DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-59-74 УДК 621.039.73

ОБРАЩЕНИЕ С ВАО РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ НА ПЛОЩАДКАХ САВАННА-РИВЕР И ХЭНФОРД (США)

И. Л. Абалкина, М. В. Ведерникова

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 19 июля 2025 г.

В статье дан краткий обзор стратегий обращения с высокоактивными отходами (ВАО) резервуарных парков на площадках Саванна-Ривер и Хэнфорд. Приведены примеры удаления отходов из отдельных емкостей. Представлены оценки стоимости, а также рассматриваются проблемы, влияющие на выработку стратегий и ход работ по обращению с ВАО на двух площадках.

Ключевые слова: *резервуарные парки, высокоактивные отходы, обращение с жидкими радиоактивными отходами, цементирование, остекловывание, радиоактивные отходы.*

В настоящее время Министерство энергетики США (U.S. Department of Energy, DOE) ведет работы по выводу ядерных объектов из эксплуатации, обращению с радиоактивными отходами (РАО) и реабилитации на 15 площадках наследия. Совокупные затраты DOE на эту программу, по расчетам Главного контрольно-финансового управления США (United States Government Accountability Office, GAO[1]), могут составить 525 млрд долл., из которых 392 млрд, или 75 %, еще предстоит потратить [1]. Хэнфорд и Саванна-Ривер — это самые крупные площадки с точки зрения объемов работ, их длительности и стоимости. Общие затраты по ним оцениваются в 312 и 94 млрд долл. (из них будущие обязательства составляют 265 и 58 млрд) со сроками завершения работ в 2078—2082 гг. и 2065 г. соответственно. Обращение с ВАО, находящимися на хранении в подземных резервуарах, — это самый дорогостоящий компонент программы работ для обеих площадок. Извлечение отходов, их обработка и иммобилизация для последующего захоронения являются технологически сложными операциями, выполнение которых вместе с сооружением необходимых объектов инфраструктуры оценивается в общую сумму 180 млрд долл. для площадки Хэнфорд и 43 млрд долл. для площадки Саванна-Ривер (данные GAO на декабрь 2021 г.).

Саванна-Ривер

ВАО размещены в резервуарных парках в зонах F и H в подземных емкостях-хранилищах нескольких типов. Всего на площадке их 51. Закрытие резервуарных парков — масштабная программа, стартовавшая в 1996 г. и предполагающая извлечение отходов, их направление на обработку, заливку высвобожденной емкости цементным раствором (grouting) и ее засыпку несколькими слоями защитных материалов. Описание технических характеристик

[1] Главное контрольно-финансовое управление США, или Счетная палата, — это независимый орган Конгресса США, который занимается проведением аудиторских проверок и оценок деятельности федеральных органов исполнительной власти.

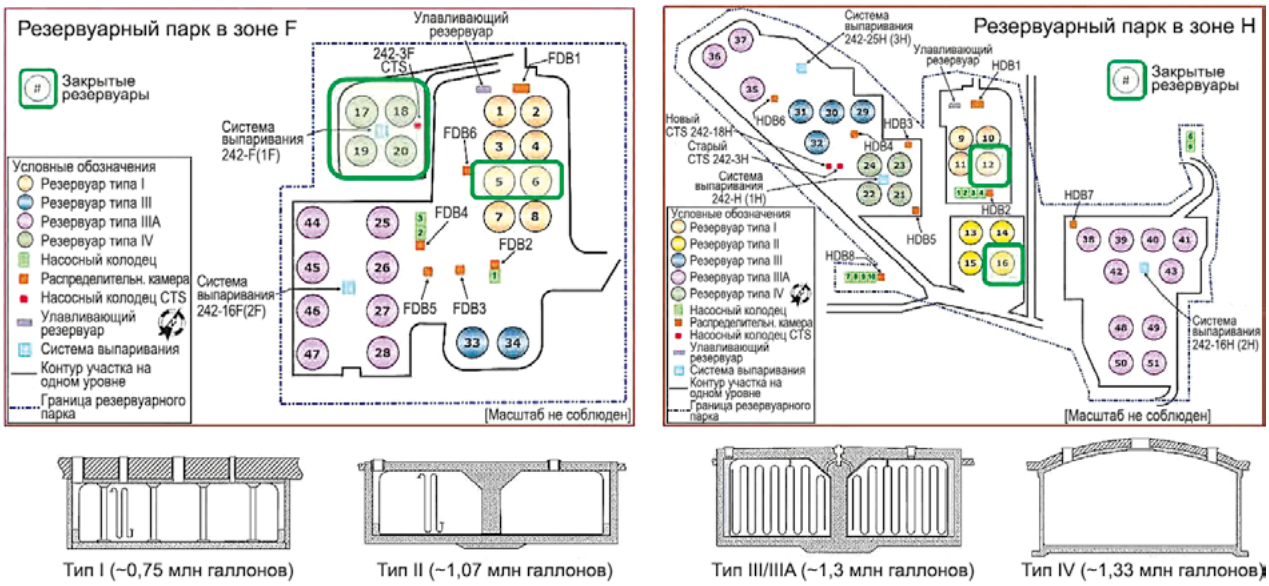

Рис. 1. Схема расположения резервуаров различного типа в зонах F и H [4]

Рис. 2. Установка TCCR на площадке Саванна-Ривер (слева — крупным планом [5], справа — вид сверху на установку и резервуарный парк H) [6]

подземных резервуаров и установок по переработке жидких радиоактивных отходов (ЖРО) см. в [2].

Из 51 резервуара закрыто и зацементировано 8 емкостей (выделены зеленой рамкой), схема их расположения представлена на рис. 1. В 43 оставшихся, согласно инвентарным спискам на 31.12.2021, находилось $1{,}35 \cdot 10^5$ м^3 ВАО активностью $9{,}1 \cdot 10^{18}$ Бк [3]. 92 % объема и 54 % активности приходится на солевые отходы (salt waste), которые состоят из солевого раствора (salt supernate) и солевого осадка (saltcake), а 8 % объема и 46 % активности — на пульпу (sludge).

Схема обращения с извлекаемыми отходами предусматривает их перевод в твердую форму с разделением потоков, направляемых на остекловывание и цементирование. Пульпа остекловывается на установке Defense Waste Processing Facility (DWPF), эксплуатируемой с 1996 г. Остеклованные ВАО размещаются на временное хранение на площадке в ожидании геологического захоронения. Солевой раствор обрабатывается на объекте Salt Waste Processing Facility (SWPF), введенном в строй в 2021 г. (ранее использовались две установки — для экстракции долгоживущих радионуклидов и для выделения цезия). Удаляемые из солевого раствора фракции остекловываются на DWPF, а оставшийся раствор, представляющий низкоактивные радиоактивные отходы (НАО)[1], цементируется на установке Saltstone Production Facility с последующим захоронением на площадке.

В январе 2019 г. был запущен демонстрационный проект по удалению цезия из ЖРО, который нацелен на ускорение извлечения отходов. Установка Tank Closure Cesium Removal (TCCR) расположена рядом с резервуарами 10 и 11 в зоне H (рис. 2) и состоит из трех модулей:

[1] Под НАО DOE понимает ту часть отходов резервуаров, которая остается после их обработки и извлечения радиоактивного материала (в той мере, насколько это технически и экономически целесообразно).

главного технологического корпуса, в котором находятся системы и компоненты для обработки отходов, отдельного модуля для вентиляции/контроля загрязнения и управляющего модуля для размещения систем эксплуатации и видеонаблюдения.

В течение демонстрационного периода обработано несколько партий отходов. Первым шагом является растворение затвердевшего осадка в резервуаре. После этого пробы растворов отбираются для анализа химических компонентов на соответствие критериям приемлемости для отправки на TCCR. Солевой раствор проходит через модули, включая предварительный фильтр и несколько ионообменных колонн, внутри которых поток отходов обрабатывается смолой для удаления цезия. Предполагалось, что установка должна обработать от 2 270 до 2 840 м^3 растворенных солевых отходов за 9 месяцев эксплуатации [5]. По окончании демонстрационного периода DOE и оператор площадки должны оценить эффективность системы и осуществимость дальнейшей эксплуатации TCCR и будущих установок.

