DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-63-74 УДК 621.039.73:542.61:546.42+546.36

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ВАО ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ АЭС И ОТВЕРЖДЕНИЯ КОРОТКОЖИВУЩЕЙ ЦЕЗИЙ-СТРОНЦИЕВОЙ ФРАКЦИИ С ПОЛУЧЕНИЕМ И ПАСПОРТИЗАЦИЕЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СТЕКЛОПОДОБНОГО КОМПАУНДА

А. И. Широков[1], Ю. А. Ворошилов[1], А. В. Конников[1], П. В. Козлов[1], Е. В. Поляков[1], Е. В. Чухланцева[1], С. А. Лукин[1], М. В. Логунов[1], В. П. Борисенко[1], С. М. Чадов[1], А. В. Шереметьев[2]

[1] **ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область**

[2] **АО «Техснабэкспорт», Москва**

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2026 г.

В рамках реализации нового продуктового направления «Сбалансированный ядерный топливный цикл» создан и испытан комплекс технологических решений по извлечению из высокоактивных отходов от переработки отработавшего ядерного топлива, а также очистке и отверждению концентрата короткоживущей цезий-стронциевой фракции. Работы выполнены на опытно-экспериментальной установке в цепочке «горячих» камер завода РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк». Методом динамической экстракции с использованием краун-эфиров проведено эффективное выделение цезий-стронциевой фракции. Осуществлена аффинажная сорбционная очистка реэкстракта цезия и стронция от минорных актинидов и других долгоживущих примесей. Разработан состав боросиликатного стекла, позволяющий надежно фиксировать цезий-стронциевую фракцию. Изготовлены опытные образцы высокоактивного стекла, содержащие ее различное количество. Разработан комплекс методик аналитического контроля, позволяющий обеспечить анализ состава концентрата короткоживущей фракции и последующую паспортизацию стеклоподобного компаунда. Подтверждено соответствие характеристик одного из опытных образцов всем требованиям продуктового направления «Сбалансированный ядерный топливный цикл», предполагающего исключение необходимости захоронения включающего короткоживущую фракцию компаунда в глубоких геологических формациях при его возврате зарубежному заказчику.

Ключевые слова: *сбалансированный ядерный топливный цикл, высокоактивные отходы, короткоживущая фракция, экстракция, краун-эфир, цезий, стронций, актиниды, боросиликатное стекло, контролируемые радионуклиды, радиоактивные отходы.*

Проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) атомных электростанций (АЭС) является одной из наиболее острых в атомной энергетике. Большинство стран пока придерживаются концепции отложенного решения по обращению с ОЯТ вследствие высоких финансовых затрат и технических сложностей при создании перерабатывающих производств и/или пунктов глубинного захоронения РАО (ПГЗРО), а также серьезных экологических рисков. При этом отсутствие на данный момент лицензированных объектов окончательной геологической изоляции ОЯТ в упомянутых странах приводит к неуклонному увеличению как

сроков временного хранения (ВХ), так и объемов размещенного в них топлива, что усугубляет проблему обеспечения безопасности (постепенная деградация собственно ОЯТ, старение инфраструктуры пунктов ВХ его и неопределенность в вариантах транспортировки ОЯТ после длительного хранения).

Существующая альтернативная практика по переработке ОЯТ на радиохимических заводах, в частности РТ-1 (Россия), предусматривает выделение и использование для производства нового топлива делящихся материалов (U, Pu), остекловывание образующихся высокоактивных отходов (ВАО), то есть перевод смеси радионуклидов и сопутствующих стабильных химических примесей в твердое состояние, временное контролируемое хранение стеклоблоков и последующую изоляцию практически вечно активной матрицы в глубинных геологических формациях.

Для ОЯТ зарубежного происхождения, в соответствии с законодательством Российской Федерации в области использования атомной энергии, после радиохимической переработки предусмотрен возврат остеклованных ВАО в страну — поставщика отработавшего топлива. Однако для ряда потенциальных заказчиков данных услуг такой вариант является малоприемлемым опять же из-за высоких затрат на строительство и содержание ПГЗРО, а также сложности выбора (обоснования) мест, удовлетворяющих требованиям к размещению отвержденных ВАО на захоронение.

