еще одна — земли к северу от трассы A157, к юго-западу от ветропарка Гейтон, между деревнями Гейтон-ле-Марш и Грейт-Карлтон.

Все указанные выше приоритетные области были выявлены предварительно на основании уже имевшейся информации, в том числе геологических данных, сведений о природоохранных

территориях и существующей застройке. Однако факт включения в данный перечень вовсе не означает, что ПГЗРО будет обязательно сооружен именно там. Задача этого этапа исследований состояла лишь в том, чтобы сузить круг потенциально пригодных для строительства площадок-кандидатов и способствовать сосредоточению усилий на проведении более детальных исследований в конкретных областях, включая оценку этих территорий в контексте транспортной доступности, экологической безопасности, характеризации геологической среды и т. п.

На основании результатов дельнейшего подробного анализа уже может быть определена одна единственная наиболее предпочтительная площадка для сооружения ПГЗРО. При этом представители NWS подчеркивают, что процесс ее утверждения полностью основывается на принципе добровольного согласия местных жителей (англ. consent-based), а значит объект не может быть построен где бы то ни было при отсутствии должной поддержки со стороны населения.

В настоящее время наряду с технологией окончательного захоронения ВАО и долгоживущих САО в ПГЗРО Великобритания изучает перспективы создания пункта глубинного скважинного захоронения. Данная концепция рассматривается в качестве возможной альтернативы традиционному геологическому захоронению, предусматривает инкапсуляцию РАО в стойкие к воздействию коррозии контейнеры и их загрузку в сверхглубокие скважины, уходящие в геологических формациях на глубину 1—3 километра.

В декабре 2022 года под эгидой Министерства энергетической безопасности Великобритании и Фонда предпринимателей в сфере энергетики Net Zero (DESNZ) был запущен проект, сыгравший важную роль в тестировании запатентованной американской компанией Deep Isolation технологии скважинного захоронения ОЯТ и ВАО: по его результатам уровень ее готовности (TRL) был повышен с третьего до шестого, а результаты другого исследования, проведенного в 2023 году специалистами Deep Isolation по заказу NDA, свидетельствуют о том, что применение данного подхода можно считать целесообразным как с промышленной, так и с коммерческой точки зрения в отношении части накопленного в Великобритании реестра отходов.

В марте 2025 года Deep Isolation был представлен уже второй по счету прототип контейнера для глубинного скважинного захоронения РАО, полностью изготовленный в Великобритании (рис. 8) [9]. Он является совместной разработкой компании с UK Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC), NAC International, Inc. и Селлафилдского университета, его длина почти 5 метров и вес более 2 000 кг, и предназначен для герметизации облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) (в частности, сборок водо-водяных реакторов под давлением) в целях их последующего сухого хранения, транспортировки и окончательного захоронения. Изготовленный прототип контейнера планируется использовать в ходе дальнейших испытаний для «подтверждения безопасности и осуществимости технологии скважинного захоронения, укрепления доверия представителей отрасли к этой технологии и обеспечения основы для принятия соответствующих решений регулирующими органами».

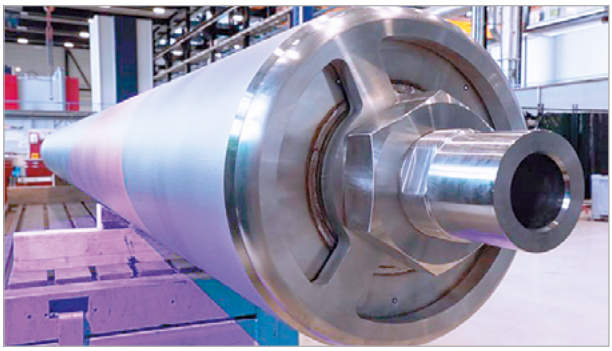

Рис. 8. Изготовленный в Великобритании прототип контейнера для глубинного скважинного захоронения РАО [9]

Кроме того, реализация полного цикла производства такого контейнера, отвечающего национальным требованиям в области захоронения РАО, также обеспечит британским производителям конкурентное преимущество на мировом рынке, потребность которого в них в ближайшие 20—30 лет оценивается экспертами в сумму свыше 100 млрд фунтов стерлингов.