В ходе реализации проекта были обработаны две партии отходов из резервуара 10 общим объемом 757 м^3 в 2019 г. и одна партия — 337 м^3 в 2020 г. [6], т. е. примерно половина от запланированного количества. Во время демонстрации резервуар 10 выполнял двойную функцию: как для растворения солей, так и для подачи солевого раствора на TCCR. На 2021 г. была запланирована обработка ЖРО из резервуара 9, в котором соли растворялись путем подачи воды с последующей рециркуляцией, а затем состав переносился серией партий в резервуар 10 для подачи на TCCR. Всего было подготовлено 2 партии, но работы на установке были приостановлены до начала обработки второй из них [7].

В феврале 2017 г. оператор площадки разработал Консолидированный общий план закрытия систем резервуаров с отходами в зонах F и H [8]. Его назначение — определить общий протокол прекращения эксплуатации (remove from service) емкостей и вспомогательной инфраструктуры для обеспечения защиты человека и окружающей среды. Под системой резервуаров с отходами (waste tank system) понимается отдельный резервуар или их группа с соответствующей вспомогательной инфраструктурой.

В Консолидированном плане указывается, что, несмотря на намерение удалить отходы и дезактивировать загрязненные сооружения и оборудование до уровня, возможного с технической точки зрения, есть также признание того, что DOE не может на практике полностью ликвидировать или очистить их все. В связи с этим Департамент по охране здоровья и контролю окружающей среды штата Южная Каролина (the South Carolina Department of Health and Environmental Control, SCDHEC), Агентство по охране окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) и DOE выражают общее согласие с тем, что работы по удалению отходов могут быть прекращены, системы резервуаров с незначительным объемом содержащихся в них РАО и сопутствующим остаточным загрязнением стабилизированы и выведены из эксплуатации в соответствии с требованиями применимого природоохранного законодательства. Для этого DOE подготовит детальную документацию по закрытию каждого резервуара, в которой будет представлена подробная информация об остаточном загрязнении. После согласования природоохранными органами (SCDHEC, затем EPA) все три ведомства достигнут соглашения, что работы по удалению могут быть прекращены, DOE осуществит стабилизацию в качестве последнего этапа и представит заключительный отчет в SCDHEC.

Консолидированный план упоминает результаты оценки воздействия на окружающую среду альтернативных вариантов очистки и стабилизации резервуаров, которую DOE обнародовало в мае 2002 г. Всего их было рассмотрено пять: 1) удаление отходов, очистка, заполнение резервуара цементным раствором; 2) удаление отходов, очистка, заполнение резервуара песком; 3) удаление отходов, очистка, заполнение резервуара каменной солью; 4) очистка и удаление резервуаров; 5) отсутствие действий. Оценки показали, что первый вариант закрытия является предпочтительным с точки зрения минимизации рисков для человека и окружающей среды, заполнение раствором способствует стабилизации стен и крыши и в перспективе снижает проникновение воды, что, в свою очередь, сдерживает миграцию радионуклидов в окружающую среду.

Каждый резервуар имеет свою историю эксплуатации и различные гидрологические условия, такие как уровень грунтовых вод и удаленность от близлежащих поверхностных речных систем. DOE будет разрабатывать мероприятия по выводу из эксплуатации для каждого их них,

Рис. 3. Процесс закрытия резервуаров [4]

при этом все варианты имеют много общего, в том числе удаление или изоляцию труб и каналов, а также систем подачи воды и химических составов. Системы вентиляции, подачи электроэнергии и воздуха могут оставаться в рабочем состоянии на время заполнения цементным раствором, затем резервуар должен быть полностью изолирован от всех систем. Оборудование, которое вышло из строя или больше не требуется, может быть инкапсулировано в материале заливки.

Для каждого резервуара разрабатывается свой документ, описывающий стратегию заполнения. В нем будет указываться спецификация раствора, который будет использован для основного и кольцевого резервуаров, а также — для охлаждающего змеевика и заливки оборудования, если это необходимо. Этот материал должен быть текучим, перекачиваемым и самовыравнивающимся, чтобы минимизировать расслоение и облегчить процесс. Для обеспечения максимально возможной степени заполнения (т. е. для минимизации пустого пространства) могут потребоваться альтернативные составы заливки, что позволит использовать растворы, обладающие различной текучестью и разных спецификаций. Однако их применение для змеевика или оборудования подразумевает внесение корректив в стратегию заливки, и в этом случае требуется оценка с точки зрения технических параметров и критериев безопасности. Если альтернативные составы окажутся подходящими по этим позициям, данные изменения должны быть представлены в SCDHEC для согласования.

В декабре 2022 г. DOE, EPA и Департамент экологических служб штата Южная Каролина (South Carolina Department of Environmental Services, SCDES) подписали Соглашение о контрольных точках (этапах) для резервуаров с ЖРО [9], которое было включено в Соглашение о федеральном предприятии (Federal Facility Agreement, FFA). FFA — это трехсторонний договор по крупным площадкам ядерного наследия между DOE, EPA и уполномоченным природоохранным органом штата, в котором находится объект. Процесс закрытия резервуаров схематически изображен на рис. 3. В FFA также установлены новые даты прекращения удаления отходов и закрытия 16 резервуаров самой старой конструкции. Предполагается, что все 43 оставшихся резервуара будут закрыты к 2037 году (вместо предыдущей даты — 2032 г., а еще ранее — 2028 г.). Кроме того, с февраля 2022 г. работы на площадке выполняет единственный подрядчик по всем объектам переработки ЖРО — Savannah River Mission Completion LLC, 10-летний контракт оценивается в 21 млрд долл.

Общий план закрытия предусматривает выполнение следующих нормативов:

- нормативов штата для питьевой воды (доза облучения 0,04 мЗв/год для бета- и гамма-излучателей, суммарная альфа-активность 0,555 Бк/л и 0,185 Бк/л для ^{228}Ra + ^{226}Ra, 30 мкг/л урана);
- нормативов штата для питьевой воды для неорганических загрязнителей.

В качестве примера работ по конкретным емкостям с ЖРО приведем резервуар 10 на площадке H, конструкция которого относится к типу 1. Это один из самых сложных видов резервуаров с точки зрения ведения работ (рис. 4). Проблемными являются: ограниченные порты доступа (стояки); наличие опорных колонн крыши; вертикальные и горизонтальные охлаждающие

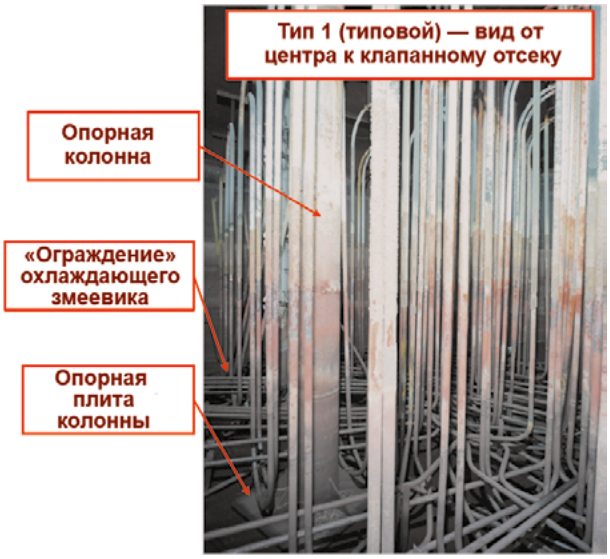

Рис. 4. Резервуар типа 1, вид изнутри [10]

змеевики диаметром 5 см и общей длиной около 7 км; отсутствие проектных решений для удаления отходов и закрытия.

История эксплуатации резервуара 10 представлена на рис. 5. Он сооружался в 1951—1953 гг. и осуществлял прием отходов в 1955—1959 гг. Максимального уровня загрузки в 6,81 м достиг в 1959 г. (при пределе в 6,88 м), что составляло 2 748 м^3 ЖРО (комбинация осадка и надосадочной жидкости). Первая кампания по удалению отходов стартовала в 1967 г. при уровне заполнения 6,62 м (слой пульпы достигал 0,6 м). В 1967—1974 гг. резервуар 10 служил в качестве приемного для концентрата испарительной установки, солевой осадок был на уровне 4,7 м (1893 м^3).

Четвертая кампания по удалению отходов осуществлялась в два приема. На первом этапе резервуар 10 был оснащен погружным насосом для перекачки и тремя линиями рециркуляции, что позволило проводить перемешивание его содержимого через три стояка одновременно. Типичные мероприятия по растворению солей на этой стадии включали: добавку воды и ее последующую рециркуляцию; отбор проб; обработку солевого раствора на блоке 1 TCCR; погружение насоса ниже для следующего этапа. В ноябре 2018 г. в резервуар было залито почти 570 м^3 воды, затем система рециркуляции работала в течение 7 дней. После отбора проб для подготовки раствора для TCCR в резервуар было добавлено 64 м^3 каустической соды, и процесс был продолжен еще в течение 4 дней. В феврале 2019 г. 575 м^3 солевого раствора из резервуара 10 было перемещено в TCCR для обработки. По сравнению с кампанией 3 растворение осадка показало результаты ниже ожидаемых: было определено, что в резервуаре сформировался плохо растворимый слой, содержащий буркеит.

