

Канада

В конце марта 2021 года Канадский центр устойчивого развития ядерной энергетики (Centre for Canadian Nuclear Sustainability, CCNS), осуществляющий свою деятельность в составе компании OPG (Ontario Power Generation), заявил о предстоящем сотрудничестве с Moltex Energy в рамках проекта по обоснованию технической эффективности технологии повторного использования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) из реакторов CANDU. Всего на эти цели OPG планирует выделить 1 млн канадских долларов (800 000 долларов США). Сам Центр был учрежден OPG в 2020 году для работы над инновационными ядерными проектами, а также оказания содействия в проведении исследований, направленных на поиск решений по минимизации объемов накопленных РАО. В проекте также участвуют канадские ядерные лаборатории, оказывающие поддержку в проведении работ по проектированию, сооружению и оптимизации конструкций испытательного оборудования в рамках Канадской инициативы по ядерным исследованиям¹, и Университет Нью-Брансуика, задействованный в изысканиях и испытаниях [1].

Как ожидается, данный проект позволит усовершенствовать существующую технологию Waste to Stable Salt (WATSS), созданием которой занимается Moltex, стремящаяся к повышению экологической устойчивости ядерной энергетики. Разработанный проект реактора Wasteburner (SSR-W) представляет собой разновидность конструкции жидкосолевого реактора (англ. Stable Salt Reactor, SSR), принцип работы которого основан на повторном использовании переработанного топлива. В планах компании — строительство блока SSR-W мощностью 300 МВт и сопутствующего объекта WATSS на площадке Пойнт-Лепро в Сент-Джоне (Нью-Брансуик) с запуском обеих установок к началу 2030-х годов (рис. 1).

Недавно Федеральное правительство Канады инвестировало около 50,5 млн канадских



Рис. 1. Проект площадки Пойнт-Лепро в Сент-Джоне (Нью-Брансуик)

долларов в разрабатываемый Moltex проект SSR-W. Эта сумма представляет собой часть общих инвестиций в размере 56 млн канадских долларов, направленных на поддержку исследований и развитие технологий малых модульных реакторов в Нью-Брансуике [1].

По данным Организации по обращению с ядерными отходами Канады (NWMO), ответственной за реализацию национального проекта по созданию пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ, в настоящее время в стране накоплено около 3 млн отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Таким образом, внедрение описанной выше технологии потенциально будет способствовать снижению объемов ОЯТ, требующих размещения в ПГЗРО.

США

В апреле 2021 года Технический наблюдательный совет по радиоактивным отходам (англ. Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB) подготовил отчет, обозначив те шаги, которые следует предпринять Министерству энергетики США с целью разработки надежной, безопасной и эффективной программы по обращению с ядерными отходами в США, в том числе по обеспечению основы для успешной реализации проекта создания пункта глубинного геологического захоронения РАО (ПГЗРО). В отчете подчеркивается, что отсутствие прогресса в разработке и реализации этого проекта

¹ англ. Canadian Nuclear Research Initiative (CNRI) — программа поддержки совместных исследовательских проектов малых модульных реакторов (SMR), оказываемой сторонними компаниями, заинтересованными в развитии данной технологии в Канаде. Цель программы — ускорить процесс внедрения безопасных, надежных, экологически чистых и рентабельных SMR технологий в масштабах всей страны [2].

серьезным образом затрудняет получение тех потенциальных преимуществ, которые способна обеспечить атомная энергетика в будущем, являясь неотъемлемой частью программы по смягчению последствий изменения климата, а также препятствует развитию ядерных технологий и торговли США. Совет был учрежден Конгрессом США с целью оценки технической и научной обоснованности деятельности Министерства энергетики США в области обращения с ОЯТ и высокоактивными отходами (ВАО), а также их захоронения [3].

В опубликованном отчете содержится шесть рекомендаций, касающихся реализации всеобъемлющего комплексного организационного подхода; обеспечения необходимой инфраструктуры и кадровых ресурсов; концепции Министерства энергетики США по проведению исследований; итеративного адаптивного программного метода организации деятельности по обращению с РАО; взаимодействия с международным сообществом и укрепления общественного доверия.

К настоящему времени в результате эксплуатации энергетических реакторов, осуществления деятельности в области научных исследований и разработок, ведения оборонных программ в США накоплены гигантские объемы ОЯТ — крупнейшие в мире. Причем объемы накопленного ОЯТ от работы энергетических установок продолжают расти. Кроме того, в ведении государства находятся значительные объемы ВАО, образовавшихся преимущественно в результате реализации оборонных программ: одна часть этого объема представлена жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), хранящимися в подземных резервуарах, а другая была переработана и остеклована.