Помимо деятельности по созданию новых мощностей для захоронения РАО, в Великобритании продолжаются работы по обеспечению безопасности на объектах ядерного наследия, в том числе на площадках пунктов захоронения исторических отходов. Так, в феврале 2025 года на территории пункта захоронения НАО (LLWR) в Дригг (Западная Камбрия) был запущен проект по установке нового защитного слоя поверх одной из его траншей. LLWR принимает твердые

НАО на захоронение начиная с 1959 года: в основном это защитная одежда, оборудование и строительный мусор, поступающие с установок ядерной энергетики, из медицинских и научных учреждений, промышленных предприятий и т. п. В Дригг эти отходы захоранивают в специально спроектированных для этих целей траншеях.

Установка защитного верхнего слоя поверх траншеи ПЗРО представляет собой реализацию одного из этапов комплексной программы по обращению с РАО, осуществляемой в Дригг на протяжении последних десяти лет. Задача текущей стадии состоит в замене временного защитного слоя, установленного поверх траншеи № 7[1], постоянным, срок службы которого составит не менее 100 лет. В итоге он обеспечит долгосрочную изоляцию ранее захороненных в траншее РАО, выполняя функции надежного барьера, предотвращающего как проникновение воды внутрь ПГЗРО, так и выход радиоактивных веществ за его пределы в окружающую среду, а также стабилизацию ландшафта и снижение любых потенциальных рисков для здоровья человека и природы [10]. Сооружение верхнего покрытия — это сложный и многоступенчатый процесс, предусматривающий размещение различных материалов в несколько слоев, каждый из которых выполняет определенную функцию: дренажные предусмотрены для отвода дождевого стока; водонепроницаемые, такие как глина или геомембраны, обеспечивают изоляционные свойства; грунт и растительность препятствуют развитию процессов эрозии и способствуют стабилизации ландшафта.

Материал заполнителя для формирования защитного слоя доставляют на площадку железнодорожным транспортом из гранитного карьера Шап в Камбрии: каждый состав способен вместить более 750 тонн. Всего за трехлетний период в Дригг планируется перевезти порядка 280 000 тонн заполнителя при условии выполнения 8 рейсов каждую неделю. Ожидается, что на установку покрытия траншеи № 7 уйдет несколько месяцев, а затем аналогичные работы будут проведены и на других траншеях. Окончательное закрытие ПГЗРО в Дригг намечено на 2135 год, а мощность защитного слоя, покрывающего траншеи захоронения, к тому времени должна составить около 10 метров [10].

[1] Это одна из крупнейших и наиболее старых траншей на площадке, принимавшая отходы на захоронение вплоть до 1988 года (т. е. еще до начала использования современных контейнеров для РАО).

США

В начале марта 2025 года руководство Опытной установки по изоляции трансурановых РАО[2] (WIPP) в штате Нью-Мексико объявило о завершении основного этапа работ по вводу в эксплуатацию новой сверхмощной системы вентиляции (англ. Safety Significant Confinement Ventilation System, SSCVS) (рис. 9).

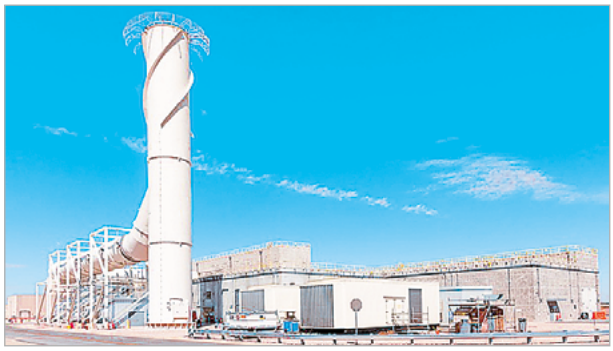

Рис. 9. Внешний вид вентиляционной установки SSCVS [11]

Данный проект, стоимость которого изначально оценивалась в 288 миллионов долларов, был запущен в 2018 году. Строительно-монтажные работы на площадке были окончены в июне 2024 года, а пусконаладочный процесс, стартовавший осенью того же года, завершился в марте 2025 года. В итоге, по оценкам экспертов, к моменту выполнения проекта суммарные затраты на его реализацию могут составить около 494 миллионов долларов.