С учетом этого на втором этапе стратегия была изменена. В феврале и марте 2019 г. в резервуар добавили две небольшие порции воды (около 94 м^3), после каждого залива осуществлялась рециркуляция. Были взяты пробы, показавшие незначительный прогресс в растворении, после этого процесс был вновь продолжен — до конца апреля. В июне 2019 г. 220 м^3 раствора было направлено на обработку на TCCR.

После завершения второго этапа в июле 2019 г. началась подготовка к дополнительному растворению солевого осадка под слоем буркеита. Было выполнено гидравлическое прокалывание для контакта с нижним слоем и погружения

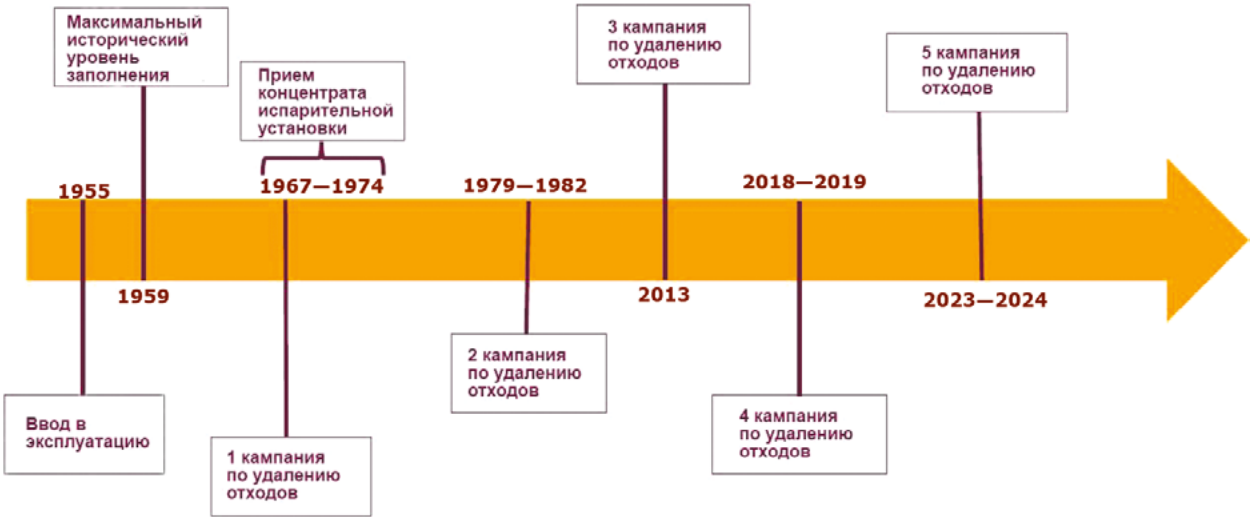

Рис. 5. История эксплуатации резервуара 10 [10]

насоса. В резервуар опять закачали две порции воды (около 94 м^3) с рециркуляцией после каждого залива. Замеры плотности показали столь же медленный процесс растворения, как и на этапе 2. В августе 2019 г. погружной насос вышел из строя. Итоги кампании 4 показали, что уровень осадка был неравномерным в разных местах и уменьшился в среднем всего на 13 см, с 1,83 м до 1,70 м, что эквивалентно примерно 50 м^3 ЖРО. Требовалась более эффективная технология растворения осадка, и дальнейшие действия с резервуаром 10 были поставлены на паузу для проектирования работ с использованием коммерческих погружных смесительных насосов.

После окончания кампании 4 было выполнено еще одно гидравлическое прокалывание для обеспечения замены насоса. Также резервуар 10 был использован для подачи солевого раствора из резервуара 9 на TCCR. Для продолжения работ по растворению осадка в 2022 г. в стояках 1 и 8 были установлены два коммерческих погружных смесительных насоса. Старый насос был заменен в июле 2023 г., а в августе того же года работы по растворению были возобновлены в рамках кампании 5, первый этап которой дал положительные результаты: плотность раствора составила 1,4 г/мл, что указывало на очень хорошее растворение осадка. Примерно 776 м^3 раствора было перемещено в резервуар 11, но затем перемещение было приостановлено из-за обнаружения солевых отложений на западной стене стояка 4.

На втором этапе кампании 5 в сентябре 2023 г. работы продолжились. Было закачано 800 м^3 воды. Насосы в стояках 1 и 8 работали с ориентацией на растворение солей в стояке 4. Плотность раствора составила 1,3 г/мл, что указывало на хороший результат. 1025 м^3 раствора было перемещено в резервуар 11 в октябре 2023 г. Затем работы были опять остановлены из-за солевых отложений у стенки стояка 4. В ходе последующих этапов в рамках кампании 5 в стояке 4 установили третий погружной смесительный насос, который был запущен в декабре 2023 г. Итогом данного процесса стало перемещение примерно 1175 м^3 солевого раствора в резервуар 11 в январе 2024 г.

В 2023 г. было обнаружено 35 мест утечек из резервуара, нижняя находилась на высоте 0,6 м, а верхняя — на высоте 3,6 м от дна емкости. В кольцевом поддоне до начала его очистки оставалось около 18—20 см солевых отходов (около 1,5 м^3). Очистка и визуальная инспекция этого пространства проведены на следующем этапе работ. Всего из резервуара 10 удалено более 99,5 % отходов. На рис. 6 показано его состояние в отдельные годы. По расчетам, применимые регулирующие требования будут выполнены: пиковые значения доз облучения от резервуара 10 составят менее 0,02 мЗв/год в период 1000 и 10 000 лет после закрытия и не совпадут с пиком доз от резервуарного парка в зоне H в целом.

Продолжение удаления отходов за счет их растворения потребовало бы добавки около 750 м^3 воды для функционирования смесительных насосов, что выразилось бы в новых объемах РАО, требующих обработки на мощностях площадки, и соответствующих затратах. Это привело бы к отвлечению ресурсов и персонала от других работ, в частности по находящимся рядом резервуарам 9 и 11. При этом дальнейшее извлечение имело бы минимальный эффект с точки зрения будущих доз. Аналогичные выводы сделаны и для других методов — химической очистки и вакуумной технологии. На этом основании DOE рекомендовало прекратить удаление отходов и перейти к этапу отбора проб и анализа остатков. В соответствии с Соглашением о контрольных точках и другими документами, рекомендация

Рис. 6. Резервуар 10 в 1968 г., ноябре 2010 г. и январе 2024 г. [10]