Результаты исследований свидетельствуют, что ОЯТ и ВАО могут в течение длительного периода времени безопасно храниться на поверхности при соблюдении соответствующих рекомендаций и реализации определенных мер, таких как переработка и остекловывание жидких ВАО, находящихся в подземных резервуарах. Вместе с тем своевременная и успешная реализация программы по обеспечению долгосрочного решения проблемы захоронения ОЯТ и ВАО в ПГЗРО по-прежнему представляет собой ключевую задачу, поскольку его отсутствие влечет за собой значительные издержки и является одним из основных препятствий на пути дальнейшего развития ядерной энергетики в США.

Рекомендации Совета включают шесть основных пунктов (рис. 2) [3]:

1. Обеспечить информационное взаимодействие с общественностью и другими заинтересованными сторонами, а также их участие в процессе принятия решений еще на ранних этапах планирования и анализа всех аспектов программы обращения с РАО.

2. Обеспечить прозрачность процесса принятия решений и поддержку, гарантирующую значимость участия заинтересованных сторон в данном процессе.

3. Принять во внимание уроки, извлеченные другими странами, касающиеся необходимости учета мнения общественности, ее информирования с целью улучшения взаимопонимания, формирования более точного представления о ее взглядах и недопущения неоправданных задержек в реализации программы.

4. Еще на раннем этапе создания ПГЗРО Министерство энергетики США должно четко и однозначно охарактеризовать сам объект, представив описание концепции обращения с РАО,



Рис. 2. Шесть рекомендаций Технического наблюдательного совета по радиоактивным отходам [3]

многочисленных барьеров безопасности и других его характеристик, способствующих обеспечению безопасности, даже несмотря на то, что данное требование отсутствует в перечне предъявляемых к процессу лицензирования любой новой площадки, выбранной для сооружения ПГЗРО. DOE также должно четко сформулировать свою позицию относительно обязательности пересмотра концепции безопасности с целью ее обновления по мере получения новой информации.

5. До начала процедуры выбора площадки разработать критерии для оценки ее пригодности, сведя к минимуму любую двусмысленность и неоднозначность их интерпретации, тем самым помогая обеспечить объективность всего процесса и повысить доверие общественности к его результатам. Если на каком-либо этапе выбора площадки потребуются изменить данные критерии, следует обеспечить прозрачность процесса принятия соответствующих решений при участии всех заинтересованных сторон.

6. В случае создания в США одной или нескольких подземных исследовательских лабораторий они должны выполнять не только свою прямую функцию, заключающуюся в проведении исследований, но и вносить соответствующий вклад в процесс взаимодействия с населением и его информирования, укрепляя общественное доверие и уверенность в корректности научных и технических основ концепции безопасности, а также в технологической возможности обеспечения безопасного обращения с отходами под землей.

Швеция

В начале мая 2021 года руководство двух шведских АЭС (Рингхальс и Форсмарк) опубликовало так называемое срочное послание о состоянии рынка (англ. Urgent Market Message, UMM), адресованное энергетической бирже Норд Пул. В сообщении говорилось о том, что пять блоков этих АЭС, вероятно, не смогут вернуться к эксплуатации после плановых остановов в связи с нехваткой свободного пространства для хранения ОЯТ. Речь идет о блоках 3 и 4 АЭС Рингхальс (2025 год) и трех блоках АЭС Форсмарк (2024, 2025 и 2028 годы) [4].

В послании отмечается, что опасность возникновения подобной ситуации на рынке косвенно обусловлена промедлением со стороны правительства Швеции в рассмотрении заявки на строительство ПГЗРО, также включающей предложение о расширении пункта промежуточного хранения (ПХ) ОЯТ SLAB. Гендиректор компании Ringhals AB и Forsmark Kraftgrupp Бьорн

Линде отмечает, что «успешное функционирование шведской модели обращения с ОЯТ в первую очередь зависит от оперативности отправки ОЯТ на промежуточное хранение, так как по соображениям безопасности в небольших по своей вместимости приреакторных бассейнах выдержки должен единовременно находиться минимальный объем топлива с учетом необходимости резервации места, которое могло бы потребоваться в случае выгрузки всего объема топлива активной зоны из реакторов».