На следующем этапе в WIPP началось обучение персонала площадки работе с новым оборудованием, после чего в течение 2025 года ожидается уже полномасштабный пуск системы в эксплуатацию.

Следует отметить, что развертывание данной системы воздухообмена на территории комплекса WIPP является частью масштабного проекта, реализуемого Министерством энергетики США, по увеличению мощности воздушного

[2] WIPP — единственный в США пункт захоронения трансурановых РАО, в том числе одежды, инструментов, ветоши, обломков строительных конструкций, мусора, почвы и других предметов, загрязненных небольшими количествами плутония и других техногенных радиоактивных элементов в результате осуществления оборонной программы США. ПГЗРО WIPP, введенный в эксплуатацию в 1999 году, размещен в отложениях каменной соли на глубине 650 метров ниже уровня поверхности земли.

вентилирования подземных помещений ПГЗРО, что позволило бы проводить работы по размещению герметичных контейнеров с отходами в его камерах одновременно с проходкой новых выработок и операциями по техническому обслуживанию объекта. Так, ожидается, что после ввода в эксплуатацию SSCVS позволит увеличить объем вентилирования воздуха в WIPP с 4 814 до 15 300 м^3 в минуту.

Такая современная система не только обеспечит эффективное вентилирование воздуха в подземных помещениях WIPP, но и его очистку от частиц соли. Также она способна при необходимости отводить воздух в высокопроизводительную систему фильтрации со значительной степенью очистки (HEPA), способную удалять из воздуха 99,97 % любых взвешенных включений размером до 0,3 микрона перед его выбросом в окружающую среду.

SSCVS состоит из двух основных зданий: первое — для снижения содержания соли (англ. Salt Reduction Building), там осуществляется предварительная очистка поступающего из подземных секций ПГЗРО воздуха, который затем направляют во второе здание (англ. New Filter Building), оснащенное вентиляторами и 22 блоками HEPA-фильтрации (рис. 10). SSCVS работает в тандеме с новой вспомогательной шахтой, через которую свежий воздух нагнетается в подземные отсеки WIPP.

Рис. 10. Блоки HEPA-фильтров внутри помещений SSCVS [11]

В настоящее время на площадке проводятся все необходимые мероприятия, задача которых состоит в подтверждении возможности полной интеграции SSCVS с другими системами, функционирующими в WIPP, демонстрации надлежащего уровня эксплуатации всех основных и резервных устройств, а также наличия необходимых для работы с новым оборудованием навыков и опыта у персонала площадки. После завершения всех проверок и получения соответствующего одобрения от Управления по охране окружающей среды Министерства энергетики США SSCVS будет подключена к общей системе подземного вентилирования WIPP [11].

Канада

В мае 2025 года генеральный директор канадского оператора по обращению с РАО, NWMO, огласил перечень из пяти компаний, которым предстоит заняться проектированием и планированием работ по созданию ПГЗРО. Согласно имеющимся на сегодняшний день планам, он будет построен на северо-западе провинции Онтарио. Так, в ноябре 2024 года, спустя четырнадцать лет с момента запуска процедуры поиска площадки для его сооружения, основанной на принципе добровольного участия и согласия местных жителей, территории возле озера Вабигун, населенные народностью оджибве, и земли неподалеку от поселка Игнас были определены в качестве основных кандидатов для строительства ПГЗРО.

