

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАКОПЛЕННЫХ ВАО РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ПО «МАЯК»

П. В. Козлов, М. В. Логунов, М. Б. Ремизов, С. М. Шайдуллин, С. А. Лукин, Е. Н. Зубриловский
ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 5 июня 2023 г.

Представлена информация об исследованиях, проводившихся на ФГУП «ПО «Маяк» в период с 1986 по 2021 год, по разработке технологии переработки щелочных гетерогенных ВАО. Приведены технологические схемы, полученные в ходе данной работы. Описана логика их построения и этапы эволюции. Отражен широкий спектр проведенных исследований и опыт масштабирования экспериментов. Показано, что принятая к реализации в рамках создания нового комплекса остекловывания технологическая схема требует оптимизации для снижения объемов образуемых отвержденных форм РАО 1 класса и повышения производительности процесса.

Ключевые слова: емкости-хранилища, высокоактивные отходы, осадки, микрофльтрация, нейтрализация, сорбция, экстракция, цементирование, остекловывание, ИПХТ, кальцинатор, радиоактивные отходы.

На ФГУП «ПО «Маяк» накоплено значительное количество гетерогенных высокоактивных отходов (ВАО), образованных в результате применения на радиохимическом заводе «ДБ» (дублере завода «Б» — предшественника РТ-1), а с 1977 по 1986 год и на самом заводе РТ-1 осадительных технологий обезвреживания хвостовых высокоактивных растворов от переработки ОЯТ промышленных реакторов. Эти отходы (пульпы) хранятся в специальном комплексе, находящемся в активной эксплуатации с 1968 по 1986 г. и включающем 14 емкостей-хранилищ, которые представляют собой изолированные друг от друга бетонные отсеки, облицованные нержавеющей сталью вместимостью 1300 м³ и рабочим объемом 1170 м³ каждая [1], [2]. Емкости первой очереди (8 единиц) не имеют штатных систем охлаждения, а также размывки и удаления осадков.

Заполнение емкостей происходило в режиме «прием — отстаивание — декантация». В результате основная часть осколочных радионуклидов локализовалась на осадках, а среднеактивные осветленные отходы сбрасывали в оз. Карачай. В 1986 г., после пуска на ФГУП «ПО «Маяк» комплекса остекловывания ВАО, хранилище было законсервировано. Всего в емкостях-хранилищах было накоплено около 14,5 тыс. м³ отходов.

В результате уплотнения осадков при длительном хранении одновременно с увеличением объемной активности снижалась их подвижность, что приводило к значительному увеличению донных температур (вплоть до 120—125 °С) вследствие замедления конвективных потоков в неохлаждаемых емкостях.

С целью улучшения условий теплопередачи и стабилизации температурного режима хранения суспензий, по рекомендациям Центральной

заводской лаборатории (ЦЗЛ) в 6 неохлаждаемых емкостях-хранилищах проведена обработка осадка концентрированным раствором гидроксида натрия. После его подачи на дно под слой осадка в зоны с повышенными температурами произошло разрыхление плотных слоев суспензии вследствие растворения одного из основных компонентов осадка — амфотерного гидроксида алюминия, а также частичное разложение ферроцианидного комплекса и выход радионуклида цезия в раствор [1], [2]. Щелочная обработка суспензий привела к существенному снижению температуры во всех зонах контроля, в том числе и на дне емкостей-хранилищ, а также значительно уменьшилась высота слоя плотного осадка.

В настоящее время отходы представляют собой преимущественно щелочные системы из осадков и осветленных растворов с преобладанием растворной части. Их основу составляют соединения алюминия, железа, никеля, хрома, марганца, кремния. Жидкая фаза представляет собой высокоминерализованные растворы, химический состав которых обусловлен преимущественно нитратом, гидроксидом, алюминатом и нитритом натрия. Состав и активность растворной части накопленных высокоактивных отходов (НВАО) зависит от уровня над осадком. В глубинных слоях осветленной фазы возрастает суммарная бета-активность, вклад стронция в нее, а также концентрация основных

макрокомпонентов жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Радионуклидный состав отходов представлен осколочными продуктами и актинидами, содержание которых в осадке значительно (в десятки-сотни раз) выше, чем в осветленной фазе. Активность растворной части на 99,9% определяется радионуклидом ^{137}Cs , а осадка — радионуклидами цезия, стронция, плутония и америция.

Емкости оснащены системой контроля параметров процесса хранения ЖРО. Периодически (один раз в 10 лет) осуществляется освидетельствование и диагностирование хранилищ, по результатам принимается решение о дальнейшем продлении периода их эксплуатации. Срок следующего освидетельствования — 2026 год.

Концепция развития радиохимического завода предполагает освобождение указанных емкостей-хранилищ от отходов с последующим выводом объектов из эксплуатации. Проработка вариантов реализации данной задачи началась на ФГУП «ПО «Маяк» практически сразу же после консервации хранилища.

Хронологическая последовательность мероприятий по разработке и реализации технологий переработки НВАО на ФГУП «ПО «Маяк» приведена в табл. 1.

В качестве базового метода отверждения накопленных ВАО изначально рассматривалось остекловывание в электропечи большой производительности типа ЭП-500.

Таблица 1. Хронология разработки технологий переработки НВАО

Период	Работы	Участники
1987–1992 гг.	Щелочная обработка емкостей и приведение их к нормальному температурному режиму	ФГУП «ПО «Маяк»
1985–1995 гг.	Предварительное изучение вопросов определения состава НВАО, растворения осадков, фракционирования и остекловывания	ФГУП «ПО «Маяк»
1994–2010 гг.	Эпизодические операции по прямому остекловыванию декантата в печах ЭП-500	ФГУП «ПО «Маяк»
2003–2008 гг.	Разработка технологии отверждения декантата НВАО в керамикрит	ФГУП «ПО «Маяк», ГЕОХИ РАН, МГУ, ФГУП «ГХК»
2008–2011 гг.	Выполнение Госконтракта по созданию технологии переработки НВАО	ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «ГХК», АО «ВНИИНМ», АО «Радиевый институт», ФГУП «РАДОН», АО «СвердНИИхиммаш», ИХ ДВО РАН
2012 год	Разработка ТЗ на опытно-промышленную установку переработки НВАО	ФГУП «ПО «Маяк»
2012–2020 гг.	Анализ отдельных стадий переработки НВАО по договорам за средства ФГУП «ПО «Маяк»	ФГУП «ПО «Маяк», АО «Радиевый институт», ИФХЭ РАН, ИХ ДВО РАН
2018–2019 гг.	Переработка 63 м ³ и 200 м ³ декантата и подвижного осадка НВАО в рамках договоров с ГК «Росатом» с остекловыванием в ЭП-500/5	ФГУП «ПО «Маяк»
2020–2021 гг.	Проектирование НКО, включая технологические переделы переработки НВАО	АО «РАОПРОЕКТ»
2022 год	Прохождение Главгосэкспертизы проекта НКО	АО «РАОПРОЕКТ»

Данный подход был обусловлен следующими факторами:

- наличием опыта и действующего оборудования на предприятии по остекловыванию других групп ВАО;
- анализом зарубежной практики обращения с НВАО.

Так, на схожем объекте в Хэнфорде, где размещено примерно 212 тыс. м³ ЖРО от производства плутония в рамках оборонных программ США, хранящихся в 177 подземных емкостях, создан завод WTP на площади примерно 27 га, сметная стоимость которого превышает 17 миллиардов долларов. Завод ориентирован на отверждение 250 тыс. м³ ЖРО методом остекловывания после предварительной обработки. В его состав заложено строительство керамических плавителей джоулева нагрева с площадью плавильной ванны 3,75 м² и 10 м² (по 2 шт.) [3]. В 2022 году запущена первая печь массой 300 т [4]. Проектный ресурс плавителя составляет пять лет. Разработчик проекта — фирма Bechtel. Планируемый срок остекловывания ЖРО — до 2069 года.

После завершения эксплуатации емкостей-хранилищ специалистами ФГУП «ПО «Маяк» были проработаны в лабораторном масштабе вопросы остекловывания щелочного декантата в алюмофосфатное стекло, а также растворения осадков щелочами и кислотами. Установлен факт неполного соответствия расчетных и экспериментальных данных по составу осадков. Выполнены эксперименты по сорбционному (на ферроцианидах калия — меди) и экстракционному (с хлорированным дикарболлидом кобальта) выделению цезия и стронция из растворенных осадков с целью перевода данных растворов в категорию среднеактивных радиоактивных отходов (САО).

На основе полученных результатов сформулированы предложения по технологической схеме переработки отходов (рис. 1). Однако дальнейшего развития исследования не получили вследствие сложной экономической ситуации на предприятии и в отрасли в целом в конце 1990-х — начале 2000-х годов.

В процессе эксплуатации на радиохимическом производстве электропечей типа ЭП-500 (с 1994 по 2020 год) осуществлялись эпизодические попытки переработки малой части осветленной фазы НВАО путем добавления небольших порций в жидком виде при комплектации отдельных операций. Их объем в разные годы приведен в табл. 2. Следует учесть, что в период с 2003 по 2010 год, в соответствии с требованиями безопасности для обеспечения теплофизической стабильности емкостей-хранилищ, объем



Рис. 1. Вариант технологической схемы переработки накопленных гетерогенных ВАО (1995 г.)

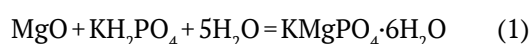
Таблица 2. Объем переработанного продукта в печах типа ЭП-500

Печь	Год	Объем V, м ³
ЭП-500/3	2003	25,0
	2004	158,8
ЭП-500/4	2008	60,0
	2009	47,5
	2010	34,3
ЭП-500/5	2018	63,0
	2019	200,0
Всего		588,6

растворной части емкостей-хранилищ не изменяли, компенсируя хозяйственной водой объем отходов, переданных для переработки. В 2018—2019 годах в связи с пересмотром требований безопасности эта практика была отменена.

Однако назвать подобный опыт полноценной переработкой НВАО нельзя вследствие ограниченного объема, а также бесперспективности подобного подхода при распространении его на все отходы, включая осадки.