В этой связи Государственной корпорацией «Росатом» и АО «Техснабэкспорт» предложено новое продуктовое направление «Сбалансированный ЯТЦ» (ПН СбЯТЦ). Данный вариант ориентирован на страны-потребители, в которых эксплуатируются и/или строятся АЭС по российским проектам (Белоруссия, Венгрия, Турция и др.), и предусматривает переработку ОЯТ с последующим фракционированием жидких радиоактивных отходов, то есть выделением из ВАО так называемой короткоживущей фракции (КФ) — радионуклидов (РН) цезия и стронция. После переработки предлагается осуществлять возврат радиоактивных отходов (РАО) поставщику ОЯТ в виде отвержденной КФ в количестве, эквивалентном активности ввезенного зарубежного топлива. Присутствие в составе стекла только КФ позволит получить более компактную матрицу, чем при включении всех продуктов деления и распада, а также исключить для заказчика необходимость создания ПГЗРО, при условии, что очистка КФ от долгоживущих радиоактивных примесей, таких как трансплутонивые элементы (ТПЭ), будет достаточно высока. После предварительной выдержки для распада значительной части РН цезия и стронция и снижения тепловыделения, предположительно можно будет захоронить стеклоподобный компаунд с КФ в приповерхностных или среднеглубинных (до 100 м) пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) на территории стран потенциальных потребителей. Это будет способствовать минимизации затрат на обращение с РАО и облегчит согласование создания пунктов захоронения с надзорными органами и общественностью.

Упрощенная блок-схема переработки ОЯТ с фракционированием ВАО представлена на рис .1. По экспертным оценкам АО «Техснабэкспорт», данный процесс позволит зарубежному заказчику сэкономить более 20 % средств на всем жизненном цикле обращения с ОЯТ в сравнении с открытым ЯТЦ, что делает ПН СбЯТЦ конкурентным на рынке таких услуг.

Рис. 1. Упрощенная блок-схема переработки ОЯТ с фракционированием ВАО

С целью обоснования их технической реализуемости, в рамках данного направления специалистами ФГУП «ПО «Маяк» был разработан и проверен комплекс технологий, включающий экстракционное выделение фракций Cs и Sr из ВАО, сорбционный аффинаж концентрата Cs и Sr от долгоживущих примесей, а также остекловывание полученного продукта с использованием боросиликатной матрицы. Кроме того, был разработан, аттестован и проверен комплекс аналитических методик для контроля состава КФ,

подтверждения характеристик и паспортизации опытных образцов стеклоподобного компаунда.

Основным показателем, определяющим соответствие наработанной КФ поставленной задаче (критериям ПН СбЯТЦ), является ее радиохимический состав. Сотрудниками ИБРАЭ РАН был определен перечень радиоэкологически опасных РН и оценены их предельно допустимые удельные активности в компаунде, исходя из моделирования базового сценария захоронения отвержденной КФ в приповерхностном ПЗРО (ППЗРО), описывающего эволюцию объекта захоронения и его радиационное воздействие на человека и окружающую среду. По мнению специалистов ИБРАЭ РАН, к контролируемым в ПН СбЯТЦ следует отнести РН, имеющие большие периоды полураспада и/или обладающие высокой миграционной способностью в биосфере Земли, — ^{14}C, ^{63}Ni, ^{93}Zr, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{126}Sn, ^{129}I, ^{135}Cs, ^{151}Sm, ^{234,235,238}U, ^{237}Np, $^{238\text{-}242}$Pu, ^{241,243}Am, ^{242m}Am, ^{245,246}Cm, целевые РН, определяющие активность КФ, — ^{90}Sr, ^{137}Cs. Кроме того, необходимо учитывать ^{134}Cs — для расчета тепловыделения, мощности эквивалентной дозы (МЭД) и активности стекломассы, а также ^{244}Cm — как репер для расчета удельной активности нуклидов ^{245,246}Cm.

Испытания комплекса технологий были проведены на опытной установке, расположенной в цепочке «горячих» камер радиохимического завода РТ 1.

Выделение фракции Sr-Cs из ВАО осуществляли методом экстракции в противоточном динамическом процессе на малогабаритных лабораторных экстракторах типа «смеситель — отстойник» с пульсационным перемешиванием фаз [1]. Аффинаж реэкстракта КФ проводили на лабораторной сорбционной колонке. Общий вид исследовательской установки в «горячей» камере представлен на рис. 2.