В настоящее время продолжается процедура оценки выбранных площадок регулирующими органами. При этом в Канаде она характеризуется одной важной особенностью: в отличие от других стран, непосредственное участие в процессе принятия решений, помимо самого ядерного регулятора в лице Канадской комиссии по ядерной безопасности и правительства страны, принимают и представители коренных жителей. Для этого под руководством местной общины в настоящее время ведется разработка специальной процедуры регулирующей оценки, с помощью которой проект создания ПГЗРО и связанные с ним воздействия оценят, в частности, и на предмет соответствия ценностям аборигенных народов.

Одновременно с этими процессами оператор NWMO в сотрудничестве с пятью выбранными компаниями (WSP Canada Inc, Peter Kiewit Sons ULC (Kiewit), Hatch Ltd, Thyssen Mining Construction of Canada Ltd и Kinectrics Inc.) приступил к проектированию будущего ПГЗРО. При этом ответственность за разные аспекты, связанные с его разработкой, была разделена между ними следующим образом [12]:

- WSP осуществляет общее архитектурное и инженерное проектирование наземных

сооружений на площадке, обеспечивая их интеграцию в общую инфраструктуру комплекса; при этом не отвечает за инжиниринг и проектирование шахтных стволов, отвалов пустой породы, надшахтных копров и спускоподъемных механизмов, а также завода по упаковке ОЯТ;
- Peter Kiewit Sons ULC (Kiewit) контролирует проектирование объектов наземной инфраструктуры, необходимых для сооружения и эксплуатации подземных секций;
- Hatch отвечает за все проблемы, связанные с проведением горнопроходческих работ под землей, а также обращение с отвалами пустой породы, организацию шахтных стволов, надшахтных копров и спускоподъемных систем. Кроме того, Hatch займется решением любых вопросов, связанных с ядерными установками на площадке ПГЗРО и заводом по упаковке ОЯТ;
- Thyssen Mining займется проектированием подземных выработок, предназначенных для обслуживания, проведения испытаний и демонстрационных тестов, а также проходкой трех стволов, ведущих к подземным секциям;
- Kinectrics выступает в роли консультанта по ядерным вопросам, предоставляя NWMO экспертные знания в области ядерных технологий, лицензирования, обращения с ядерными материалами и РАО, задача которого состоит в обеспечении соответствия проекта самым высоким стандартам безопасности и качества.

Испания

В начале мая 2025 года испанский ядерный регулятор одобрил предложение оператора выводимой из эксплуатации АЭС Гаронья о расширении площадки пункта временного сухого хранения ОЯТ. После ее окончательного закрытия в 2017 году, которому предшествовали продолжительные дискуссии и споры о продлении срока ее работы[1], в июле 2023 года право собственности на АЭС официально перешло от ее бывшего оператора (Nuclenor) к Испанской национальной компании по обращению с РАО (Enresa), что позволило приступить к практической реализации работ по ее демонтажу [13].

Ключевым элементом процесса вывода АЭС из эксплуатации стало обустройство площадки для локального временного сухого хранения ОЯТ (исп. Almacén Temporal Individualizado, ATI). Ее основная функция — обеспечить безопасное и стабильное сухое хранение топлива, выгружаемого из пристанционного бассейна выдержки, а также некоторых других отходов, образующихся в ходе демонтажа АЭС.

Перед размещением в ATI ОЯТ упаковывают в специальные двухцелевые металлические контейнеры типа ENUN 52B, предназначенные как для хранения, так и для последующей транспортировки топлива. Каждый из них изготовлен из кованой углеродистой стали с полимерной оболочкой и способен вместить 52 топливные сборки. Площадка хранения, введенная в эксплуатацию в 2017 году, состоит из двух сейсмически устойчивых железобетонных плит, на которых может быть размещено в общей сложности 12 двухцелевых контейнеров типа ENUN 52B [13].