С 2003 по 2008 год совместно с ГЕОХИ РАН и МГУ по договору с Аргоннской национальной лабораторией прорабатывался вариант отверждения осветленной части НВАО в магний-калий-фосфатной (МКФ) матрице (керамикрит) в соответствии с реакцией:



Планировалось использование разработанных технических решений в Саванна Ривере при локализации отходов схожего состава. Этот

процесс позволял надежно фиксировать радионуклиды цезия в матричном материале за счет введения ферроцианидной добавки. В результате получали компаунд с приемлемыми показателями по включению отходов и механической прочности [5]–[7], сопоставимыми с таковыми для компаундов на основе шлакощелочного цемента [8]. Сравнительный анализ процессов отверждения в портландцементне (ПЦ) и МКФ-матрице приведен в табл. 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ процессов отверждения в ПЦ и МКФ-матрице

Показатель качества	Шлако-портландцементный компаунд	Фосфатный матричный материал
Плотность, г/см ³	1,55–1,85	1,55–1,80
Механическая прочность	Показатели механической прочности, радиационной устойчивости, устойчивости к термоциклам и водостойкости удовлетворяют требованиям [9]	Показатели механической прочности, радиационной устойчивости, устойчивости к термоциклам и водостойкости удовлетворяют требованиям [9]
Радиационная устойчивость		
Устойчивость к термоциклам		
Водостойкость		
Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут):		
альфа-излучающие нуклиды	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
¹³⁷ Cs	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Стоимость исходных материалов	Низкая – ~30 тыс. руб./т	Высокая – ~300 тыс. руб./т
Увеличение объема отходов	1,5–2 раза	1,7–2 раза

Процесс был масштабирован от лабораторного уровня (образцы объемом от 2 см³) до опытного (образцы объемом до 200 дм³).

Анализ результатов выполненных работ показал, что помимо достоинств, присущих для большинства методов, использующих вяжущие гидратационного твердения (низкая температура процесса отверждения, высокая толерантность к составу отходов, высокая прочность фиксации радионуклидов за счет различных сорбционных добавок), у данного метода (МКФ-матрицы) есть ряд специфичных недостатков. К таковым относятся:

- высокая стоимость используемых реагентов,кратно превышающая стоимость цементных смесей;
- особые требования в организации хранения исходных материалов и процесса отверждения;
- высокая скорость реакции твердения и ее высокая экзотермия.

Следует также принять во внимание отсутствие упоминания про МКФ-матрицу в нормативных документах [9].

Таким образом, от внедрения данной технологии на ФГУП «ПО «Маяк» было решено отказаться из-за высоких издержек и дополнительных проблем в ходе эксплуатации при отсутствии заметных преимуществ в сравнении с технологией цементирования.

Для решения задачи разгрузки емкостей-хранилищ ПО «Маяк» и перевода в устойчивую матричную форму накопленных в них ВАО, образовавшихся при выполнении оборонной программы, в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» была разработана программа НИОКР «Разработка технологии и оборудования для переработки накопленных ЖРО ФГУП «ПО «Маяк», на период 2008–2011 гг.». Заказчиком программы являлась ГК «Росатом», исполнителем — ФГУП «ПО «Маяк». К проведению работ был подключен ряд производственных, научных и конструкторских организаций России: ФГУП «ГХК», АО «ВНИИНМ», АО «Радиевый институт», ФГУП «РАДОН», АО «СвердНИИхиммаш», ИХ ДВО РАН и некоторые другие.

В рамках указанной программы создавались технологии всего цикла переработки накопленных отходов: начиная от извлечения растворов и осадков из емкостей-хранилищ, заканчивая отверждением подготовленных отходов в устойчивые матричные материалы. При этом исследования проводились как в лабораторном масштабе, так и в опытном, с испытанием специально разработанных единиц оборудования. Ниже приведен краткий перечень исполнителей и проведенных ими работ:

- ФГУП «ГХК»: пульпоподъемное оборудование;
- АО «ВНИИНМ»: индукционный плавитель с холодным тиглем (ИПХТ) и горизонтальный кальцинатор, а также исследования по составу фосфатной и боросиликатной стекломатрицы;
- ФГУП «РАДОН»: роторно-пленочный испаритель и ИПХТ;
- АО «СвердНИИхиммаш»: стенд ИПХТ, система быстроразъемных соединений для дистанционного демонтажа оборудования;
- АО «Радиевый институт»: разработка технологии подготовки осветленной фазы к отверждению с нейтрализацией раствора методом карбонизации;
- ИХ ДВО РАН: разработка технологии гидротермального выведения из осветленной части ВАО Na, Al и Sr в форме химически и термически устойчивых кристаллических алюмосиликатов.

Результаты исследований АО «ВНИИНМ» показали, что прямое отверждение данных отходов в боросиликатное стекло приведет к образованию огромного количества компаунда (до 2 тыс. т на 1 тыс. м³ ВАО) из-за существующих для такого стекла ограничений по включению сульфатов (не более 1%). При превышении данной границы происходит ликвация расплава и образуется отдельная сульфат-содержащая фаза, так называемая «хальмоза», при этом наблюдается повышенная скорость выщелачивания компонентов стекла. Так, для натрия характерна скорость примерно $3 \cdot 10^{-2}$ г/(см²·сут).

Алюмофосфатное стекло более толерантно к сложному химическому составу отверждаемых отходов (допускает содержание до 3% по массе сульфатов), но и его образуется около 800 т на 1 тыс. м³ ВАО.

Следует отметить, что указанные пределы по включению сульфатов в стекло являются в значительной степени оценочными показателями, полученными по ограниченному количеству экспериментов и отражающими потенциальную возможность увеличения регламентных ограничений. Существующий опыт эксплуатации промышленных печей остекловывания типа ЭП-500 свидетельствует о более жестких ограничениях: по сульфатам — 0,42%, оксиду никеля — 0,3%, оксиду хрома — 0,4%. Для их изменения требуется провести значительную работу по подбору составов с целью обеспечения как нормативных, так и технологических требований к застывшему компаунду и расплаву стекла (термовискозиметрические, коррозионные свойства и т. д.).

В результате при прямом остекловывании отходов, даже при учете увеличенных пределов по включению критичных компонентов, потребуется более 20 лет бесперебойной работы электропечей для кондиционирования в фосфатное стекло и более 50 лет — в боросиликатное стекло (при отверждении только этой группы отходов).

В связи с этим необходимо отметить, что:

- указанные сроки неприемлемы с точки зрения безопасности, поскольку нет гарантии, что существующий комплекс хранилищ прослужит такое время;
- потребуется сооружение от 4 до 10 электропечей типа ЭП-500 для отверждения размещенных в емкостях-хранилищах отходов;
- в результате кондиционирования образуется примерно 4 тыс. м³ отходов 1 класса (без учета увеличения их объема при контейнеризации).

Был сделан вывод, что снижение количества остеклованных ВАО может быть достигнуто путем предварительного выведения сульфат- и хромат-ионов, а также никеля из отходов в отдельный поток (потоки). Кроме того, более предпочтительным представляется использование для отверждения ВАО алюмофосфатного стекла.

Для размывки плотных осадков в донной части емкостей было решено использовать пульпоразмывочное оборудование разработки ФГУП «ГХК», хорошо зарекомендовавшее себя при удалении осадков схожей природы из его емкостей-хранилищ. Оно представлено на рис. 2. Оборудование, размещенное в каньоне, было испытано специалистами ФГУП «ПО «Маяк» в 2010—2011 гг. на созданных

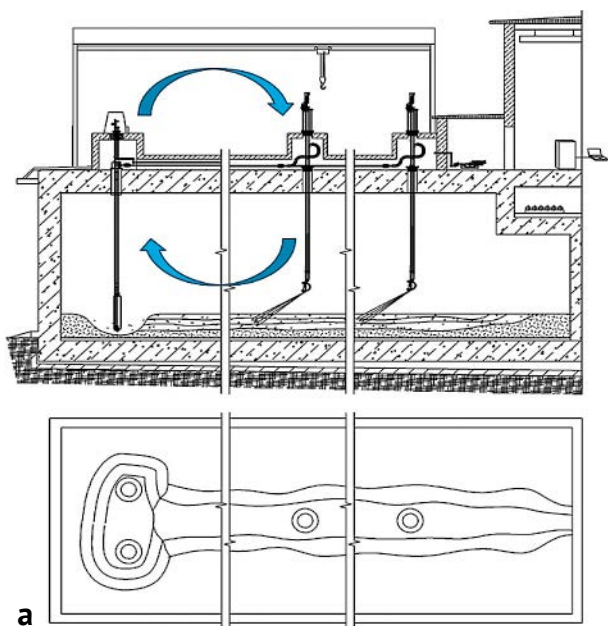


Рис. 2. Пульподъемное оборудование разработки ФГУП «ГХК»: а — схема размещения; б — внешний вид в каньоне

для этого модельных системах и подтвердило свою работоспособность.

Однако его установка подразумевала организацию нескольких проемов в верхнем перекрытии освобождаемой емкости-хранилища для опускания внутрь погружных насосов и выносных сопел, а также организацию мощной биологической защиты размещенного на нем оборудования. В связи с этим возникли сложности с обоснованием достаточной прочности существующих железобетонных конструкций здания для подобных нагрузок, что воспрепятствовало в конечном итоге включению данного комплекса оборудования в состав проекта.

В рамках госконтракта 2008—2011 гг. в качестве основного оборудования для остекловывания ВАО изначально рассматривали ИПХТ, в первую очередь из-за его малой чувствительности к коррозионноактивным и повышающим температуру варки стекла компонентам. При этом для компенсации низкой производительности подобных устройств по отверждаемым растворам (вследствие малой поверхности испарения и небольшого объема варочной зоны) возникла необходимость внедрения в технологическую схему дополнительных стадий глубокого концентрирования (роторно-пленочный концентратор) и кальцинации (горизонтальный кальцинатор).

Указанные образцы оборудования АО «ВНИИНМ» и ФГУП «РАДОН» продемонстрировали принципиальную работоспособность, но в то же время оказались непригодными к применению в высокоактивных средах (требования по дистанционности обслуживания, надежности основных единиц и периферийных устройств).

ИПХТ производства ФГУП «РАДОН» (рис. 3а) вышел из строя в ходе испытаний в результате прогорания элемента корпуса, вследствие чего его использование было прекращено.