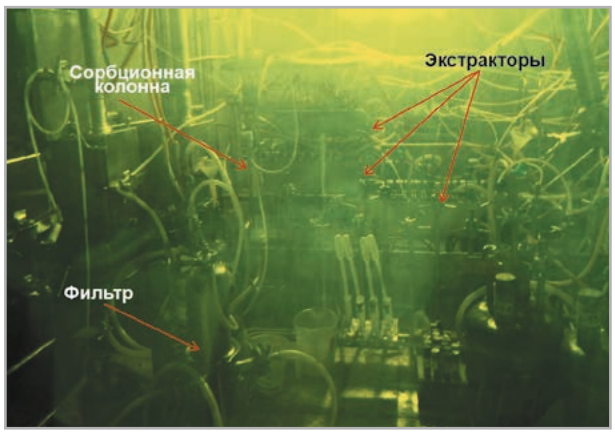


Рис. 2. Общий вид исследовательской установки в «горячей» камере

Исходным раствором для выделения КФ являлся упаренный рафинат от переработки ОЯТ реактора ВВЭР-1000 с выгоранием 43 ГВт·сут/тU и выдержкой 21 год. В качестве оборотного экстрагента использовали органическую смесь, содержащую 0,1 моль/дм^3 дициклогексил-18-краун-6 (ДЦГ 18-К-6) и 0,1 моль/дм^3 дибензо-21-краун-7 (ДБ-21-К-7) в «тяжелом» фторированном разбавителе — спирте-теломере n_3 (додекафторгептанол). Данные соединения являются относительно доступными и при необходимости могут быть синтезированы отечественным производителем в промышленном масштабе. Структурные формулы компонентов экстракционной смеси представлены на рис. 3.

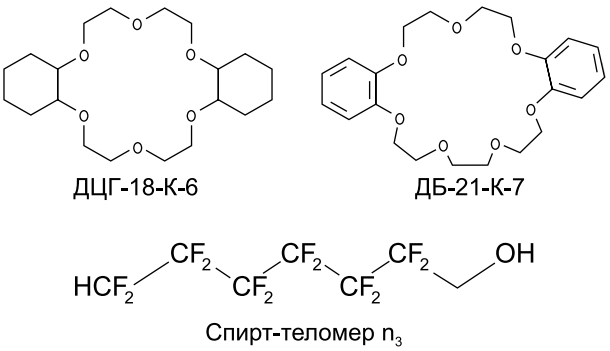


Рис. 3. Структурные формулы компонентов экстракционной смеси

Экстракционная смесь на основе ДЦГ-18-К-6 и ДБ-21-К-7, разработанная специалистами АО ВНИИХТ и ФГУП «ПО «Маяк» [2], позволяет селективно извлекать из кислых солевых высокоактивных растворов Sr и Cs с высокой степенью очистки от сопутствующих примесей. Разбавитель n_3 обеспечивает при контактах с водными средами достаточное удержание краун-эфиров и их комплексов с удаляемыми ионами в органической фазе. На облученных образцах данной экстракционной смеси показана хорошая радиолитическая устойчивость, стабильность химического состава и сохранение приемлемых экстракционных и физических свойств до поглощенной дозы 0,5 МГр. Значительным преимуществом данной системы является возможность проведения реэкстракции элементов дистиллированной водой. К особенностям используемой органической смеси относятся повышенные вязкость и поверхностное натяжение, что, с одной стороны, затрудняет хорошее замешивание эмульсии, а с другой — негативно влияет на скорость расслаивания фаз, особенно на стадии реэкстракции [3]. Однако по большей части данные проблемы устраняются за счет применения оборудования, обеспечивающего