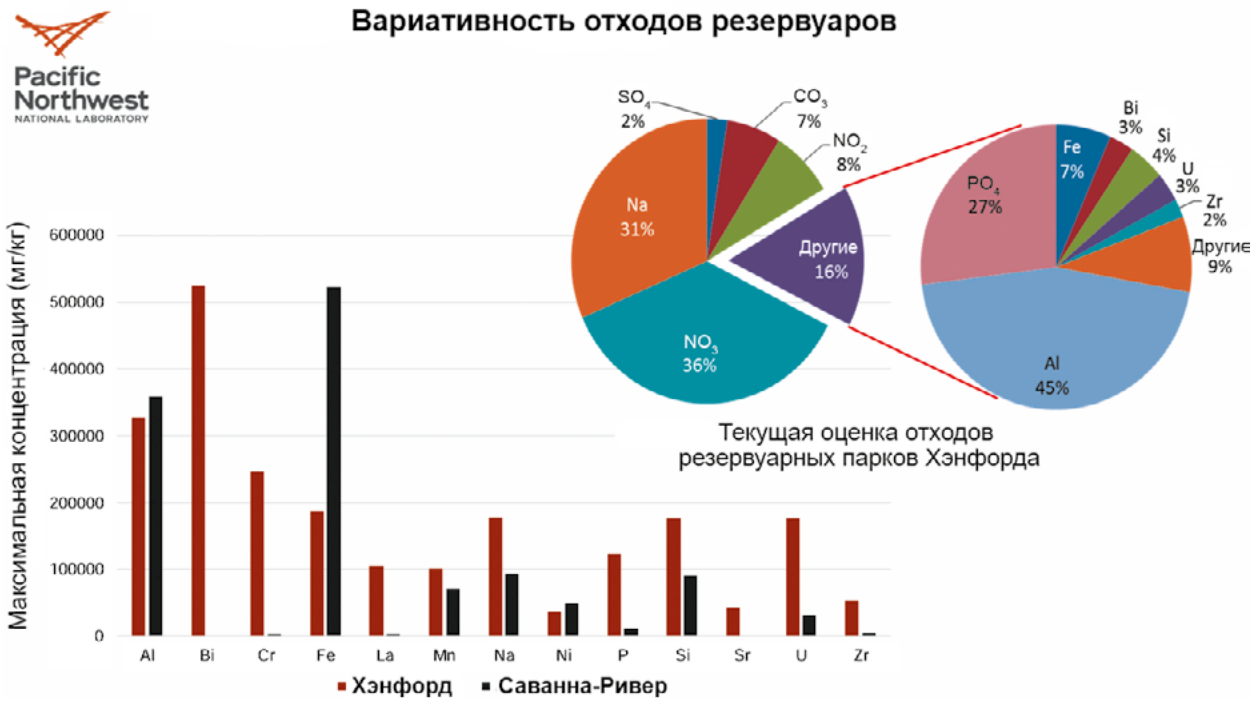

Рис. 7. Сравнение отходов в форме пульпы для площадок Хэнфорд и Саванна-Ривер [13]

должна быть поддержана природоохранными органами (SCDHEC и EPA). В итоге предварительное соглашение о прекращении удаления отходов из резервуара 10 было достигнуто тремя ведомствами в мае 2024 г. — за 7 месяцев до запланированного срока. В этом же году соглашение было получено по резервуарам 4 и 9 в зоне H, на год ранее, чем предполагалось. В июне 2025 г. DOE объявило об удалении отходов из резервуаров 11 и 15, причем также в более короткие сроки — с опережением установленного графика на 7 и 19 месяцев [11]. По данным на 31.12.2024, в емкостях резервуарных парков площадки оставалось $1{,}25 \cdot 10^5$ м^3 ЖРО общей активностью $7{,}3 \cdot 10^{18}$ Бк [4].

Хэнфорд

На самой крупной площадке ядерного комплекса США находятся 18 резервуарных парков с 177 емкостями, в которых, по данным на 2022 г., находится около 212 тыс. м^3 ЖРО. В соответствии с соглашением, регулирующим проведение работ по очистке площадки, из каждого резервуара необходимо удалить не менее 99 % отходов или по крайней мере столько, сколько возможно на основе имеющихся технологий. Окончательная обработка ЖРО, извлеченных из резервуарных парков, должна будет осуществляться на сооружаемом заводе по переработке и иммобилизации отходов (Waste Treatment and Immobilization Plant, WPT). Более подробную информацию о площадке и ее объектах см. в [2].

Из 177 емкостей 149 представляют собой резервуары с однослойной оболочкой, сооруженные в 1943—1965 гг. В декабре 2012 г. DOE выпустило Заявление о воздействии на окружающую среду[1] закрытия резервуаров и обращения с отходами площадки Хэнфорд [12], в котором были проанализированы 17 альтернативных вариантов, 11 из них включали удаление, обработку, хранение и захоронение отходов с последующим закрытием резервуаров с однослойной оболочкой. DOE выбрало технологию, предусматривающую извлечение из них 99 % отходов, их обработку с разделением на НАО и ВАО[2], захоронение остеклованных НАО и сооружение мощностей для временного хранения иммобилизованных ВАО. По состоянию на июль 2024 г. ЖРО были извлечены из 21 резервуара с однослойной оболочкой. 28 емкостей с двухслойной оболочкой были сооружены в 1968—1986 гг., отходы удалены только из одной.

[1] Заявление о воздействии на окружающую среду — документ, требуемый в соответствии с Законом о национальной политике в области охраны окружающей среды в случаях, когда действия федеральных органов могут существенно повлиять на качество среды обитания.

[2] DOE классифицирует все ЖРО Хэнфорда как ВАО, но применительно к обращению с ними использует обозначение НАО для части отходов с наименьшей радиоактивностью. Они могут составлять около 95 % общего объема ЖРО.

ЖРО содержатся в форме пульпы, солевого осадка и солевого раствора (супернатанта). Сравнение отходов в форме пульпы для площадок Хэнфорд и Саванна-Ривер показаны на рис. 7.

Обращение с супернатантом предполагает несколько этапов. Сначала происходит выпаривание отходов для снижения их объема и извлечения органических компонент на установке 242-A, которая введена в эксплуатацию в 1977 г. После этого кубовый остаток помещается на хранение в близлежащий резервуар с двойной оболочкой, а образовавшийся конденсат поступает на установку для очистки сточных вод (Effluent Treatment Facility) для удаления химического и радиоактивного загрязнения перед сбросом в окружающую среду. Установка выпаривания была остановлена в 2019 г. для модернизации и прокладки новой линии подачи ЖРО из резервуаров (рис. 8). За время эксплуатации на ней переработано 306 тыс. м^3 ЖРО. Ее перезапуск неоднократно откладывался, эксплуатация возобновилась в марте 2025 г. [14]. Установка 242-A является ключевой для системы обращения с ЖРО, поскольку снижение объемов отходов, подлежащих хранению, дает возможность эффективнее использовать ограниченные мощности их хранения в резервуарах с двухслойной оболочкой и, соответственно, осуществлять извлечение отходов из старых емкостей с однослойной оболочкой.

Рис. 8. Установка выпаривания 242-A (апрель 2024 г.) [14]

С 2016 г. DOE реализует стратегию Direct-Feed Low-Activity Waste (DFLAW), в соответствии с которой из ЖРО удаляются более радиоактивные компоненты (цезий и твердые вещества), а оставшаяся часть отходов будет без дополнительной обработки (напрямую) направляться на установку остекловывания НАО (Low-Activity Waste Facility) сооружаемого завода WPT с последующим захоронением на площадке. Его работа начнется именно с НАО, предположительно — с 2025 г. Весной этого года начались испытания установки остекловывания в режиме холодного пуска, которые продлятся несколько месяцев. При выходе на проектную мощность установка будет обрабатывать 20 м^3 ЖРО в день, смешивая их со стеклообразующими материалами с последующим нагревом до 1150 °C и заливкой в контейнеры из нержавеющей стали. По данным DOE, ежедневно будет производиться около 3,5 контейнеров с РАО общим весом 21 т [15].

Первым этапом реализации стратегии DFLAW стало направление ЖРО на ионообменную установку для удаления цезия-137 и растворимого стронция-90 — Tank-Side Cesium Remover (TSCR). Она построена рядом с резервуаром с двухслойной оболочкой объемом 4 165 м^3 в резервуарном парке AP, в которую будут поступать ЖРО после извлечения радионуклидов. TSCR была запущена в качестве демонстрационного проекта в январе 2022 г. Ранее, в 2020 г., резервуар AP-106 был освобожден для приема ЖРО из TSCR, и в июне 2025 г. в нем находилось 3 140 м^3 обработанных отходов. В 2021 г. завершено строительство основной линии трубопровода длиной более 1 км, который соединил этот резервуар с WPT для подачи НАО на остекловывание (самый последний элемент соединения закончен в июне 2025 г.). Ведется проектирование и в будущем планируется запуск более мощной установки для обработки ЖРО — Advanced Modular Pretreatment System (AMPS), которая будет поставлять уже более значительные объемы отходов на WPT.