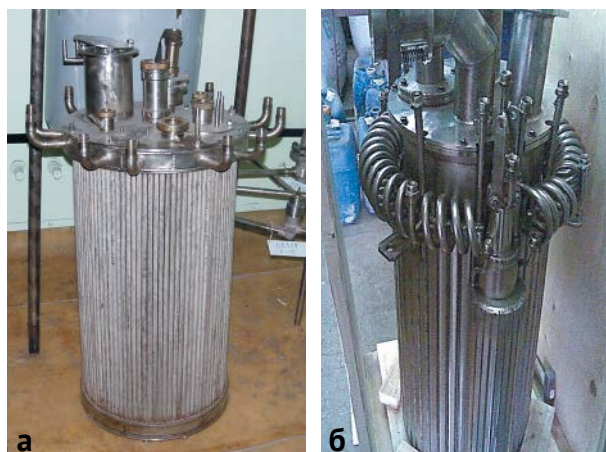


Рис. 3. ИПХТ разработки различных организаций:
а – ФГУП «РАДОН», б – АО «ВНИИНМ»

Роторно-пленочный концентратор, созданный на ФГУП «РАДОН», был смонтирован и успешно испытан на растворах, имитирующих концентраты низкоактивных радиоактивных отходов (НАО). Однако заявленный производителем перечень работ по обслуживанию оборудования и периодичность их выполнения обусловили нецелесообразность применения роторно-пленочного концентратора при переработке растворов категории ВАО вследствие большого объема образующихся при этом отработанных дезактивирующих составов.

Горизонтальный кальцинатор разработки АО «ВНИИНМ» представлен на рис. 4. Эксперименты на имитаторах показали ненадежность отдельных узлов установки (нагревательных элементов, зубчатой передачи вращения реторты, графитовых уплотнительных элементов).



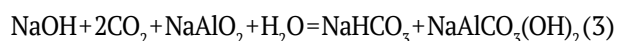
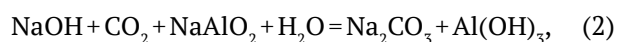
Рис. 4. Горизонтальный кальцинатор разработки АО «ВНИИНМ»

ИПХТ производства АО «ВНИИНМ» (рис. 3б) продемонстрировал работоспособность заложенных в его конструкцию технических решений. Однако уровень исполнения периферийных устройств (системы дозирования сред, слива стекла, управления стартовым режимом запуска тигля и генератора) оказался недостаточным для обеспечения устойчивой работы установки.

Значительный объем исследований был проведен в части создания технологий подготовки извлекаемых отходов к отверждению. Анализ химического и радиохимического составов раствора и плотного осадка из емкостей-хранилищ показал, что данные два продукта существенно отличаются друг от друга и есть основания

Позже прорабатывался также вариант выведения потока декантата на ЭП-500 в качестве Na-флюса с предварительным выведением SO_4^{2-} .

Процесс нейтрализации щелочного раствора методом карбонизации проходит в соответствии с реакциями:



Процесс карбонизации был проработан специалистами АО «Радиевый институт» и ФГУП «ПО «Маяк» на лабораторном уровне на модельных системах и продемонстрировал ряд преимуществ в сравнении с использованием азотной кислоты (отсутствие прироста объема раствора при нейтрализации и образования оксидов азота в результате окислительно-восстановительных реакций с компонентами ВАО, формирование более плотного и легко фильтруемого осадка) [10]. Однако вследствие технических сложностей, связанных с обеспечением достаточного количества углекислого газа для процесса, а также зарастания осадками распределительного устройства, опытно-промышленная проверка данного метода проведена не была и развития он не получил [11].

Другой вариант нейтрализации (классический), с использованием растворов азотной кислоты, был проработан специалистами ФГУП «ПО «Маяк» [12]. Он был опробован как в лабораторном, так и в опытно-промышленном (вплоть до переработки примерно 400 м^3 в ходе испытаний в 2011–2019 гг.) масштабе на модельных и реальных растворах.

ИХ ДВО РАН была разработана технологическая схема подготовки растворов НВАО к отверждению, основанная на выведении алюминия из осветленной фазы в гидротермальных условиях в форме кристаллических алюмосиликатов и проверенная на лабораторном оборудовании на модельных системах [13].

Выполненная работа представляла несомненный научный интерес, но результаты не были использованы в итоговой схеме подготовки осветленной фазы к отверждению, в частности, из-за высокой температуры (примерно 250°C) и давления (десятки атмосфер), реализуемых в реакционном объеме установки, что вызывает определенные опасения при реализации в промышленном масштабе.

Другим важным технологическим переделом при подготовке осветленной фазы к отверждению является фильтрационное отделение частиц гидроксидов алюминия, хрома, а также взвесей и коллоидов с ассоциированными

альфа-излучающими радионуклидами из нейтрализованного декантата. Для этой цели было предложено использовать керамические трубчатые (многоканальные) фильтры в установках тангенциальной фильтрации. Подобное решение позволяет провести глубокое концентрирование пульпы в режиме циркулирования без существенного снижения производительности при минимальном объеме промывных растворов. Наличие трубчатых (многоканальных) фильтров с размером пор фильтрующего слоя от 20 до 200 нм позволяет удалять из очищаемой жидкости коллоиды и псевдоколлоиды с ассоциированными альфа-излучающими радионуклидами, снижая таким образом активность фильтрата на несколько порядков. При этом керамические фильтры обладают высокой радиационной и химической устойчивостью, что обеспечивает длительный срок их службы даже при фильтрации растворов ВАО сложного химического состава. Указанное техническое решение не является уникальным, в частности на ФГУП «ПО «Маяк» подобные фильтры используются при переработке ЖРО на химико-металлургическом производстве и для удаления альфа-нуклидов из аммиачных маточных урановых растворов на заводе РТ-1.

Указанная технология применительно к накопленным ВАО была проработана как на лабораторной установке на модельных системах в 2011–2013 гг. [14], так и на опытном модуле на модельной (2014–2017 гг.) и реальной суспензиях нейтрализованного декантата (2018–2019 гг.). Лабораторная установка фильтрации представлена на рис. 6в.

Следует отметить, что опытный модуль был разработан специалистами ФГУП «ПО «Маяк» с учетом необходимости обеспечения дистанционного проведения процедуры смены фильтра. Указанное техническое решение было запатентовано [15]. Фильтрационный модуль опытной установки и внешний вид многоканальных керамических мембран представлен на рис. 6а и 6б.

Средняя производительность одного 19-канального фильтроэлемента (длиной 800 мм) при оптимальной гидравлической схеме циркуляционного контура составляет около $200 \text{ дм}^3/\text{ч}$. При нерациональной организации схемы (разнесении емкостей по разным каньонам, удлинении контура, увеличении перегибов и запорной арматуры) производительность снижается до $75 \text{ дм}^3/\text{ч}$.

Опыт проведенных испытаний показал безусловную работоспособность данной технологии. Указанный способ фильтрации обеспечивает снижение активности альфа-излучающих трансурановых радионуклидов в фильтрате на

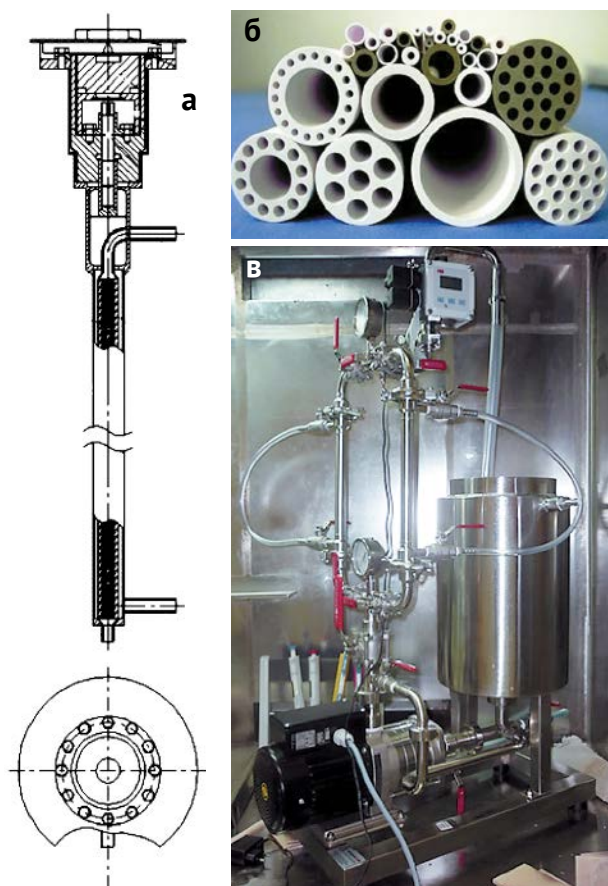


Рис. 6. Лабораторная установка фильтрации:
 а – фильтрационный модуль;
 б – внешний вид фильтрующих элементов;
 в – лабораторная установка фильтрации

два порядка. После его цементирования удельная активность компаунда не превышает значения в $1 \cdot 10^5$ Бк/кг, что позволяет отнести его к 3 классу РАО по постановлению [16].

Помимо удаления альфа-излучающих радионуклидов из основного потока жидкой фазы, подаваемой потом на цементирование, тангенциальная фильтрация суспензии нейтрализованного декантата позволяла концентрировать в минимальном объеме твердую фазу гидроксида алюминия и удалять из суспензии

растворимые натриевые соли (в том числе промывкой осадка при необходимости). Очищенная от растворимых солей сгущенная суспензия может быть передана на остекловывание и рассматриваться в качестве источника алюминия взамен реагентного.

Для обеспечения возможности направления нейтрализованного декантата, содержащего значительные концентрации сульфат- и хроматионов, на остекловывание (один из возможных вариантов схемы распределения потоков) прорабатывался вариант осадительного выведения данных компонентов в виде малорастворимых солей бария [17]. В лабораторных условиях были получены приемлемые результаты [18].

Для снижения активности радионуклидов цезия в растворе и перевода его в категорию САО было предложено использовать сорбцию цезия из нейтрализованного раствора на широко используемом ФГУП «ПО «Маяк» композитном ферроцианидном сорбенте марки ФС-10 (условная формула $KCu_{1,3}Fe(CN)_6 \cdot 6SiO_2 \cdot 6H_2O$). Процесс был испытан в лабораторном масштабе на модельных и реальных растворах. Достигнут коэффициент очистки по цезию на уровне 10^6 , подтверждена устойчивая работа сорбента в повторяющихся циклах [19].