Заявка на строительство ПГЗРО и расширение пункта промежуточного хранения ОЯТ SLAB вблизи АЭС Оскарсхамн была подана на рассмотрение шведского правительства еще в 2011 году. Проектная вместимость ПХ SLAB составляет 8000 тонн ОЯТ. К настоящему времени он заполнен более чем на 90%. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют, что к 2023 году свободный объем хранилища будет полностью исчерпан. Согласно положениям заявки SKB, вместимость ПХ планируется увеличить до 11000 тонн. Жители обоих муниципалитетов — Оскарсхамн, где расположен сам ПХ, и Эстаммар, где планируется строительство ПГЗРО, — одобрили данную заявку. Однако правительство страны до сих пор медлит с принятием окончательного решения. Как только это произойдет, Суд Швеции по вопросам охраны окружающей среды и ядерный регулятор SSM продолжат рассмотрение материалов заявки, на что должно уйти еще порядка двух лет. В связи с этим в своем послании руководство АЭС настаивает на необходимости утверждения заявки правительством Швеции в срок не позднее 31 августа 2021 года [4].

Финляндия

В начале мая 2021 года на площадке будущего ПГЗРО ОЯТ в Олкилуото начались работы по бурению первого тоннеля для захоронения ОЯТ во вмещающих породах на глубине около 450 м. Данная система состоит из герметичных упаковок из меди и чугуна, окружающего их буфера из бентонита, тоннельной засыпки из разбухающего глиняного материала, тоннельных заглушек и вмещающей породы [5].

В течение следующих полутора лет будут пробурены пять тоннелей (рис. 3). Всего, согласно плану, в течение 100 лет эксплуатации данного объекта предполагается пробурить около 100 таких тоннелей общей протяженностью около 35 км. Максимальная протяженность каждого тоннеля составит 350 м при высоте свода около 4,5 м и ширине около 3,5 м.



Рис. 3. Проходка тоннеля захоронения в финском ПГЗРО Онкало [5]

Работы по сооружению первых пяти тоннелей будут финансироваться из средств фонда компании Posiva, общая сумма составит 500 млн евро (607 млн долларов США) — именно в таком размере оцениваются общие затраты на реализацию проекта, включая строительство, технологическое обеспечение, а также начальный этап проведения непосредственно самих работ по захоронению ОЯТ в первых тоннелях. Согласно проекту, в каждом из них планируется разместить около 30 контейнеров с ОЯТ, их точное число будет зависеть от количества скважин захоронения в каждом тоннеле, которое в свою очередь определяется объемом пород, отвечающих требованиям по отсутствию трещин. В общей сложности при таких условиях размещения каждый тоннель сможет принять на захоронение около 65 тонн ОЯТ.

Еще один проект, над которым работает компания Posiva, — это завод по инкапсуляции ОЯТ, строительство которого началось в сентябре 2019 года и планируется к завершению к середине 2022 года. Представители компании Posiva отмечают, что работы по инкапсуляции и размещению упаковок с ОЯТ в ПГЗРО стартуют сразу вслед за получением лицензии на эксплуатацию от правительства Финляндии. Так, согласно оценкам, ввод ПГЗРО в эксплуатацию состоится в середине 2020-х гг. [5].

Германия

В мае 2021 года немецкая компания Framatome объявила о завершении ключевого этапа проекта по разработке роботизированной системы, призванной облегчить выполнение работ по выводу из эксплуатации (ВЭ) и обращению с РАО. Задача проекта VIRERO (англ. Virtual Remote Robotics for Radiometric Sorting), запущенного в октябре 2020 года, состоит в создании адаптивной проблемно-ориентированной системы, обеспечивающей дистанционное управление процессом

обращения с РАО, что требует совершенствования и комбинирования различных методов радиологической и пространственной характеристики отходов. В рамках проекта осуществляется разработка методов выполнения демонтажа и сортировки ВАО, образующихся в ходе эксплуатации ядерных установок; упаковок с РАО, прошедших стадию кондиционирования; радиологической сортировки РАО, необходимой для последующего обращения с отходами и перед их отправкой на хранение или захоронение. Использование алгоритма сегментации позволяет проводить анализ, сортировку РАО и демонтажные работы в автоматическом режиме.

В рамках проекта VIRERO используется технология цифровых двойников, позволяющая оператору управлять процессом в среде дополненной реальности с помощью специальных очков. Такой подход позволяет защитить персонал от воздействия вредных факторов и значительным образом повысить качество работ по обращению с РАО, обеспечивая высокий уровень безопасности и эффективности при ВЭ, а также оптимизацию с точки зрения объема получаемых в итоге РАО. Такая универсальная система в первую очередь найдет свое применение при проведении соответствующих работ на площадках исследовательских и энергетических реакторов, но в перспективе также может быть адаптирована для использования в других областях, например в ядерной медицине.