С 2019 г. усилия по извлечению ЖРО были сконцентрированы на емкостях резервуарного парка AX. Данные об объемах и формах отходов представлены на рис. 9. В качестве примера можно привести резервуар AX-104: удаление ЖРО планировалось начать летом 2020 г. [16], но работы стартовали на полгода позже, в январе 2021 г. В емкости находилось 18,9 м^3 пульпы активностью $6{,}9 \cdot 10^{16}$ Бк, и еще порядка 8 м^3 отходов скопилось на стенах сооружения. Технология предусматривала предварительный демонтаж сильнозагрязненного оборудования, такого как насосы и термопары, и сооружение необходимой инфраструктуры — систем вентиляции и водоснабжения. Для удаления отходов в резервуар подавалась вода под давлением с помощью роботизированного промывочного устройства,

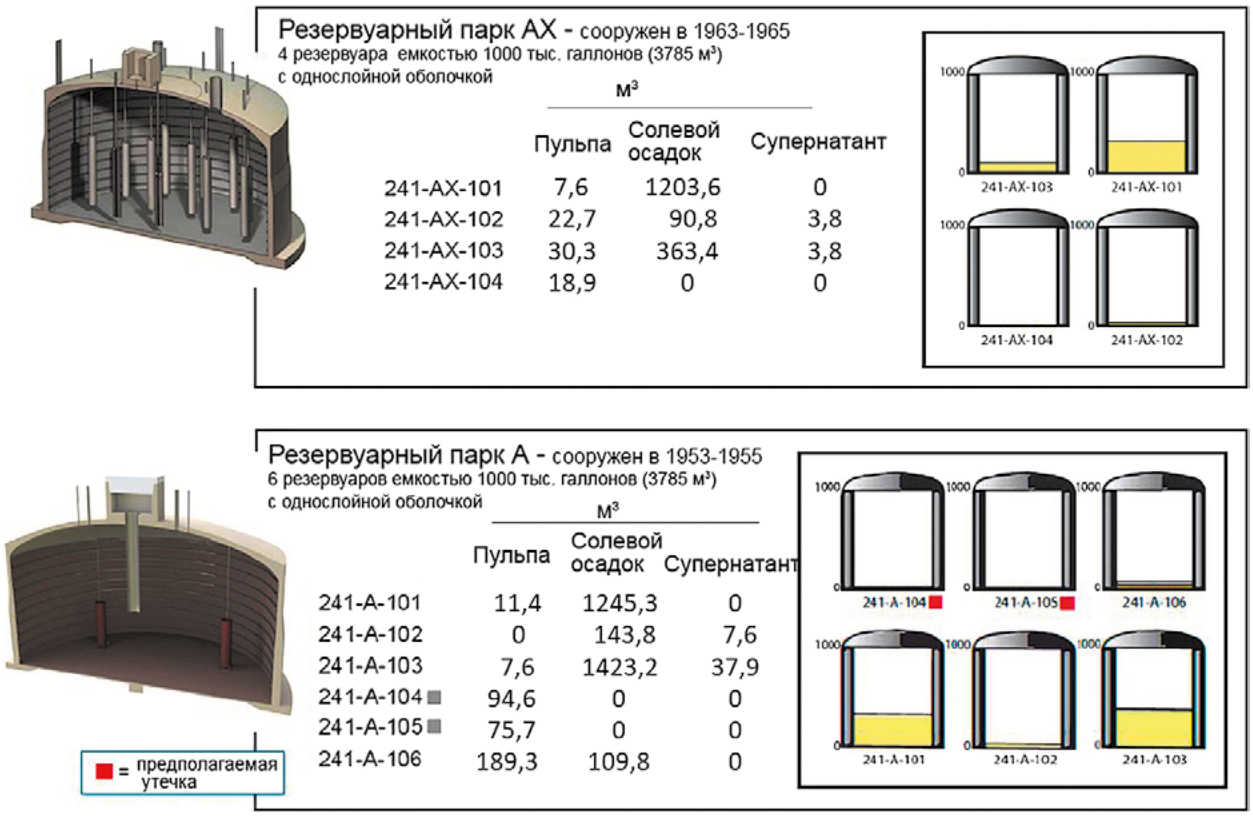

Рис. 9. Данные об объемах и формах отходов в резервуарных парках AX и A на начало 2019 г. (галлоны переведены в м³ с округлением) [17]

Рис. 10. Работы по удалению отходов из резервуара AX-104 (слева) [18] и его вид после завершения работ (справа) [19]

затем отходы перекачивались на хранение в резервуар с двойной оболочкой. Работы были окончены в июне 2023 г. (рис. 10).

Задержки с проведением работ характерны и для других объектов резервуарного парка AX. Строительство вспомогательной инфраструктуры и извлечение ЖРО из резервуара AX-101 планировалось выполнить в 2021—2022 гг., фактически же они начались в январе 2023 г. и завершились летом следующего года (рис. 11). Таким образом, ЖРО были удалены из всех емкостей резервуарного парка AX к середине 2024 г. Спустя месяц после окончания этих работ было начато извлечение ЖРО из емкости A-101 резервуарного парка A.

В январе 2025 г. вышел документ по окончательному одобрению очистки резервуарных парков на площадке Хэнфорд, подготовленный в рамках Соглашения о федеральном предприятии между DOE, EPA и Министерством экологии штата Вашингтон по результатам переговоров, начавшихся в 2020 г. [21]. В нем зафиксированы следующие основные позиции и новые сроки выполнения:

- сохранение существующих графиков для начала работ по иммобилизации НАО и ВАО методом остекловывания;

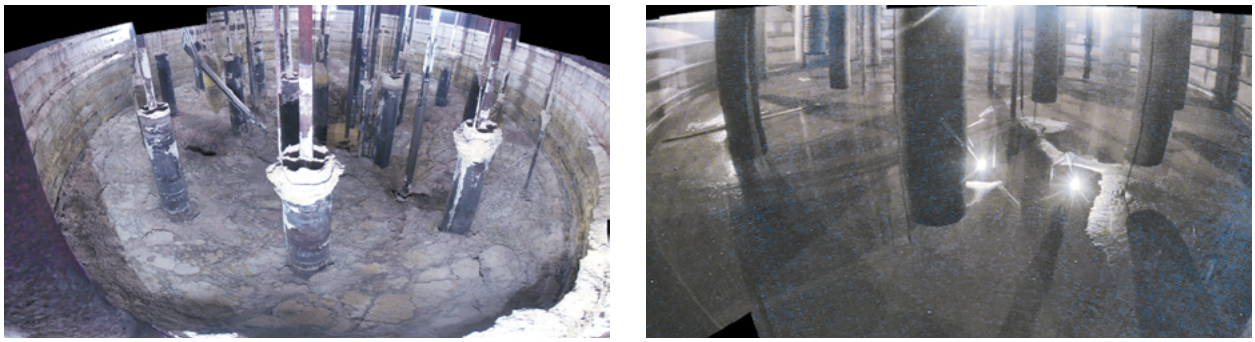

Рис. 11. Резервуар AX-101 до начала работ по удалению отходов (слева) и по их окончании (справа) [20]

- использование подхода direct-feed (прямой подачи) отходов для иммобилизации ВАО по аналогии с DFLAW для НАО;
- извлечение отходов из 22 резервуаров западной части зоны 200 площадки Хэнфорд к концу 2040 г., включая цементирование НАО для захоронения за пределами штата Вашингтон;
- проектирование и сооружение дополнительных резервуаров объемом 1 млн галлонов (3785 м^3) для многоцелевого хранения отходов из резервуаров;
- оценка и разработка новых технологий извлечения отходов из резервуаров.

По срокам запуска WPT установлены две даты: «горячий старт» — не позднее 31.12.2033 (достижение одновременной эксплуатации установки по предварительной обработке отходов и установок остекловывания НАО и ВАО) и начальная эксплуатация — до 31.12.2036 (выход на среднюю дневную мощность не менее 4,2 т остеклованных ВАО и 21 т остеклованных НАО не позднее чем за 3 месяца до указанного срока). Предполагается, что установка остекловывания НАО будет эксплуатироваться в течение 50 лет, ВАО — на протяжении 41 года [22].

В марте 2025 г. DOE обнародовало Дополнительный анализ к упомянутому выше Заявлению о воздействии на окружающую среду 2012 г. [23], в котором предлагается направить к концу 2040 г. около $1{,}2 \cdot 10^5$ м^3 предварительно обработанных ЖРО (супернатант и растворенный солевой осадок) из 22—24 емкостей с однослойной оболочкой, находящихся в резервуарных парках S, SX, U, на коммерческие мощности кондиционирования и захоронения. Рассматривается также вопрос потенциального строительства на площадке установки цементирования для отправки на захоронение отвержденных форм отходов. То есть, в отличие от стратегии DFLAW, ЖРО после обработки будут направляться на установки цементирования на площадке или вне ее и захораниваться за пределами штата. Это свидетельствует о намерении уточнить стратегию обращения с РАО и учесть критику со стороны GAO. Согласно ранее принятым решениям [12], на площадке возможно захоронение только остеклованных НАО, что обусловлено необходимостью защиты грунтовых вод и р. Колумбия. В Заявлении о воздействии на окружающую среду 2012 г. DOE также указывало, что вторичные отходы WPT должны быть иммобилизованы в более прочной, чем цементная, матрице.