Полученные результаты убедительно продемонстрировали возможность получения очищенного раствора, при отверждении которого методом цементирования компаунд будет соответствовать 3 классу РАО.

Результатом работ 2008–2011 гг. стала технологическая схема, которая включала в себя стадии нейтрализации, ультрафильтрационного концентрирования и промывки образованных гидроксидных осадков, осадительного выведения серы и хрома в виде малорастворимых соединений бария, сорбционного выделения цезия из нейтрализованного раствора на ферроцианидных сорбентах, а также отверждение всех образующихся конечных продуктов в алюмофосфатное стекло либо в цемент [20] (рис. 7).

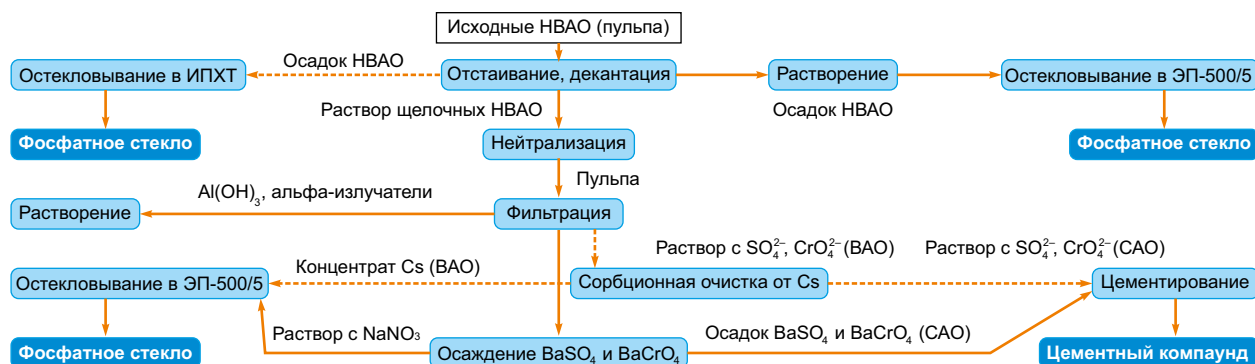


Рис. 7. Технологическая схема подготовки НБАО к отверждению с разделением потоков (вариант 2012 г.)

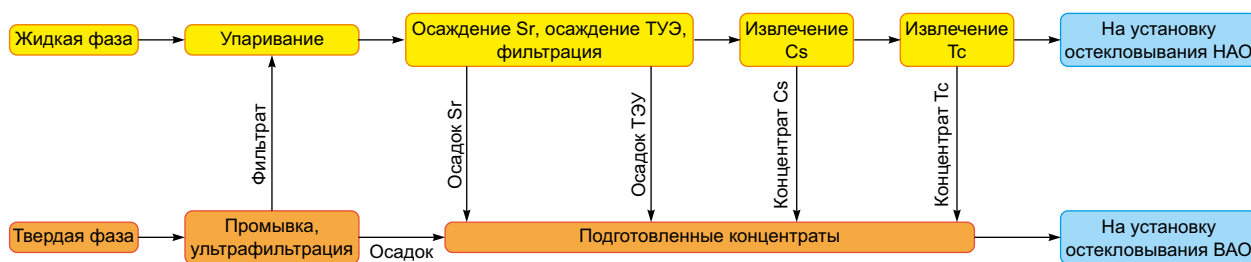


Рис. 8. Технологическая схема подготовки ЖРО к отверждению на заводе ВТР

Предложенная модель была многовариантной и позволяла организовать работу в зависимости от состава перерабатываемых отходов и степени загрузки комплексов остекловывания и цементирования, причем остекловывание планировалось проводить как в плавителе типа «холодный тигель», так и в электропечах типа ЭП-500. Она была принята в качестве базовой, что в 2012 году нашло отражение в проектной документации на опытно-промышленную установку, подготовленной в рамках выполнения ФГУП «ПО «Маяк» государственного контракта.

Следует отметить, что разработанная многостадийная схема во многом схожа (по набору технологических методов переработки ЖРО и логике выстраивания технологической цепочки) со схемой подготовки ЖРО к отверждению на заводе ВТР в Хэнфорде (рис. 8).

Однако в итоге предложенный вариант переработки оказался достаточно сложным в реализации и имел «узкие места». Практика показала, что сравнительно просто реализуемый в лабораторных условиях процесс нейтрализации декантата с выделением $Al(OH)_3$ становится крайне трудным при исполнении в промышленных объемах, особенно с учетом отсутствия на производстве специализированного оборудования, позволяющего обеспечить попадание на финальном участке процесса в требуемый узкий диапазон значений pH от 6 до 8 (обусловлено устойчивостью гидроксида алюминия) при условии значительных неопределенностей аналитического детектирования компонентов в ВАО и необходимости поддержания приемлемой производительности технологического передела. Кроме того, при проведении испытаний в опытном масштабе на реальных растворах было установлено, что возникают проблемы в части обращения с образующимися вторичными РАО — плотными барийсодержащими осадками, которые сложно выдавать из аппаратов и транспортировать по коммуникациям.

В дальнейшем сотрудниками предприятия совместно с рядом научно-исследовательских организаций (ИФХЭ РАН, ИХ ДВО РАН, АО «Радиовый институт» и других) были продолжены

разработки отдельных стадий технологии переработки НВАО, направленные на упрощение схемы и повышение ее гибкости как с точки зрения варьирования параметров перерабатываемых ВАО, так и использования различных установок отверждения [21].

По технологической схеме подготовки к отверждению осветленной фазы ВАО прорабатывались следующие варианты:

- фильтрационное удаление альфа-излучающих нуклидов с последующим сорбционным выделением цезия непосредственно из щелочного раствора с использованием, например, резорцин-формальдегидного сорбента (РФС) многократного действия [22] либо неорганических ионообменников однократного действия [23];
- экстракционное выделение цезия и альфа-излучателей также из щелочного раствора с применением каликсаренов в смеси с экстрагентами других классов [24];
- сорбционное удаление сульфатов и хроматов на силикотитанате бария, синтезированном в ИХ ДВО РАН.

Для извлечения цезия из щелочных ВАО сорбционным методом рассматривались различные типы сорбентов РФС разных производителей (АО «Аксион-РДМ», ООО ПО «ТОКЕМ», ИХ ДВО РАН), а также неорганический сорбент зарубежного производства (LEMER PAX Innovative, Франция) марки Клевасол (Clevasol).

РФС марки Axionit RCs-4 производства российской компании АО «Аксион-РДМ» обладает высокими сорбционными характеристиками по отношению к цезию. Сорбент может быть использован в режиме повторяющихся циклов «сорбция — десорбция». К недостаткам РФС относятся их относительно низкая радиационная и химическая устойчивость. Коэффициент очистки от цезия в экспериментах на модельных растворах составлял от 10^2 до 10^3 , на реальном декантате, разбавленном в 10 раз, — от 10^5 до 10^4 [25].

Испытания сорбента Клевасол на реальных ВАО [23] показали, что его эффективный фильтроцикл составляет примерно 100 колоночных объемов (к. о.). Объемная активность ^{137}Cs в фильтратах снижается с 10^{10} до 10^5 Бк/дм³.

Сорбент продемонстрировал высокую термическую и радиационную устойчивость. Установлено, что может быть проведена эффективная десорбция цезия с сорбента, но его сорбционные свойства на втором цикле резко снижаются, что характеризует его как материал однократного действия.

Многообещающими экстрагентами для выделения радионуклидов из щелочных сред являются гидроксикаликс[*n*]арены, обладающие сравнительно высокой химической и радиационной устойчивостью. В ходе статических испытаний экстракционной системы на базе пара-изононилкаликс[6]арена (ИН6) на реальных щелочных ВАО коэффициенты очистки от ^{137}Cs и бета-излучающих нуклидов составили до $1,5 \cdot 10^4$, а от альфа-излучателей — до 10^2 . Проведены динамические испытания в противоточном режиме с использованием модельных щелочных ВАО. Был достигнут коэффициент очистки рафината от ^{137}Cs — более $5 \cdot 10^2$ при 10-кратном концентрировании его в реэкстракте [26]. Результаты испытаний подтвердили принципиальную возможность использования экстрагента на основе ИН6 для переработки щелочных ВАО ФГУП «ПО «Маяк».

Указанные подходы проверены опытом использования за рубежом. Так, карбокси-фенолформальдегидная смола торговой марки Duolite CS-100 (производства США) в 1992 году была применена для переработки реальных низкоактивных (по классификации США) ЖРО резервуаров Хэнфордского комплекса (Hanford Site US DOE, США). В 1995 году представителями Savannah River Site (US DOE, США) были запатентованы РФС, которые были проверены на предмет переработки щелочных ЖРО данной площадки [27]–[29]. Кроме того, в Savannah River Site в промышленном масштабе работает схема по экстракционному извлечению цезия из щелочных ЖРО с помощью каликсаренов (переработано несколько десятков тысяч м^3 отходов) [30]. На обеих упомянутых площадках размещены РАО, близкие по истории образования и химическому составу к отходам в емкостях-хранилищах НВАО нашего предприятия.

В 2004 году было выполнено несколько экспериментов по отверждению реальной осветленной фазы НВАО в цементные и шлакоцементные компаунды, содержащие в качестве сорбционного материала бентонит и каолин, подтвердивших принципиальную возможность получения кондиционного компаунда [8]. Исследованные цементные составы позволили прочно зафиксировать цезий. Скорость выщелачивания ^{137}Cs даже в начальный момент времени не превышала значений 10^{-5} г/($\text{см}^2 \cdot \text{сут}$), а

в установившемся режиме составляла порядка 10^{-5} г/($\text{см}^2 \cdot \text{сут}$). За время испытаний в среду выщелачивания перешло от 0,3% до 2,1% цезия. По итогам 90-суточного выщелачивания образцы потеряли в среднем от 3,8% до 4,4% от исходной массы.

Однако опробованные рецептуры не были оптимизированы с точки зрения степени включения компонентов отходов (данная величина не превысила 13% по массе), реологических свойств (растекаемости смеси) и тепловыделения при твердении. Последние два показателя крайне важны в случае рассмотрения варианта размещения компаунда наливом в отсеки большого объема (300 м^3) комплекса цементирования САО [31], [32]. По этой причине данный опыт следует рассматривать только как начальный уровень проработки, требующий дальнейшего расширения.