Рис. 11. Пять контейнеров с ОЯТ, размещенных на площадке ATI в марте 2024 года [13]

Благодаря решению, принятому испанским регулятором, размер ПХ может быть увеличен еще почти на 1 000 квадратных метров, что позволит к 2027 году разместить на этой площадке все оставшееся в пристанционном хранилище отработанное топливо. Следует отметить, что ATI является временным решением для хранения ОЯТ, и в конечном итоге оно как с территории АЭС Гаронья, так и со всех других испанских атомных электростанций должно быть перевезено в пункт централизованного временного хранения (исп. Almacén Temporal Centralizado,

[1] Установленный на АЭС Гаронья кипящий реактор мощностью 446 МВт, введенный в эксплуатацию в 1971 году, был признан CSN пригодным для использования до 2019 года при условии его частичной модернизации. Однако в сентябре 2012 года оператор Nuclenor — совместное предприятие Endesa и Iberdrola — не подал вовремя заявку на продление разрешения на эксплуатацию реактора. Из-за чего его требовалось закрыть к моменту истечения срока действия имевшейся на тот момент лицензии (6 июля 2013 года). В итоге реактор был остановлен раньше срока — в середине декабря 2012 года, что позволило оператору избежать целого ряда налоговых издержек.

АТС), а затем окончательно изолировано в ПГЗРО.

Согласно текущим оценкам, на ВЭ АЭС Гаронья, в соответствии с выбранной стратегией, предусматривающей ее немедленный полный демонтаж в 2 этапа, должно уйти около 10 лет. На первой стадии основная часть работ будет сосредоточена на загрузке ОЯТ в контейнеры и их перемещении из пристанционного бассейна хранения на площадку ATI. Кроме того, также запланирован демонтаж здания машинного зала, что необходимо для подготовки площадки ко второму этапу вывода АЭС из эксплуатации.

Этот процесс, намеченный на 2026—2033 гг., предусматривает демонтаж помещения реактора и других объектов, имеющих радиоактивное загрязнение; дезактивацию и снос объектов инфраструктуры, имеющихся на территории площадки АЭС, а также проведение работ по ее экологическому восстановлению.

Литература

1. Sweden breaks ground for used fuel repository, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/sweden-breaks-ground-for-used-fuel-repository (дата обращения: 15.01.2025).
2. Expansion of Swedish repository under way, URL:https://www.world-nuclear-news.org/articles/expansion-of-swedish-repository-under-way (дата обращения: 24.01.2025).
3. Trial run at Finnish encapsulation plant completed, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/trial-run-at-finnish-encapsulation-plant-completed (дата обращения: 05.03.2025).
4. Posiva completes backfilling trial run at repository, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/posiva-completes-backfilling-trial-run-at-repository (дата обращения: 14.03.2025).
5. Andra updates French repository cost estimate, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/andra-updates-french-repository-cost-estimate (дата обращения: 13.05.2025).
6. South Korea enacts legislation on high-level waste, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/south-korea-enacts-legislation-on-high-level-waste (дата обращения: 04.03.2025).
7. UK opts for disposal of plutonium inventory, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-opts-for-disposal-of-plutonium-inventory (дата обращения: 24.01.2025).
8. UK's search for geological disposal site narrows potential locations, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-opts-for-disposal-of-plutonium-inventory (дата обращения: 30.01.2025).
9. UK government-funded project milestone for borehole disposal, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-government-funded-project-milestone-for-borehole-disposal (дата обращения: 17.03.2025).
10. Capping of UK repository progresses, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/capping-of-uk-repository-progresses (дата обращения: 27.02.2025).
11. Commissioning milestone for WIPP ventilation facility, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/commissioning-milestone-for-wipp-ventilation-facility (дата обращения: 27.02.2025).
12. Vendors selected for Canadian deep geologic repository, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/vendors-selected-for-canadian-deep-geologic-repository (дата обращения: 13.05.2025).
13. Expansion of Garoña used fuel store approved, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/expansion-of-garona-used-fuel-store-approved (дата обращения: 02.05.2025).

Обзор подготовлен М. В. Ведерниковой