Оценки стоимости обращения с ЖРО

DOE неоднократно подвергалось критике со стороны GAO за рост стоимости программ по очистке площадок, превышение бюджетов отдельных проектов и нарушение сроков выполнения работ. Размер будущих обязательств Экологического управления DOE (EM DOE) имеет устойчивую тенденцию к росту: в период 2011—2018 гг. они увеличились на 214 млрд долл. при том, что за это время на соответствующую деятельность было израсходовано 48 млрд долл. (рис. 12). Кроме того, GAO указывало на превышение стоимости и отставание от сроков сооружения WPT в Хэнфорде и SWPF в Саванна-Ривер, а также давало рекомендации по поиску альтернативных вариантов обращения с отходами Хэнфорда для экономии ресурсов и сокращения продолжительности работ [24].

Стоимость работ по площадке Хэнфорд также увеличивается от года к году. DOE в 2025 г. оценивало[1] размер предстоящих затрат по площадке Хэнфорд в диапазоне 364—589 млрд долл., причем неопределенность и риски, связанные

[1] Такие оценки, в соответствии с трехсторонним соглашением, выполняются DOE раз в три года и предоставляются регуляторам, они могут включать различные сценарии и допущения.

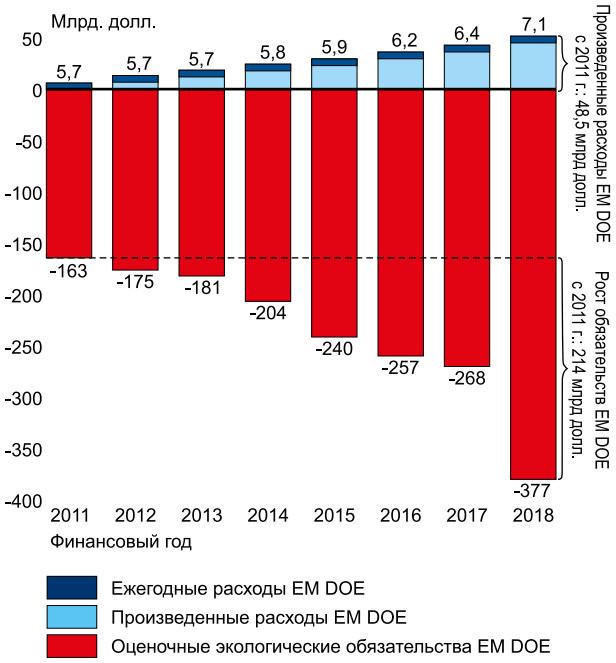

Рис. 12. Ежегодные расходы и оценки обязательств EM DOE в 2011–2018 финансовые годы [24]

с обращением с отходами резервуарных парков, с учетом WPT, были основной причиной такого разброса [22]. Строительство WPT, как отмечало GAO, на протяжении 20 лет сталкивалось с многочисленными техническими проблемами, включая технологию предварительной обработки для разделения РАО, при этом работы по отдельным объектам не были поставлены на паузу до разрешения технических вопросов и проектирование продолжалось по ходу их сооружения [25].

GAO еще в 2017 г. отмечало различие подходов DOE к обращению с отходами резервуарных парков, называемых НАО [26]. По площадке Саванна-Ривер экологическое ведомство штата Южная Каролина и DOE пришли к соглашению об использовании имеющейся установки цементирования, что дает возможность быстрее обрабатывать РАО и, следовательно, устранять риски, связанные с их длительным хранением в резервуарах.

В Хэнфорде выбор был сделан в пользу остекловывания на основе исследований, проведенных еще в 1990-е годы и показавших, что это станет наилучшим способом иммобилизации. На такое решение немалое влияние оказала позиция EPA и штата Вашингтон, а также опасения общественности относительно долгосрочной эффективности заключения РАО в цементную матрицу. Другими факторами стали бóльшие объемы захоронения для цементированных отходов и сомнения в равномерности затвердевания раствора из-за их остаточного тепловыделения. Принятое в то время решение об остекловывании касалось объема от трети до половины имеющихся НАО, и WPT начал проектироваться исходя из этих цифр. Таким образом, для обращения с оставшейся частью отходов, так называемыми «дополнительными» НАО (supplemental LAW), требовалась бы модификация WTP или же сооружение нового объекта, соответствующего тому способу обращения, который будет выбран. Согласно FFA это должно было быть сделано не позднее 30.04.2015, впоследствии эта дата была перенесена на три года позже, но и в 2018 г. DOE не приняло решение. В отличие от площадки Саванна-Ривер, где DOE и регуляторы демонстрируют высокую степень партнерства и достаточно гибкие подходы, между DOE и штатом Вашингтон есть разногласия по вопросу о том, есть ли у DOE полномочия выбрать иной, чем остекловывание, способ обращения с «дополнительными» НАО.

Что касается выполненных ранее оценок стоимости различных вариантов для Хэнфорда, то они были разноречивыми. Анализ, проведенный в 1995 г., показал, что цементирование обойдется дешевле на 1 млрд долл. на всем жизненном цикле (в ценах 1995 г.), но в эту сумму не были включены затраты на удаление из ЖРО некоторых радионуклидов. Исследование 2003 г. назвало остекловывание самым экономичным вариантом из трех для всего объема НАО Хэнфорда (только остекловывание, остекловывание и цементирование, только цементирование), но главным образом из-за дополнительных затрат, необходимых для перехода от одной стратегии к другой. Еще одно исследование 2003 г. показало, что цементирование было наиболее бюджетным вариантом для части НАО с точки зрения сооружения и эксплуатации установок, но более дорогим при учете затрат на транспортировку и захоронение. Наконец, на основе анализа информации в Заявлении о воздействии на окружающую среду 2012 г. GAO сделало вывод, что цементирование «дополнительных» НАО обойдется на 2,6 млрд дешевле (в ценах 2015 г.).

В 2023 г. DOE представило анализ 24 альтернативных вариантов по обращению с ВАО на площадке Хэнфорд, полная стоимость жизненного цикла оценивалась в диапазоне от 135 млрд до 5 трлн долл. Как реализуемый план, так и ряд

других вариантов требуют существенного повышения ежегодных затрат (до 8 млрд долл. в год на ближайшие 10 лет). Ни одна из альтернатив не приведет к завершению работ по обращению с ЖРО к 2047 г. (как было ранее установлено соглашениями), самый ранний возможный срок — это 2061 г. [25].

GAO обнародовало в том же году сравнительные затраты на обращение с ЖРО на двух площадках [27], см. табл. 1. На НАО приходится 95 % объема отходов резервуарных парков Хэнфорда, и, согласно текущим планам, WPT строится под остекловывание 60 % НАО. GAO отмечает, что в своих оценках общей стоимости работ на площадке DOE исходит из остекловывания оставшихся 40 %. В то же время способ обращения с «дополнительными» НАО не определен. Используя цементирование, DOE может сэкономить порядка 90 млрд долл. в течение следующих 50—60 лет (оценки с учетом инфляции).

Таблица 1. Оценочная стоимость сооружения объектов и обработки отходов [27]

Площадка	Стоимость, млн долл.	Стоимость на 1 галлон ($м^3$), долл.	Стоимость на 1 Ки, долл.
Хэнфорд Остекловывание приблизительно 50 млн галлонов НАО, содержащих около 4 млн Ки	70 000	1 400 (369 841)	17 500
Саванна-Ривер Цементирование приблизительно 36 млн галлонов солевых отходов, содержащих около 3 млн Ки	7 000	200 (52 834)	2 300

DOE учло ряд рекомендаций GAO, в том числе проводило анализ осуществимости цементирования НАО. Внесение этого пункта в трехстороннее соглашение [21] и подготовка дополнительного анализа к Заявлению о воздействии на окружающую среду 2012 г. [23] являются важными шагами в этом направлении. В то же время упомянутые документы лишь намечают данную альтернативу и не являются решением, одобренным регуляторами. DOE может столкнуться с рядом правовых проблем и разногласиями между заинтересованными сторонами по вопросу о том, каким должно быть обращение с отходами резервуаров. Помимо этого, требует разрешения правовая коллизия по классификации РАО Хэнфорда (подробнее см. [2]), а также полномочиям DOE по определению способов обращения с ними и возможности не применять остекловывание к части отходов.