Что касается технологии обращения с высокоактивными осадками, то в связи с отсутствием возможности размещения пульпоподъемного оборудования разработки ФГУП «ГХК» на перекрытиях емкостей-хранилищ, о чем упомянуто выше, специалистами ФГУП «ПО «Маяк» было найдено альтернативное решение.

Предложено использовать для извлечения осветленной фазы и подвижной части пульпообразных высокоактивных отходов имеющиеся технологические отверстия (проходки), например, под контрольно-измерительные приборы [11], [33]. Общий вид системы разгрузки емкости-хранилища и биологическая защита отрезка линии выдачи ЖРО представлены на рис. 9.

После удаления прибора в проходку опускается труба на необходимую глубину и за счет воздействия внешнего побудителя (например, создания разряжения в трубе) производится откачка жидких ВАО. Вновь проложенные линии трубопровода, проходящие за пределами существующего контура биологической защиты емкости-хранилища, экранируются локальной легковозводимой биологической защитой для предотвращения превышения дозовой нагрузки на персонал (рис. 10).

Малые сечения опускной трубы и вновь проложенной линии трубопровода обуславливают небольшой объем (слой свинца от 45 до 55 мм) и массу дополнительной биологической защиты (приблизительно 6 т), что позволяет выполнить опорожнение емкости с минимальными издержками, без проведения специальной диагностики состояния строительных конструкций и выполнения работ по их усилению. Накопленные извлеченных жидких ВАО в промежуточной емкости с последующим возвратом их в

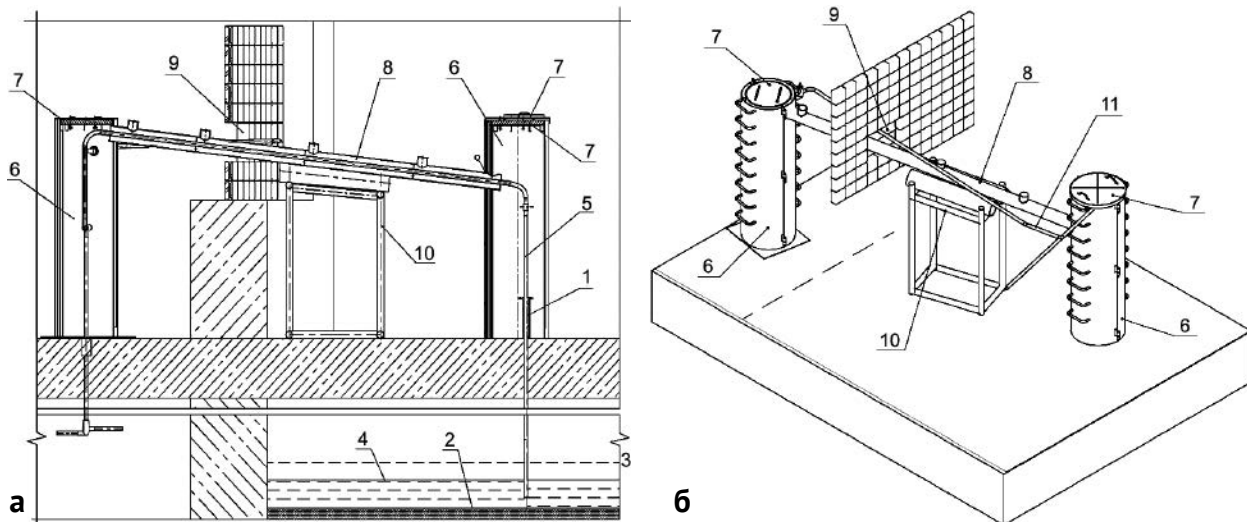


Рис. 9. Общий вид системы разгрузки емкости-хранилища (а) и биологическая защита отрезка линии выдачи ЖРО, расположенного вне емкости (б):

- 1 – технологическое отверстие для размещения термометра, 2 – слой плотного осадка на дне, 3 – уровень декантации емкости, 4 – подвижная часть ЖРО, 5 – линия трубопровода за пределами существующего контура биологической защиты, 6 – цилиндрический разъемный защитный кожух, 7 – крышка кожуха, 8 – защитный цилиндрический лоток, 9 – проем в стене, 10 – опорная конструкция, 11 – линия подачи воды для промывки тракта

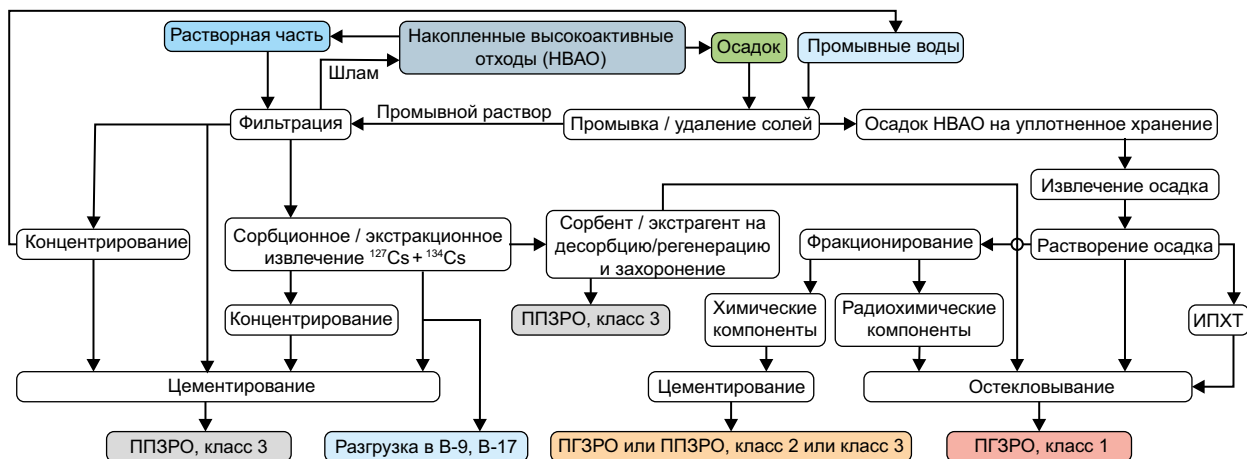


Рис. 10. Технологическая схема подготовки НВАО к отверждению с разделением потоков (вариант 2022 г.)

емкость-хранилище на поверхность слоя осадка, вероятно, позволит осуществить постепенную размывку основной его части путем многократной циркуляции раствора. Собранный в донной части промежуточной емкости слой извлеченного осадка должен периодически выводиться на последующие стадии переработки ВАО. Использование жидких ВАО в качестве рабочей среды для размывки осадка позволит минимизировать объем вторичных отходов при опорожнении емкости-хранилища. Для дополнительного растворения наиболее плотных слоев осадка можно использовать на финальной стадии процесса низкосолевые конденсаты.

Разработанная система разгрузки позволила извлечь в 2019 году из емкости-хранилища

200 м³ жидких ВАО, находившихся ниже уровня декантации штатной системы.

По-прежнему предусматривалась возможность отверждения их труднорастворимой части (а также осадков, содержащих высокое количество критических компонентов для остекловывания в печи джоулеа нагрева) в холодном тигле в алюмофосфатное стекло [34], хотя после 2016 года работы по испытанию ИПХТ на предприятии были заморожены и расчет делался на доведение данного устройства до нужной степени готовности другими организациями (АО «ВНИИНМ», АО «Радиевый институт», ФГУП «ГХК», АО «СХК»).

Прорабатывался также вариант извлечения из растворенных осадков урана, америция и плутония с использованием твердофазных

экстрагентов для последующего остекловывания и дальнейшего цементирования очищенных (до уровня САО) растворов, содержащих основную массу «проблемных» для данного процесса стабильных элементов (Fe, Cr, Ni, S и т. д.) [35], [36]. Полученные результаты показали возможность их удаления из раствора с

коэффициентом очистки порядка 10^2 . Однако отсутствие коммерчески доступных твердофазных экстрагентов не позволило направить данную работу в технологическую плоскость.

Сводная информация по результатам испытаний отдельных стадий процесса переработки НВАО приведена в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний отдельных стадий переработки НВАО

Стадия	Лабораторная проверка		Опытная проверка	
	На моделях	На реальном продукте	На моделях	На реальном продукте
«Размыв» осадков пульпоподъемным оборудованием ФГУП «ГХК»	-	-	Успешно	-
Отбор ЖРО оборудованием ФГУП «ПО «Маяк»	-	-	-	Успешно (200 м ³ в 2019 году)
Растворение, промывка осадков	Успешно	Успешно	-	-
Нейтрализация декантата HNO ₃	Успешно	Успешно	Успешно	Есть сложности технического плана (примерно 400 м ³ в 2011–2019 гг.)
Нейтрализация декантата CO ₂	Успешно	-	-	-
Гидротермальная обработка декантата	Успешно	-	-	-
Фильтрационное сгущение гидроксидных пульп	Успешно (2011–2013 гг.)	Спорные результаты	Успешно (2014–2017 гг.)	Успешно (2018–2019 гг.), сложности в привязке к существующим коммуникациям
Осадительное выведение сульфатов и хроматов	Успешно	Спорные результаты	-	Спорные результаты
Сорбционное выведение сульфатов и хроматов	Успешно	Спорные результаты	-	-
Сорбция Cs на ФС-10 из нейтрализованного декантата	Успешно	Успешно	-	Имеется положительный опыт на схожих продуктах ФГУП «ПО «Маяк»
Сорбция Cs на РФС из щелочного декантата	Успешно	Успешно, мало экспериментов	-	Имеется положительный опыт на схожих продуктах в Саванна Ривер, Хэнфорде
Сорбция Cs на Клевасоле из щелочного декантата	Успешно	Успешно	-	Успешно (5 дм ³ в 2018 году)
Экстракция Cs и альфа-нуклидов каликсаренами	Успешно	Успешно	Успешно (10 дм ³ в 2019 году)	Имеется положительный опыт на схожих продуктах в Саванна Ривер
Выделение Am, Pu, U из растворенного осадка при помощи ТВЭКС	Успешно	-	-	-
Выделение Cs из растворенного осадка на ФС-10	Успешно	-	-	-
Выделение Cs и Sr из растворенного осадка на ХДК	Успешно	-	-	-
Отверждение декантата в керамикрит	Успешно (образцы от 2 см ³ до 20 дм ³)	Успешно (образцы 2 см ³)	Спорные результаты (образцы 200 дм ³)	-
Цементирование декантата	Успешно (8 см ³ образцы, 2014 г.)	Успешно (8 см ³ образцы, 2014 г.)	-	-
Концентрирование в РПК	-	-	Спорные результаты	-
Кальцинация в горизонтальном кальцинаторе	-	-	Спорные результаты	-
Остекловывание в ИПХТ	Успешно	-	Спорные результаты	-
Прямое остекловывание раствора и пульпы с ограниченным включением	Успешно	-	-	Успешно (примерно 588 м ³ , 2003–2019 гг.)
Прямое остекловывание пульпы с повышенным включением	Спорные результаты (2010 г., 2014 г.)	-	-	-

Заключение

Анализ работ, выполненных по данному направлению, и заложенных в проект технических решений показывает, что по ряду технологических стадий данной схемы далеко не все научно-технические вопросы решены в полном объеме.