В проекте VIRERO задействован Институт промышленной автоматизации и производственных систем (FAPS) при Университете Эрлангена и Аахенский институт подготовки специалистов в области ядерной промышленности (AiNT). Сотрудники Университета Эрлангена занимаются непосредственно разработкой и испытанием самой роботизированной системы, а AiNT отвечает за создание измерительного оборудования, необходимого для проведения сортировки отходов. Финансирование проекта осуществляется Федеральным министерством образования и исследований Германии в рамках исследовательской программы в области ВЭ ядерных объектов (FORKA). Ожидается, что реализация проекта VIRERO завершится к концу 2023 года [6].

Швеция

В конце мая 2021 года компания Cyclife Sweden AB² подписала долгосрочный контракт с немецким ядерным оператором PreussenElektra на транспортировку и выполнение работ по

² Дочерняя компания EDF.

демонтажу и фрагментации: всего 16 парогенераторов с четырех немецких АЭС (Гронде, Графенрайнфельд, Унтервезер и Брокдорф) будут доставлены на промышленную площадку Cyclife в Нючепинге (Швеция) для дальнейшего обращения с ними. Так, согласно положениям контракта, компания Cyclife вместе со своим партнером Framatome GmbH займутся демонтажем крупных элементов конструкции парогенераторов и их отправкой в Швецию. Тем временем созданная в 2019 году дочерняя компания Cyclife (Cyclife Engineering) уже приступила к проведению детальных проектных исследований на АЭС Унтервезер [7].

После завершения данных исследований парогенераторы высотой около 20 метров и весом около 400 тонн каждый будут извлечены из контролируемой зоны с целью их дальнейшей транспортировки на барже, а затем будут осуществлены необходимые демонтажные работы и подготовка полученных РАО к захоронению. Аналогичный алгоритм был реализован на АЭС Штаде в 2007 году. Считается, что такой подход позволяет повысить скорость проведения работ и уровень безопасности по сравнению с вариантом проведения демонтажа на месте.

Отправка первой партии парогенераторов в Швецию запланирована на второй квартал 2023 года [7].

США

В конце мая 2021 года Министерство энергетики США (DOE) объявило о выделении до 40 миллионов долларов США на финансирование новой программы Агентства перспективных исследовательских проектов в энергетике³ (ARPA-E) по снижению объема отходов, образующихся на современных АЭС. В настоящее время ведется разработка проектов усовершенствованных моделей реакторов нового поколения, призванных повысить уровень безопасности, снизить стоимость и повысить эффективность

³ Агентство ARPA-E было создано в 2009 году с целью продвижения перспективных и высокоэффективных энергетических технологий, уровень развития которых пока еще недостаточен для привлечения частных инвестиций. Оно выделяет средства для оценки перспективности инновационных идей, выдвигаемых учеными, предпринимателями, национальными лабораториями, небольшими компаниями и предприятиями, уделяя особое внимание технологиям, находящимся еще на самых ранних этапах разработки и способных коренным образом изменить представление о производстве, использовании и хранении энергии. В среднем команды, участвующие в подобных проектах, получают финансирование в размере около 2–3 миллионов долларов США в течение нескольких лет. С 2009 года ARPA-E выделило около 2,6 миллиардов долларов США на финансирование НИОКР в рамках более чем 1000 проектов в области развития энергетических технологий [8].

процесса производства электроэнергии. В свою очередь, реализация проектов строительства подобных реакторов приведет к снижению объемов выбросов парниковых газов и будет способствовать обеспечению энергетической безопасности США и укреплению позиций страны в атомной отрасли [8].

ARPA-E также реализует проект по оптимизации систем захоронения РАО и усовершенствованных реакторов (англ. Optimising Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems, ONWARDS), направленный на разработку и обоснование революционных технологий, которые бы позволили добиться десятикратного снижения объема отходов, образующихся на реакторных установках нового поколения, или площади, необходимой для их захоронения. Кроме того, в рамках проекта разрабатываются высокоэффективные усовершенствованные формы отходов, обеспечивающие поддержание образцового уровня соблюдения гарантий безопасности при суммарных затратах на реализацию завершающих стадий ЯТЦ, не превышающих 1 доллар США за 1 мегаватт-час произведенной электроэнергии.