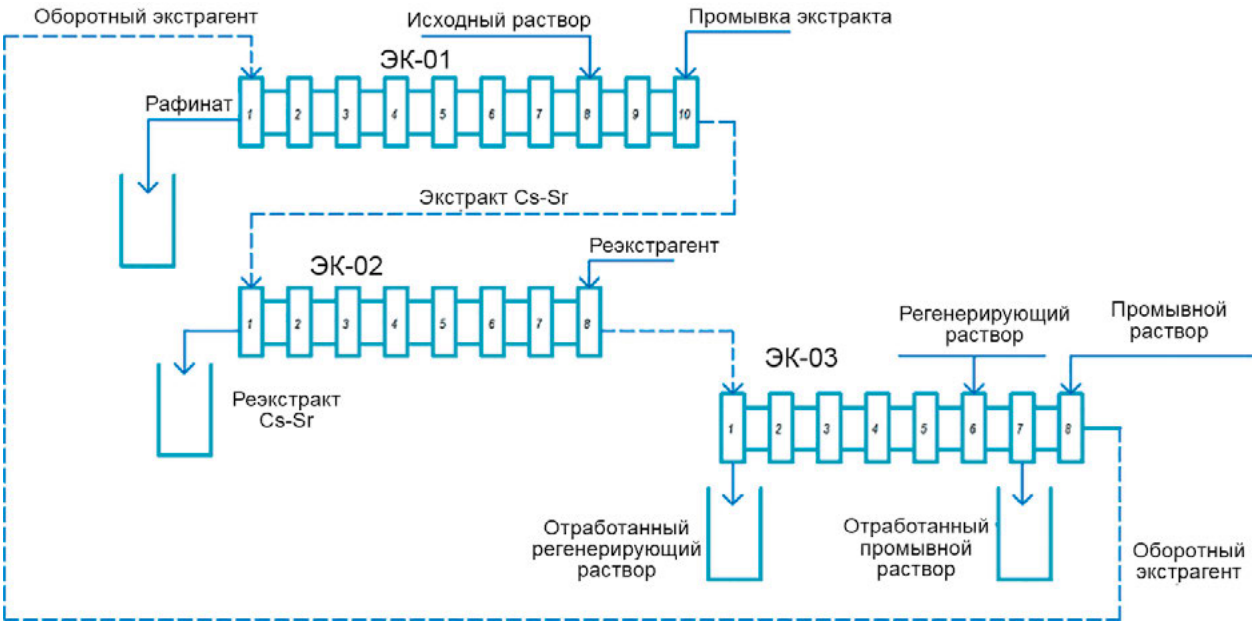


Рис. 4. Схема экстракционного процесса выделения КФ

интенсивное перемешивание органической и водной составляющих, и проведения процесса при повышенной температуре (нагревание аппаратов с использованием водяной рубашки), что позволяет снизить вязкость системы, увеличить скорость расслаивания фаз, обеспечить оптимальный гидродинамический режим и стабильную работу экстракционных аппаратов.

Реализованная технологическая схема (рис .4) включала ряд последовательных стадий: извлечение Cs и Sr из раствора ВАО органической смесью, слабокислую промывку экстракта для снижения его кислотности и удаления захваченных примесей, реэкстракцию Sr и Cs водой, регенерацию экстрагента раствором комплексона (трилона Б) и слабокислую промывку оборотного экстрагента [2].

Экстракционный процесс проводили в течение 120 ч в непрерывном режиме, при этом было переработано примерно 11 дм^3 исходных ВАО и получено 7 дм^3 реэкстракта КФ [1]. В ходе испытаний извлечение Sr и Cs в экстракт составляло в среднем 93 % и 98 % от исходного количества соответственно. При этом основная масса стабильных и радиоактивных примесей, в том числе редкоземельные элементы (РЗЭ) и актиниды, сбрасывалась в рафинат. Реэкстракция Sr и Cs проходила полноценно на восьми экстракционных ступенях. Степень их концентрирования в реэкстракте составила 1,5. Удельная активность долгоживущих α-излучающих радионуклидов в реэкстракте была ниже предела обнаружения, при этом коэффициент очистки от них составил не менее $7{,}5 \cdot 10^3$. На стадиях регенерации и промывки происходило удаление соэкстрагированных или захваченных с микроэмульсией элементов из оборотного экстрагента. За все время работы ни в органических, ни в водных продуктах не отмечалось присутствия каких-либо осадков или следов разрушения экстрагента.

Для увеличения степени очистки КФ от α-излучающих радионуклидов на следующем этапе проведен процесс сорбционного извлечения последних из полученных реэкстрактов на сорбенте Purolite S957, содержащем фосфоновые и сульфогруппы. Данная смола обладает высокой селективностью к РЗЭ и трансплутониевым элементам (ТПЭ) в слабокислых (0,1 моль/дм^3) азотнокислых растворах [4].

В процессе сорбционного аффинажа через колонку было пропущено 23 колоночных объема наработанного реэкстракта Sr и Cs. Для их выведения из фазы сорбента была реализована промывка колонны раствором азотной кислоты, в результате чего было выделено не менее 90 % Cs и Sr от исходного количества, но степень очистки итогового концентрата (фильтрат плюс промывка) КФ от актинидов по сравнению с первичным фильтратом несколько снизилась. Таким образом, его коэффициент очистки от долгоживущих α-излучающих радионуклидов на стадии сорбции составил всего лишь около 4, а суммарный (на экстракционном и сорбционном переделах) — был равен $3{,}1 \cdot 10^4$.

Следует отметить, что, согласно результатам предварительных лабораторных экспериментов на модельных растворах, ожидаемые коэффициенты очистки КФ на сорбенте Purolite S957 от РЗЭ и америция превышали 600 при достаточно

продолжительном фильтроцикле (не менее 270 колоночных объемов), то есть были в несколько десятков раз выше отмеченных при работе на реальном растворе. Это позволяет предположить, что при соблюдении оптимальных параметров процесса интегральный коэффициент очистки концентрата КФ потенциально может достичь 10^5.