Специалистами ФГУП «ПО «Маяк» создана в 2021–2022 гг. комплексная схема, включающая технологические варианты извлечения и переработки растворной и осадочной части ВАО сложного химического состава (рис. 10).

Указанная схема (как отдельные элементы, так и их взаимосвязь) будет протестирована в рамках выполнения в 2022–2024 гг. заключенного между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «ПО «Маяк» государственного контракта от 04.04.2022 № Н.4д.241.20.22.1057 «Разработка и обоснование вариантов переработки высокоактивных отходов сложного химического состава, включая опытно-конструкторские работы и опытно-промышленные испытания оборудования». По полученным результатам будут определены наиболее перспективные варианты для дальнейшей реализации.

Материал подготовлен в рамках договора от 04.04.2022 № Н.4д.241.20.22.1057 на выполнение государственного контракта «Разработка и обоснование вариантов переработки высокоактивных отходов сложного химического состава, включая опытно-конструкторские работы и опытно-промышленные испытания оборудования».

Литература

1. Логунов М. В., Карпов В. И., Тананаев И. Г. Стабилизация теплофизического состояния и обследование некоторых емкостей-хранилищ высокоактивных пульп на ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4 (64). С. 18–27.
2. Логунов М. В., Карпов В. И., Дружинина Н. Е., Тананаев И. Г. Подходы к переработке высокоактивных пульп, накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1 (61). С. 15–28.
3. Goel A., McCloy J. S., Pokorny R., Kruger A. A. Challenges with vitrification of Hanford High-Level Waste (HLW) to borosilicate glass — An overview // Journal of Non-Crystalline Solids: X. 2019. Vol. 4. P. 100033. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100033.
4. В Хэнфордском комплексе начался разогрев печи для витрификации РАО. — URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/10/13/129215> (дата обращения: 20.10.2022).
5. Колупаев Д. Н., Слюнчев О. М., Винокуров С. Е., Куликова С. А. и др. Кондиционирование жидких среднеактивных отходов сложного химического состава с использованием низкотемпературной фосфатной матрицы // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 1 (89). С. 3–11.
6. Слюнчев О. М., Козлов П. В., Бобров П. А., Зарипов А. Р., Галузин Д. Д., Ровный С. И. Изучение возможности отверждения различных видов ЖРО в низкотемпературную фосфатную матрицу и исследование влияния иммобилизуемых отходов на ее фазовый состав // Пятая Российская конференция по радиохимии. Радиохимия-2006: Тезисы докладов. Дубна, 23–27 октября 2006 г. — Озерск: ФГУП «ПО «Маяк», 2006. — С. 234–235.
7. Slyuntchev O. M., Rovny S. I., Kozlov P. V. Research of possibility of liquid radioactive wastes immobilization into low-temperature phosphate matrix and influence of immobilized wastes composition on its phase composition // Oral Abstracts, Alternative Materials for radioactive waste stabilization and nuclear materials containment, 25–29 March 2007. — Il Ciocco Hotel and Conference Center, Barga, Italy, 2007.
8. Слюнчев О. М., Козлов П. В., Медведев Г. М., Ровный С. И. Иммобилизация в цементную матрицу высокоактивных цезийсодержащих отходов // Пятая Российская конференция по радиохимии. Радиохимия-2006: Тезисы докладов. Дубна, 23–27 октября 2006 г. — Озерск: ФГУП «ПО «Маяк», 2006. — С. 255.
9. НП-019-2015. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности.
10. Козлов П. В., Ремизов М. Б. и др. Влияние параметров нейтрализации осветленной фазы емкостей-хранилищ накопленных ВАО на свойства образующихся суспензий. Часть 2. Карбонизация // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 2 (66). С. 49–59.
11. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Макаровский Р. А. и др. Основные подходы, опыт и проблемы переработки накопленных в емкостях жидких радиоактивных отходов сложного химического состава // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 55–66.
12. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Дементьева И. И., Павлова Н. М. Влияние параметров нейтрализации осветленной фазы емкостей-хранилищ накопленных ВАО на свойства образующихся суспензий. Часть 1. Кислотная нейтрализация // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 1 (65). С. 61–72.
13. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Казадаев А. А. и др. Гидротермальное выведение алюминия из растворов емкостей-хранилищ ПО «Маяк» // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 3. С. 154–162.

14. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Дементьева И. И. Изучение процессов промывки осадков от нейтрализации декантата емкостей-хранилищ ВАО // Вопросы радиационной безопасности. 2013. № 1 (69). С. 44—55.
15. Устройство для фильтрации жидких радиоактивных отходов, приспособленное для дистанционного обслуживания : пат. RU 154344 U1 Российская Федерация, G21G 4/00 (2006.01) / Козлов П. В., Чермных А. А., Шалашов В. А., Ремизов М. Б., Макаровский Р. А., Кустов С. В., Светлаков В. В. ; патентообладатель ФГУП «ПО «Маяк». — № 2014146077/07 ; заявл. 17.11.2014 ; опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
16. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов: Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2012. № 44. Ст. 6017.
17. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Логунов М. В., Колтышев В. К. Варианты реализации технологии предварительной подготовки осветленной фазы емкостей-хранилищ накопленных ВАО к отверждению // Вопросы радиационной безопасности. 2013. № 2 (70). С. 34—47.
18. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Павлова Н. М., Алой А. С. Выведение серы и хрома из осветленной фазы емкостей-хранилищ ВАО перед остекловыванием // Химическая технология. 2012. Т. 13. № 12. С. 748—757.
19. Козлов П. В., Казадаев А. А., Макаровский Р. А., Ремизов М. Б., Вербицкий К. В., Логунов М. В. Разработка технологии извлечения цезия из осветленной фазы емкостей-хранилищ ВАО ФГУП «ПО «Маяк» на ферроцианидном сорбенте // Радиохимия. 2016. Т. 58. № 3. С. 255—260.
20. Баторшин Г. Ш., Ремизов М. Б., Козлов П. В., Логунов М. В., Кустов С. В. Технология переработки ядерного наследия ФГУП «ПО «Маяк» — накопленных высокоактивных гетерогенных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2015. № 1 (77). С. 3—10.
21. Ремизов М. Б., Макаровский Р. А., Беланова Е. А., Казадаев А. А., Козлов П. В., Дементьева И. И., Дубровин Е. Н. Исследование свойств фосфатных стекол с повышенным содержанием оксидов хрома, железа, никеля и серы от отверждения ВАО сложного состава // Материалы II Международной научно-технической конференции, 10—14 ноября 2014 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 254 с. — С. 42—46.
22. Милютин В. В., Зеленин П. Г., Козлов П. В. и др. Сорбция цезия из щелочных растворов на резорцинформальдегидных сорбентах // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 6. С. 507—511. DOI: 10.1134/S003383111906011X.
23. Слюнчев О. М., Истомина Н. М., Старовойтов Н. П. и др. Исследование возможности переработки отходов «ядерного наследия» с использованием сорбента Clevasol // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 3 (99). С. 7—15.
24. Ивенская Н. М., Степанова Е. С., Логунов М. В., Смирнов И. В. Экстракция долгоживущих радионуклидов из щелочных высокоактивных отходов п-алкилкаликс[8]ареном // Радиохимия. 2018. Т. 60. № 4. С. 325—331.
25. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Логунов М. В., Милютин В. В., Егорин А. М., Авраменко В. А. Сорбционное извлечение цезия из модельных щелочных ВАО на резорцинформальдегидных смолах отечественного производства // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1 (85). С. 34—41.
26. Smirnov I. V., Karavan M. D., Istomina N. M. et al. Hydroxycalix[6]arenes with p-isononyl substituents for alkaline HLW processing // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. Vol. 326. Pp. 675—681. DOI: 10.1007/s10967-020-07325-z.
27. Hubler T. L., Franz J. A., Shaw W. J., Bryan S. A. et al. Synthesis, Structural Characterization, and Performance Evaluation of Resorcinol-Formaldehyde (R-F) Ion-Exchange Resin. Pacific Northwest Laboratory Rich land. — Washington, 1995.
28. Duignan M., Nash Ch. Removal of Cesium from Savannah River Site Waste with Spherical Resorcinol Formaldehyde Ion Exchange Resin: Experimental Tests // Separation Science and Technology. 2010. Vol. 45. Issue 12—13. Pp. 1828—1840. DOI:10.1080/01496395.2010.493105.
29. Hassan N. M., Adu-Wusu K. Cesium removal from Hanford Tank waste solution using resorcinol-formaldehyde resin // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2005. Vol. 23. No. 3. Pp. 375—389. DOI: 10.1081/SEI-200056519.
30. Moyer B. A., Birdwell J. F., Bonnesen P. V., Deltau L. H. Use of Macrocycles in Nuclear-Waste Cleanup: A Real-World Application of a Calixcrown in Technology for the Separation of Cesium. In book: Macrocyclic Chemistry: Current Trends and Future Perspectives. — Dordrecht, Springer, 2005. Pp. 383—405. DOI: 10.1007/1-4020-3687-6_24.
31. Понькин Е. И., Козлов П. В., Слюнчев О. М., Кирьянов К. В. Результаты численного моделирования разогрева отсека хранилища среднеактивных отходов в ходе заполнения цементным компаундом // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4 (64). С. 11—17.