К разработкам, внедрение которых способно помочь в решении проблем, связанных с захоронением РАО, образующихся на АЭС нового поколения, относятся [8]:

- совершенствование методов повторного использования топлива, способных привести к значительному сокращению объемов образующихся отходов, естественным образом повысить уверенность в невозможности распространения ядерного оружия, повысить ресурсоемкость и коммерческую привлекательность проектов создания усовершенствованных реакторов;
- совершенствование сенсорных технологий и технологий совместной обработки данных, позволяющих осуществлять более точный и оперативный учет ядерных материалов;
- разработка высокоэффективных форм отходов с учетом всех классов усовершенствованных реакторов. При этом основное внимание следует уделять именно тем формам отходов, которые позволили бы удовлетворить потребности в переработке РАО сразу для нескольких классов реакторов и сред захоронения и обеспечить безопасность и стабильность в требуемых временных интервалах.

Китай

Управление по атомной энергетике Китая (CAEA) объявило о начале строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ)

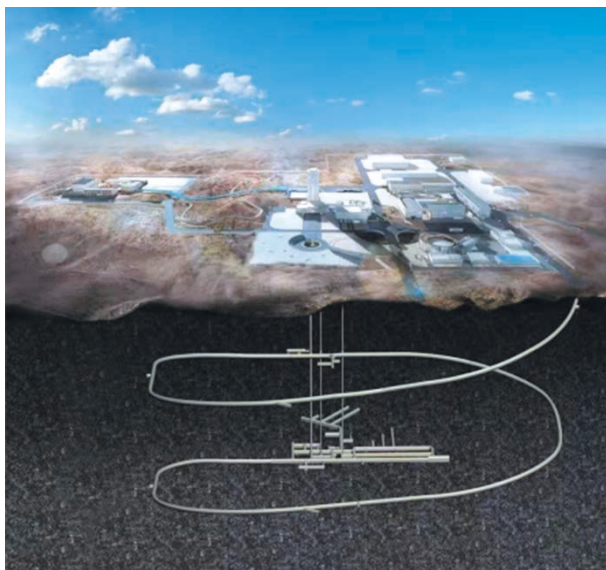


Рис. 4. Проект китайской ПИЛ Бэйшань

Бэйшань недалеко от города Цзюцюань в провинции Ганьсу (пустыня Гоби). ПИЛ планируется разместить в гранитных формациях на глубине до 560 метров (рис. 4). Церемония закладки первого камня состоялась 17 июня 2021 года. По словам представителей САЕА, данный объект задумывался как крупнейшая в мире ПИЛ, способная обеспечить максимальные функциональные возможности для проведения НИОКР и привлечение наиболее широкого круга экспертов [9].

Общая площадь объекта на поверхности составит 247 га, из которых на 2,39 га будут размещены различные здания и сооружения. Площадь подземной части объекта составит около 514 200 м², включая 13,4 км тоннелей.

Согласно оценкам, на сооружение ПИЛ уйдет 7 лет, а общие затраты на ее строительство достигнут 420 млн долларов США. Проектный срок эксплуатации ПИЛ составляет 50 лет, а в случае успешной реализации намеченных исследований и обоснования пригодности площадки строительство ПГЗРО для ВАО в ее окрестностях может начаться в 2050 году. Китайские эксперты отмечают, что данный объект является ключевым с точки зрения обоснования безопасности проекта геологического захоронения ВАО и

критически важным в целом для развития атомной энергетики Китая.

Литература

1. Canadian partnership to explore nuclear fuel recycling, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-partnership-to-explore-nuclear-fuel-recyc> (дата обращения: 31.03.2021).
2. Canadian Nuclear Research Initiative (CNRI), URL: <https://www.cnl.ca/clean-energy/canadian-nuclear-research-initiative-cnri/> (дата обращения: 06.05.2020).
3. DOE receives six pointers on waste management, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/DOE-receives-six-recommendations-on-waste-manageme> (дата обращения: 05.05.2021).
4. Swedish utilities urge decision on final disposal of waste, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Swedish-utilities-urge-decision-on-final-disposal> (дата обращения: 06.05.2021).
5. Work starts on first disposal tunnel at Finnish repository, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/First-disposal-tunnel-under-construction-at-Finnis> (дата обращения: 07.05.2021).
6. Framatome advances development of waste-handling robots, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Framatome-advances-development-of-waste-handling-r> (дата обращения: 19.05.2021).
7. Cyclife to dispose of 16 German steam generators, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Cyclife-to-dispose-of-16-German-steam-generators> (дата обращения: 19.05.2021).
8. US fund for reducing waste from advanced reactors, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/US-funding-for-reducing-waste-from-advanced-reacto> (дата обращения: 20.05.2021).
9. China starts building underground lab, World Nuclear News, URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-building-underground-lab> (дата обращения: 21.06.2021).

Обзор подготовила Н. С. Цебаковская