Заключение

Резервуарные парки площадок Саванна-Ривер и Хэнфорд — это самые крупные хранилища ЖРО в США, работы по которым рассчитаны на много десятилетий. Это одновременно и наиболее дорогостоящая составляющая общих работ по площадкам. Накопленный опыт и извлеченные уроки показывают важность рассмотрения различных стратегий обращения с РАО на всем жизненном цикле и обоснования выбора общей концепции работ с учетом экономической целесообразности. Успешность реализации таких стратегий зависит в том числе и от того, насколько плодотворным будет взаимодействие с регуляторами и другими заинтересованными сторонами. В этом плане площадка Саванна-Ривер является хорошим примером партнерства и гибкости подходов.

Своевременное проектирование и сооружение объектов инфраструктуры обращения с РАО — ключевой вопрос, который решается на основе принятой стратегии обращения с отходами и учитывает требуемые объемы и сроки деятельности, имеющиеся технические и финансовые ограничения. Извлекаемые из резервуаров РАО могут направляться как на установки обработки и иммобилизации, так и на хранение в более безопасных условиях до запуска соответствующих объектов и строительства мощностей захоронения.

Особенностью работ по обращению с ВАО резервуарных парков является необходимость подготовки индивидуальных технических решений из-за различия конструкций и состояния резервуаров, объемов и состава хранимых ЖРО, истории эксплуатации (наличие утечек и др.). После извлечения отходов резервуары могут захораниваться на месте с сооружением требуемых барьеров безопасности, незначительная часть РАО остается в резервуаре, если дальнейшее их извлечение нецелесообразно или технически невыполнимо.

И для сооружаемых объектов инфраструктуры, и для работ по отдельным резервуарам показательным является перенос первоначально запланированных сроков выполнения, а в некоторых случаях и пересмотр ранее принятых технических решений, которые оказались

недостаточно обоснованными или неэффективными. Причинами могут являться излишний оптимизм и недооценка имеющихся трудностей, неопределенность в отношении эффективности разрабатываемых технических решений, а также рост затрат на их реализацию. Опыт площадки Хэнфорд в части строительства WTP и принятия решений по выбору способов обращения с ЖРО может служить иллюстрацией таких сложностей.

Литература

1. Environmental Cleanup: Status of Major DOE Projects and Operations. Report to Congressional Addressees. United States Government Accountability Office, May 2022. 98 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-22-104662.pdf (дата обращения: 01.07.2025).
2. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий / Под общей ред. И. И. Линге и А. А. Абрамова, Т. 1. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 336 с.
3. Liquid Waste Tank Farms. Facts from the Savannah River Site. January 2021. 3 p. — URL: https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_radioactive_tank_farms.pdf (дата обращения: 02.07.2025).
4. *Romanowski L.* Waste Tank Closure Process — Sampling and Analysis Phase. SRMC-CWDA-2025-00007. January 28, 2025. 21 p. — URL: https://www.srs.gov/general/outreach/srs-cab/library/meetings/2025/ms/7.%20Waste%20Tank%20Closure.pdf (дата обращения: 02.07.2025).
5. *Aiken S. C.* Tank Closure Project Goes Operational at Savannah River Site. January 24, 2019. — URL: https://www.energy.gov/srs/articles/tank-closure-project-goes-operational-savannah-river-site (дата обращения: 02.07.2025).
6. Tank Closure Cesium Removal. Facts from Savannah River Site. December 2020. 1 p. - URL: https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_tank_closure_cesium_removal.pdf (дата обращения: 02.07.2025).
7. *Taylor-Pashow K. M. L., Diprete D. P.* Tank Closure Cesium Removal Ion Exchange Column CST Characterization. SRNL-STI-2024-00072, Revision 0. April 2024. 15 p. — URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/2341754 (дата обращения: 02.07.2025).
8. Consolidated General Closure Plan for F-Area and H-Area Waste Tank Systems. SRR-CWDA-2017-00015, Revision 0. February 2017. 127 p. — URL: https://www.nrc.gov/docs/ML2027/ML20279A784.pdf (дата обращения: 02.07.2025).
9. SRS, Regulators Reach Agreement for Liquid Waste Cleanup Milestones. March 28, 2023. — URL: https://www.energy.gov/srs/articles/srs-regulators-reach-agreement-liquid-waste-cleanup-milestones (дата обращения: 02.07.2025).
10. *Romanowski L. B.* Proposal to Cease Waste Removal Activities in Tank 10 and Enter Sampling and Analysis Phase. May 2, 2024. 92 p. — URL: https://www.srs.gov/general/programs/soil/arf/pdfs/552575546483F13F85258B1800609F68_ARF-024558.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
11. Savannah River Site empties more waste tanks // Nuclear Newswire. June 27, 2025. — URL: https://www.ans.org/news/2025-06-27/article-7152/savannah-river-site-empties-more-waste-tanks/ (дата обращения: 03.07.2025).
12. Final Tank Closure and Waste Management Environmental Impact Statement for the Hanford Site, Richland, Washington. U.S. Department of Energy, November 2012. 72 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/EIS-0391-FEIS-Readers_Guide-2012.pdf (дата обращения: 08.07.2025).
13. *Peterson R. A.* Hanford Tank Waste History. January 20, 2022. 37 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/TCF_Hanford_Tank_Waste_Summary_RA_Peterson_Rev6_4_22_21.pdf (дата обращения: 07.07.2025).
14. Hanford's Upgraded Evaporator Back in Service for Tank Waste Cleanup. Office of Environmental Management, April 29, 2025. — URL: https://www.energy.gov/em/articles/hanfords-upgraded-evaporator-back-service-tank-waste-cleanup (дата обращения: 03.07.2025).
15. Hanford advances WPT cold commissioning with introduction of waste simulants // Nuclear Newswire, May 28, 2025. — URL: https://www.ans.org/news/tag-dflaw/ (дата обращения: 03.07.2025).
16. *Johnson J.* A/AX Tank Farms Single-Shell Tank Retrievals. – October 15, 2019. 9 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/A-AX_SST_Retreivals_FINAL.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
17. A/AX Retrieval Project Status. Presented by Office of River Protection Tank Farms. January 2019. 9 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/Final_TWC_A_AX_Tanks_HAB_010919.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
18. Hanford Workers Retrieving Waste from Another Single-Shell Tank. January 13, 2021. — URL: https://content.govdelivery.com/accounts/USDOEOEM/bulletins/2b59372 (дата обращения: 03.07.2025).

19. The Hanford Site. A/AX Tank Farms Retrievals. Factsheet, January 2024. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/A-AX_Retrieval_Fact_Sheet.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
20. Hanford Workers Remove Radioactive Waste from 21st Large Underground Tank. July 2, 2024. — URL: https://www.energy.gov/em/articles/hanford-workers-remove-radioactive-waste-21st-large-underground-tank (дата обращения: 03.07.2025).
21. Final Approval Package on the Future of Tank Waste Cleanup at the Hanford Site. Hanford Federal Facility Agreement and Consent Order (Tri-Party Agreement) and Washington v. Energy Consent Decree Case No. 08-5085-RMP Changes. January 10, 2025. 386 p. — URL: https://pdw.hanford.gov/document/AR-33193 (дата обращения: 03.07.2025).
22. 2025 Hanford Lifecycle Scope, Schedule, and Cost Report. DOE/HFO-2025-13. Revision 0. March 2025. 252 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/2025_Lifecycle_Scope,_Schedyle_and_Cost_Report.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
23. Supplement Analysis of the Final Tank Closure and Waste Management Environmental Impact Statement for the Hanford Site, Richland, Washington. DOE/EIS-0391-SA-5 (Draft). March 2025. 97 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-03/eis-0391-sa-05-draft_200W_tank_waste_treatment_SA_2025-03-25.pdf (дата обращения: 08.07.2025).
24. GAO-19-460-T, Department of Energy: Environmental Liability Continues to Grow, and Significant Management Challenges Remain for Cleanup Efforts. May 1, 2019. 27 p. https://www.gao.gov/assets/700/698855.pdf (дата обращения: 03.07.2025).
25. Hanford Cleanup: DOE Should Validate Its Analysis of High-Level Waste Treatment Alternatives. GAO-23-106093. May 2023. 43 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-23-106093.pdf (дата обращения: 10.07.2025).
26. Nuclear Waste: Opportunities Exist to Reduce Risks and Costs by Evaluating Different Waste Treatment Approaches at Hanford. GAO-17-306. May 03, 2017. 84 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-17-306.pdf (дата обращения: 09.07.2025).
27. Hanford Cleanup: Alternative Approaches Could Save Tens of Billions of Dollars. GAO-23-106880. September 2023. 2 p. — URL: https://www.gao.gov/products/gao-23-106880 (дата обращения: 03.07.2025).