32. Слюнчев О. М., Ремизова В. А., Бобров П. А., Козлов П. В. Разработка составов для цементирования жидких радиоактивных отходов в отсеках большого объема // Цемент и его применение. 2022. № 2. С. 52–57.
33. Способ извлечения жидких высокоактивных отходов из емкостей-хранилищ : пат. RU 2686836 С1 Российская Федерация. G21F9/00 / Козлов П. В., Кустов С. В., Мирошниченко А. А., Свирипов В. С., Зубриловский Е. Н. ; патентообладатель ФГУП «ПО «Маяк». — № 2018129679 ; заявл. 15.08.2018 ; опубл. 06.05.2019. Бюл. № 13.
34. Ремизов М. Б., Козлов П. В., Логунов М. В. и др. Концептуальные и технические решения по созданию на ПО «Маяк» установок остекловывания текущих и накопленных жидких ВАО // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 3 (75). С. 17–25.
35. Истомина Н. М., Козлов П. В., Усолкин А. Н., Дворянчикова Е. М. Сравнение эффективности извлечения америция и плутония на твердофазных экстрагентах ТОДГА, DN Resin-B и TEVA Resin-B из модельных пульп накопленных высокоактивных отходов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 2. С. 155–164. DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9220.
36. Баулин В. Е., Баулин Д. В., Усолкин А. Н. и др. Экстракционно-хроматографическое выделение неодима из азотнокислых растворов с применением сорбентов, импрегнированных N,N,N',N'-тетраоктилдигликольамидом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 5. С. 717–725. DOI: 10.17308/sorpchrom.2018.18/598.

Информация об авторах

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: kozlov_pavel@inbox.ru.

Логунов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, советник генерального директора, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: mvlogunov@romayak.ru.

Ремизов Михаил Борисович, кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: mirem@yandex.ru.

Шайдуллин Сергей Минуллоевич, инженер-технолог лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Лукин Сергей Александрович, заместитель начальника Центральной заводской лаборатории по науке и технологии, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: lukin235@yandex.ru.

Зубриловский Евгений Николаевич, заместитель директора радиохимического завода по обращению с РАО — начальник участка цементирования жидких и гетерогенных САО, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: zubrilov2007@yandex.ru.

Библиографическое описание статьи

Козлов П. В., Логунов М. В., Ремизов М. Б., Шайдуллин С. М., Лукин С. А., Зубриловский Е. Н. Ретроспективный анализ разработки технологий переработки накопленных ВАО радиохимического производства ФГУП «ПО «Маяк» // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 14–33. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF ADVANCEMENTS IN THE PROCESSING OF ACCUMULATED HLW GENERATED BY PA MAYAK'S RADIOCHEMICAL PRODUCTION FACILITIES

Kozlov P. V., Logunov M. V., Remizov M. B., Shaidullin S. M., Lukin S. A., Zubrilovsky E. N.

FSUE "PA "Mayak", Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

Article received on June 5, 2023

The article overviews the research implemented at PA Mayak from 1986 to 2021 to develop a method enabling the processing of heterogeneous alkaline HLW. It presents relevant flow charts developed under this research, the reasoning behind them and their evolution stages. The study reflects the broad spectrum of research performed and the scaling-up experience associated with the implemented experiments. The study demonstrates the need for further optimization of the flow chart adopted in the designs of a new vitrification complex to reduce the volume of generated solid Class 1 radioactive waste forms and to increase the processing capacity.

Keywords: storage tanks, high-level waste, sediments, microfiltration, neutralization, sorption, extraction, cementation, vitrification, induction melting in cold crucible, calciner, radioactive waste.

The study was performed under contract No. N.4d.241.20.22.1057 of April 4, 2022 for the implementation of the State Contract for the Development and Feasibility Study of Processing Methods Focused on High-Level Waste of Complex Chemical Composition, Including R&D and Pilot Testing of Equipment.

References

1. Logunov M. V., Karpov V. I., Tananayev I. G. Stabilizatsiya teplofizicheskogo sostoyaniya i ob sledovaniye nekotorykh yemkostey-khranilishch vysokoaktivnykh pul'p na FGUP «PO «Mayak» [Stabilization of Thermophysical State and Inspection of Several Storage Tanks for High-Level Pulps at FSUE MAYAK PA]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti – Radiation Safety Issues*, 2011, no. 4 (64), pp. 18–27.
2. Logunov M. V., Karpov V. I., Druzhinina N. E., Tananaev I. G. Podkhody k pererabotke vysokoaktivnykh pul'p, nakoplennykh na FGUP «PO «Mayak» [Approaches to High-Level Sludge Reprocessing Accumulated at MAYAK PA]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti – Radiation Safety Issues*, 2011, no. 1 (61), pp. 15–28.
3. Goel A., McCloy J. S., Pokorny R., Kruger A. A. Challenges with vitrification of Hanford High-Level Waste (HLW) to borosilicate glass – An overview. *Journal of Non-Crystalline Solids*: X, 2019, vol. 4, pp. 100033. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100033.
4. V Khehnfordskom komplekse nachalsya razogrev pechi dlya vitrifikatsii RAO [Hanford starts heating up the radioactive waste vitrification

furnace] — URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/10/13/129215> (accessed on: 20.10.2022).

5. Kolupaev D. N., Slyunchev O. M., Vinokurov S. E., Kulikova S. A. et al. Konditsionirovanie zhidkikh sredneaktivnykh otkhodov slozhnogo khimicheskogo sostava s ispol'zovaniem nizkotemperaturnoi fosfatnoi matritsy [Conditioning of Liquid Intermediate Level Wastes of Complex Chemical Composition Using Low-Temperature Phosphate Matrices]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti – Radiation Safety Issues*, 2018, no. 1 (89), pp. 3–11.

6. Slyunchev O. M., Kozlov P. V., Bobrov P. A., Zari-pov A. R., Galuzin D. D., Rovnyi S. I. Izuchenie voz-mozhnosti otverzheniya razlichnykh vidov ZHRO v nizkotemperaturnuyu fosfatnuyu matritsu i issle-dovanie vliyaniya immobilizuemykh otkhodov na ee fazovyi sostav [Study on the Prospects of Various LRW Type Solidification Based on Low-Temperature Phosphate Waste Form and the Effect Produced by Immobilized Waste on its Phase Composition]. *Fifth Russian Conference on Radiochemistry. Radiochemis-try-2006: Abstracts*. Dubna, October 23–27, 2006. — Ozersk, PA Mayak Publ., 2006, 354 p. Pp. 234–235.

7. Slyuntchev O. M., Rovny S. I., Kozlov P. V. Research of possibility of liquid radioactive wastes immobili-zation into low-temperature phosphate matrix and influence of immobilized wastes composition on its phase composition. *Oral Abstracts, Alternative Ma-terials for radioactive waste stabilization and nuclear materials containment*, 25–29 March 2007. — Il Ci-occo Hotel and Conference Center, Barga, Italy, 2007.
8. Slyunchev O. M., Kozlov P. V., Medvedev G. M., Rovnyi S. I. Immobilizatsiya v tsementnuyu matritsu vysokoaktivnykh tseziisoderzhashchikh otkhodov

- [Immobilization of High-Level Cesium-Containing Waste into Cement Waste Form]. *Fifth Russian Conference on Radiochemistry. Radiochemistry-2006: Abstracts*. Dubna, October 23–27, 2006. — Ozersk, PA Mayak Publ., 2006, 354 p. P. 255.
9. NP-019-2015. *Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Collection, Processing, Storage and Conditioning of Liquid Waste. Safety Requirements].
10. Kozlov P. V., Remizov M. B. et al. Vliyaniye parametrov neytralizatsii osvetlennoy fazy yemkostey-khranilishch nakoplennykh VAO na svoystva obrazuyushchikhsya suspenziy. Chast' 2. Karbonizatsiya [Effect of Neutralization Parameters of the Clarified Phase of Storage Tanks with Accumulated HLW on Properties of Resulted Suspension. Part II. Carbonization]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2012, no. 2 (66), pp. 49–59.
11. Kozlov P. V., Remizov M. B., Makarovskiy R. A. et al. Osnovnye podkhody, opyt i problemy pererabotki nakoplennykh v emkostyakh zhidkikh radioaktivnykh otkhodov slozhnogo khimicheskogo sostava [Basic Approaches, Experience and Problems Related to Reprocessing of Liquid Radioactive Waste of Complex Chemical Composition Accumulated in Storage Tanks]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 55–66.
12. Kozlov P. V., Remizov M. B., Dement'yeva I. I., Pavlova N. M. Vliyaniye parametrov neytralizatsii osvetlennoy fazy yemkostey-khranilishch nakoplennykh VAO na svoystva obrazuyushchikhsya suspenziy. Chast' 1. Kislotnaya neytralizatsiya [Effect of Neutralization Parameters of Clarified Phase in Storage Tanks for Accumulated HLW on Generated Suspensions Properties. Part I. Acid Neutralisation]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2012, no. 1 (65), pp. 61–72.
13. Kozlov P. V., Remizov M. B., Kazadayev A. A. et al. Gidrotermal'noe vyvedeniye alyuminiya iz rastvorov emkoste-khranilishch PO «Mayak» [Hydrothermal Removal of Aluminum from Solutions of Storage Tanks PA Mayak]. *Khimicheskaya tekhnologiya — Chemical Technology*, 2013, vol. 14, no. 3, pp. 154–162.
14. Kozlov P. V., Remizov M. B., Dement'eva I. I. Izuchenie protsessov promyvki osadkov ot neytralizatsii dekantata emkoste-khranilishch VAO [Study of Sediment Washing Processes Resulted from Neutralization of HLW Storage Tank Decantate]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2013, no. 1 (69), pp. 44–55.
15. *Ustroystvo dlya fil'tratsii zhidkikh radioaktivnykh otkhodov, prisposoblennoe dlya distantsionnogo obsluzhivaniya* [A filtering device for liquid radioactive waste modified for remote maintenance] Pat. RU No. 154344 U1 G21G4/00. Kozlov P. V., Chernykh A. A., Shalashov V. A., Remizov M. B., Makarovskiy R. A., Kustov S. V., Svetlakov V. V. Patentee FSUE “PA “Mayak”, No. 2014146077/07 ; application date 17.11.2014 ; publication date 20.08.2015. Bull. No. 23.
16. Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 “On Criteria Used to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, Criteria Used to Categorize Radioactive Waste as Non-Removable Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste and Criteria for Removable Radioactive Waste Classification”. (In Russian).
17. Kozlov P. V., Remizov M. B., Logunov M. V., Koltyshev V. K. Varianty realizatsii tekhnologii predvaritel'noy podgotovki osvetlennoy fazy yemkostey-khranilishch nakoplennykh VAO k otverzhdeniyu [Pre-Treatment Process Options of Clarified Phase from Historical HLW Storage Tanks for Further Solidification]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2013, no. 2 (70), pp. 34–47.
18. Kozlov P. V., Remizov M. B., Pavlova N. M., Aloy A. S. Vyvedeniye sery i khroma iz osvetlennoi fazy emkoste-khranilishch VAO pered osteklovyvaniem [Sulfur and Chromium Removal from the Clarified HLW Phase Held in Storage Tanks at the Pre-Vitrification Stage]. *Khimicheskaya tekhnologiya — Chemical Technology*, 2012, vol. 13, no. 12, pp. 748–757.
19. Kozlov P. V., Kazadaev A. A., Makarovskii R. A., Remizov M. B., Verbitskii K. V., Logunov M. V. Razrabotka tekhnologii izvlecheniya tseziya iz osvetlennoy fazy yemkostey-khranilishch VAO FGUP “PO “Mayak” na ferrotsianidnom sorbente [Development of a Process for Cesium Recovery from the Clarified Phase of High-Level Waste Storage Tanks of the Mayak Production Association with a Ferrocyanide Sorbent]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 295–301.
20. Batorshin G. Sh., Remizov M. B., Kozlov P. V., Logunov M. V., Kustov S. V. Tekhnologiya pererabotki yadernogo naslediya FGUP “PO “Mayak” — nakoplennykh vysokoaktivnykh geterogennykh otkhodov / [FSUE Mayak PA Nuclear Legacy Reprocessing Techniques: Reprocessing of Accumulated High-Level Heterogeneous Wastes]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2015, no. 1 (77), pp. 3–10.
21. Remizov M. B., Makarovskii R. A., Belanova E. A., Kazadaev A. A., Kozlov P. V., Dement'eva I. I., Dubrovin E. N. Issledovanie svoystv fosfatnykh stekol s povyshennym soderzhaniem oksidov khroma, zheleza, nikelya i sery ot otverzhdeniya VAO slozhnogo sostava [Study on the Properties of Phosphate Glasses with High Content of Chromium, Iron, Nickel and

- Sulfur Oxides Resulting From the Immobilization of HLW with Complex Composition]. *Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference*, November 10–14, 2014. — Yekaterinburg, The Publishing House of the Ural Federal University Publ., 2014, 254 p. Pp. 42–46.
22. Milyutin V. V., Zelenin P. G., Kozlov P. V. et al. Sorbtsiya tseziya iz shchelochnykh rastvorov na rezortsinformal'degidnykh sorbentakh [Sorption of Cesium from Alkaline Solutions on Resorcinol-Formaldehyde Sorbents]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2019, vol. 61, no. 6, pp. 714–718.
23. Slyunchev O. M., Istomina N. M., Starovoytov N. P. et al. Issledovaniye vozmozhnosti pererabotki otkhodov «yadernogo naslediya» s ispol'zovaniyem sorbenta Clevasol [Investigation of the Possibility of Nuclear Legacy Waste Reprocessing Using Clevasol Sorbent]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2020, no. 3 (99), pp. 7–15.
24. Ivenskaya N. M., Stepanova E. S., Logunov M. V., Smirnov I. V. Ekstraktsiya dolgozhivushchikh radionuklidov iz shchelochnykh vysokoaktivnykh otkhodov p-alkilikaliks[8]arenom [Extraction of Long-Lived Radionuclides from Alkaline High-Level Waste with P-alkylcalix[8]arene]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 378–385.
25. Kozlov P. V., Remizov M. B., Logunov M. V. et al. Sorbtsionnoye izvlecheniye tseziya iz model'nykh shchelochnykh VAO na rezortsinformal'degidnykh smolakh otechestvennogo proizvodstva [Sorption Extraction of Cesium from Model Alkaline HLW on Resorcinol-Formaldehyde Resins Produced in Russia]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2017, no. 1 (85), pp. 34–41.
26. Smirnov I. V., Karavan M. D., Istomina N. M. et al. Hydroxycalix[6]arenes with p-isononyl substituents for alkaline HLW processing. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, vol. 326, pp. 675–681. DOI: 10.1007/s10967-020-07325-z.
27. Hubler T. L., Franz J. A., Shaw W. J., Bryan S. A. et al. *Synthesis, Structural Characterization, and Performance Evaluation of Resorcinol-Formaldehyde (R-F) Ion-Exchange Resin*. Pacific Northwest Laboratory Rich land. — Washington, 1995.
28. Duignan M., Nash Ch. Removal of Cesium from Savannah River Site Waste with Spherical Resorcinol Formaldehyde Ion Exchange Resin: Experimental Tests. *Separation Science and Technology*, 2010, vol. 45, issue 12–13, pp. 1828–1840. DOI:10.1080/01496395.2010.493105.
29. Hassan N. M., Adu-Wusu K. Cesium removal from Hanford Tank waste solution using resorcinol-formaldehyde resin. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2005, vol. 23, no. 3, pp. 375–389. DOI: 10.1081/SEI-200056519.
30. Moyer B. A., Birdwell J. F., Bonnesen P. V., Delmau L. H. *Use of Macrocycles in Nuclear-Waste Cleanup: A Real-World Application of a Calixcrown in Technology for the Separation of Cesium*. In book: *Macrocyclic Chemistry: Current Trends and Future Perspectives*. — Dordrecht, Springer, 2005. Pp. 383–405. DOI: 10.1007/1-4020-3687-6_24.
31. Pon'kin E. I., Kozlov P. V., Slyunchev O. M., Kiryanov K. V. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya razogreva otseka khranilishcha sredneaktivnykh otkhodov v khode zapolneniya tsementnym kompaundom [Results of Numerical Simulation of Heating for Maw Storage Facility Compartment in the Course of Filling by Cement Compound]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2011, no. 4 (64), pp. 11–17.
32. Slyunchev O. M., Remizova V. A., Bobrov P. A., Kozlov P. V. Razrabotka sostavov dlya tsementirovaniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov v otsekakh bol'shogo ob'yema [Development of Compositions for Liquid Radioactive Waste Cementation in Large Volume Compartments]. *Tsement i yego primeneniye — Cement and its Applications*, 2022, no. 2, pp. 52–57.
33. Sposob izvlecheniya zhidkikh vysokoaktivnykh otkhodov iz emkoste-khranilishch [Method providing liquid high-level waste extraction from storage tanks]. Patent RU 2686836 C1 G21F9/00. Kozlov P. V., Kustov S. V., Miroshnichenko A. A., Svirepov V. S., Zubrilovskiy E. N. Patentee FSUE “PA “Mayak”, No. 2018129679 ; application date 15.08.2018 ; publication date 06.05.2019. Bull. No. 13.
34. Remizov M. B., Kozlov P. V., Logunov M. V. et al. Kontseptual'nyye i tekhnicheskiye resheniya po sozdaniyu na «PO «Mayak» ustanovok osteklovvaniya tekushchikh i nakoplennykh zhidkikh VAO [Conceptual and Technical Solutions Related to Creation of Facilities for Current and Accumulated HLW Vitrification at the MAYAK PA]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2014, no. 3 (75), pp. 17–25.
35. Istomina N. M., Kozlov P. V., Usolkin A. N., Dvoryanchikova E. M. Sravneniye effektivnosti izvlecheniya ameritsiya i plutoniya na tverdogaznykh ekstragentakh TODGA, DN Resin-B i TEVA Resin-B iz model'nykh pul'p nakoplennykh vysokoaktivnykh otkhodov [A Comparison of the Efficiency of Extraction of Americium and Plutonium on Solid-Phase Extractants TODGA, DN Resin-B, and TEVA Resin-B from Model Pulps of Accumulated Higher Activity Waste]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy — Sorption and Chromatographic Processes*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 155–164. DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9220.
36. Baulin V. E., Baulin D. V., Usolkin A. N. et al. Ekstraktsionno-khromatograficheskoye vydeleniye

neodima iz azotnokislykh rastvorov s primeneni-
eniyem sorbentov impregirovannykh N,N,N',N'-
tetraoktildiglikol'amidom [The Extraction-Chro-
matographic Separation of Neodymium from
Solution from Nitric Acid with Application of
Sorbents Impregnated by N,N,N',N'-Tetraoctyl-
diglicolamide]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie
protsessy — Sorption and Chromatographic Processes*,
2018, vol. 18, no. 5, pp. 717–725. DOI: 10.17308/
sorpchrom.2018.18/598.

Information about the authors

Kozlov Pavel Vasilyevich, PhD, Associate Professor, Head of the research laboratory for the treatment and conditioning of RAO Central Plant Laboratory, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kozlov_pavel@inbox.ru.

Logunov Mikhail Vasilyevich, PhD, Advisor to the General Director, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: mvlogunov@po-mayak.ru.

Remizov Mikhail Borisovich, PhD, Leading engineer of the laboratory for the treatment and conditioning of RAO Central Plant Laboratory, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: mirem@yandex.ru.

Shaidullin Sergey Minulloevich, process engineer of the laboratory for the treatment and conditioning of RAO of the Central Plant Laboratory, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Lukin Sergey Alexandrovich, Deputy Head of the Central Plant Laboratory for Science and Technology, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: lukin235@yandex.ru.

Zubrilovsky Evgeny Nikolaevich, Deputy Director of radiochemical plant for the treatment of raw materials — head of the cementing section of liquid and heterogeneous CAO, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: zubrilov2007@yandex.ru.

Bibliographic description

Kozlov P. V., Logunov M. V., Remizov M. B., Shaidullin S. M., Lukin S. A., Zubrilovsky E. N. Retrospective Analysis of Advancements in the Processing of Accumulated HLW Generated by PA Mayak’s Radiochemical Production Facilities. *Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 14–33. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33. (In Russian).