Информация об авторах

Абалкина Ирина Леонидовна, кандидат экономических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: abalkina@ibrae.ac.ru.

Ведерникова Марина Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Абалкина И. Л., Ведерникова М. В. Обращение с ВАО резервуарных парков на площадках Саванна-Ривер и Хэнфорд (США) // Радиоактивные отходы. 2025. № 3 (32). С. 59—74. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-59-74.

MANAGEMENT OF HLW FROM TANK FARMS AT SAVANNAH RIVER AND HANFORD SITES (USA)

Abalkina I. L., Vedernikova M. V.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on Jule 19, 2025

The article provides a brief overview of management strategies for high-level waste (HLW) from the Savannah River and Hanford tank farms. It presents case studies of waste removal from individual tanks. It also provides cost assessments for waste management activities at two sites. The challenges affecting the development of strategies and the progress of waste management operations are also discussed.

Keywords: *tank farms, high-level waste, liquid waste management, grouting, vitrification, radioactive waste.*

References

1. Environmental Cleanup: Status of Major DOE Projects and Operations. Report to Congressional Addressees. United States Government Accountability Office, May 2022. 98 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-22-104662.pdf (accessed on: 01.07.2025).

2. *Luchshie zarubeznye praktiki vyvoda iz expluatatzii yadernyh ustanovok i reabilitatzii zagryaznennyh territorii. T. 1. Pod objei redaktziei I. I. Linge i A. A. Abramova* [The best foreign practice of decommissioning nuclear installations and rehabilitation of contaminated areas. V. 1. Edited by I. I. Linge and A. A. Abramov]. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 336 p.

3. Liquid Waste Tank Farms. Facts from the Savannah River Site. January 2021. 3 p. https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_radioactive_tank_farms.pdf (accessed on: 02.07.2025).

4. Romanowski L. Waste Tank Closure Process — Sampling and Analysis Phase. SRMC-CWDA-2025-00007. January 28, 2025. 21 p. — URL: https://www.srs.gov/general/outreach/srs-cab/library/meetings/2025/ms/7.%20Waste%20Tank%20Closure.pdf (accessed on: 02.07.2025).

5. Aiken S. C. Tank Closure Project Goes Operational at Savannah River Site. January 24, 2019. — URL: https://www.energy.gov/srs/articles/tank-closure-project-goes-operational-savannah-river-site (accessed on: 02.07.2025).

6. Tank Closure Cesium Removal. Facts from Savannah River Site. December 2020. 1 p. https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_tank_closure_cesium_removal.pdf (accessed on: 02.07.2025).

7. Taylor-Pashow K. M. L., Diprete D. P. Tank Closure Cesium Removal Ion Exchange Column CST Characterization. SRNL-STI-2024-00072, Revision 0. April 2024. 15 p. — URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/2341754 (accessed on: 02.07.2025).

8. Consolidated General Closure Plan for F-Area and H-Area Waste Tank Systems. SRR-CWDA-2017-00015, Revision 0. February 2017. 127 p. — URL: https://www.nrc.gov/docs/ML2027/ML20279A784.pdf (accessed on: 02.07.2025).

9. SRS, Regulators Reach Agreement for Liquid Waste Cleanup Milestones. March 28, 2023. — URL: https://www.energy.gov/srs/articles/srs-regulators-reach-agreement-liquid-waste-cleanup-milestones (accessed on: 02.07.2025).

10. Romanowski L. B. Proposal to Cease Waste Removal Activities in Tank 10 and Enter Sampling and Analysis Phase. May 2, 2024. 92 p. — URL: https://www.srs.gov/general/programs/soil/arf/pdfs/552575546483F13F85258B1800609F68_ARF-024558.pdf (accessed on: 03.07.2025).

11. Savannah River Site empties more waste tanks. Nuclear Newswire, June 27, 2025. — URL: https://www.ans.org/news/2025-06-27/article-7152/savannah-river-site-empties-more-waste-tanks/ (accessed on: 03.07.2025).

12. Final Tank Closure and Waste Management Environmental Impact Statement for the Hanford Site, Richland, Washington. U.S. Department of Energy, November 2012. 72 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/EIS-0391-FEIS-Readers_Guide-2012.pdf (accessed on: 08.07.2025).

13. Peterson R. A. Hanford Tank Waste History. January 20, 2022. 37 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/TCF_Hanford_Tank_Waste_Summary_RA_Peterson_Rev6_4_22_21.pdf (accessed on: 07.07.2025).

14. Hanford's Upgraded Evaporator Back in Service for Tank Waste Cleanup. Office of Environmental

Management, April 29, 2025. — URL: https://www.energy.gov/em/articles/hanfords-upgraded-evaporator-back-service-tank-waste-cleanup (accessed on: 03.07.2025).
15. Hanford advances WPT cold commissioning with introduction of waste simulants. *Nuclear Newswire,* May 28, 2025. — URL: https://www.ans.org/news/tag-dflaw/ (accessed on: 03.07.2025).
16. Johnson J. A/AX Tank Farms Single-Shell Tank Retrievals. October 15, 2019. 9 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/A-AX_SST_Retreivals_FINAL.pdf (accessed on: 03.07.2025).
17. A/AX Retrieval Project Status. Presented by Office of River Protection Tank Farms. January 2019. 9 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/Final_TWC_A_AX_Tanks_HAB_010919.pdf (accessed on: 03.07.2025).
18. Hanford Workers Retrieving Waste from Another Single-Shell Tank. January 13, 2021. — URL: https://content.govdelivery.com/accounts/USDOEOEM/bulletins/2b59372 (accessed on: 03.07.2025).
19. The Hanford Site. A/AX Tank Farms Retrievals. Factsheet, January 2024. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/A-AX_Retrieval_Fact_Sheet.pdf (accessed on: 03.07.2025).
20. Hanford Workers Remove Radioactive Waste from 21st Large Underground Tank. July 2, 2024. — URL: https://www.energy.gov/em/articles/hanford-workers-remove-radioactive-waste-21st-large-underground-tank (accessed on: 03.07.2025).
21. Final Approval Package on the Future of Tank Waste Cleanup at the Hanford Site. Hanford Federal Facility Agreement and Consent Order (Tri-Party Agreement) and Washington v. Energy Consent Decree Case No. 08-5085-RMP Changes. January 10, 2025. 386 p. — URL: https://pdw.hanford.gov/document/AR-33193 (accessed on: 03.07.2025).
22. 2025 Hanford Lifecycle Scope, Schedule, and Cost Report. DOE/HFO-2025-13. Revision 0. March 2025. 252 p. — URL: https://www.hanford.gov/files.cfm/2025_Lifecycle_Scope,_Schedyle_and_Cost_Report.pdf (accessed on: 03.07.2025).
23. Supplement Analysis of the Final Tank Closure and Waste Management Environmental Impact Statement for the Hanford Site, Richland, Washington. DOE/EIS-0391-SA-5 (Draft). March 2025. 97 p. — URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-03/eis-0391-sa-05-draft_200W_tank_waste_treatment_SA_2025-03-25.pdf (accessed on: 08.07.2025).
24. GAO-19-460-T, Department of Energy: Environmental Liability Continues to Grow, and Significant Management Challenges Remain for Cleanup Efforts. May 1, 2019. 27 p. https://www.gao.gov/assets/700/698855.pdf (accessed on: 03.07.2025).
25. Hanford Cleanup: DOE Should Validate Its Analysis of High-Level Waste Treatment Alternatives. GAO-23-106093. May 2023. 43 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-23-106093.pdf (accessed on: 10.07.2025).
26. Nuclear Waste: Opportunities Exist to Reduce Risks and Costs by Evaluating Different Waste Treatment Approaches at Hanford. GAO-17-306. May 03, 2017. 84 p. — URL: https://www.gao.gov/assets/gao-17-306.pdf (accessed on: 09.07.2025).
27. Hanford Cleanup: Alternative Approaches Could Save Tens of Billions of Dollars. GAO-23-106880. September 2023. 2 p. — URL: https://www.gao.gov/products/gao-23-106880 (accessed on: 03.07.2025).

Information about the author

Abalkina Irina Leonidovna, PhD, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: abalkina@ibrae.ac.ru.

Vedernikova Marina Vladimirovna, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Abalkina I. L., Vedernikova M. V. Management of HLW from Tank Farms at Savannah River and Hanford Sites (USA). *Radioactive Waste,* 2025, no. 3 (32), pp. 59—74. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-59-74. (In Russian).