Далее полученная фракция Cs-Sr подлежала упариванию и последующему отверждению. С учетом проведенных ранее работ, в качестве основной была выбрана технология включения КФ в боросиликатное стекло (БСС) [5], [6].

Как показывали расчеты и результаты предварительных модельных экспериментов, стеклоподобный боросиликатный материал с включением КФ должен был существенно отличаться по составу, активности, тепловыделению и другим физико-химическими характеристикам от алюмофосфатных компаундов ВАО, нормируемых по НП-019-15 и регулярно в промышленных масштабах получаемых на ФГУП «ПО «Маяк». Требования НП-019-15 относятся к отвержденным ВАО 1 класса, предполагаемым для отправки на захоронение в ПГЗРО. В то же время все детали последующего обращения с отвержденной КФ в настоящее время еще не проработаны. В одном из вариантов предполагается длительное контролируемое хранение компаунда с КФ непосредственно в транспортном упаковочном контейнере (ТУК), в котором после выдержки он будет передан заказчику. Нельзя исключить также вариант его изоляции в приповерхностном хранилище без перегрузки, то есть в упомянутом ТУК, являющимся мощным дополнительным инженерным барьером. При этом сроки потенциальной радиационной опасности типичного алюмофосфатного стекла, получаемого при переработке ОЯТ, несравнимо выше, чем отвержденной КФ. С учетом указанных обстоятельств в рамках настоящей работы для стеклоподобного компаунда с включением КФ были разработаны особые технические требования (ТТ), хотя и основанные на положениях НП-019, но прежде всего опирающиеся на результаты предварительных исследований как на стабильных, так и на активных образцах.

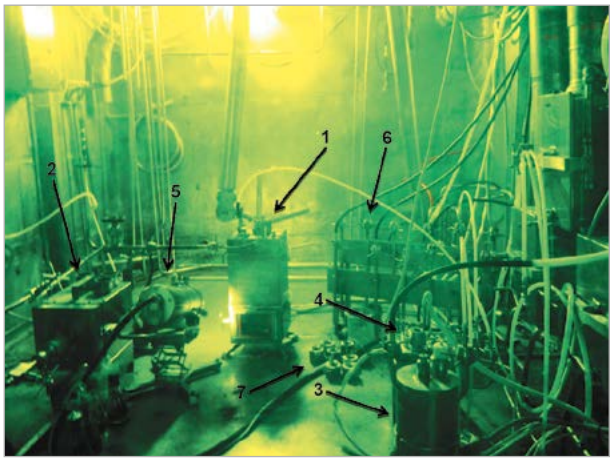
Упомянутые выше проведенные специалистами ФГУП «ПО «Маяк» предварительные работы [5], [6] по созданию технологии отверждения имитатора КФ ВАО с включением в БСС показали, что, при всей привлекательности этого направления, стекла рассмотренных составов являются весьма тугоплавкими. В частности, вязкость расплавов БСС при варке в малогабаритном плавителе прямого электрического нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк» в рабочем диапазоне получения стекла от 900 °С до 1 100 °С должна находиться в интервале от 25 до 100 дПа·с [7]. В противном случае возможны затруднения со сливом расплава через индукционно обогреваемую сливную фильеру [8]. В то же время вязкость упомянутого стекла даже при 1 100 °С составляла 180 дПа·с, поэтому для обеспечения устойчивого слива расплава был разработан новый модифицированный состав, представленный в табл .1, вязкость расплава которого при повышении температуры от 1 000 до 1 100 °С снижается от 120 примерно до 43 дПа·с [7].

Таблица 1. Состав легкоплавкого боросиликатного стекла, массовая доля (МД) оксидов в %

Оксид	Na_2O	SiO_2	Al_2O_3	CaO	B_2O_3
МД	14,11	51,25	2,70	2,70	16,18
Оксид	**Li_2O**	**MnO_2**	**Cs_2O**	**SrO**	**BaO**
МД	4,58	2,70	3,36	1,21	1,21

При изготовлении активных образцов в настоящей работе химический состав стекла оставался постоянным, в том числе не изменялось интегральное количество оксидов цезия и стронция. При этом часть из них была представлена оксидами стабильных изотопов данных элементов и входила в состав стеклофритты, а остаток вводили в виде смеси радионуклидов, содержащихся в концентрате КФ, наработанном в ходе вышеописанных экстракционного и сорбционного этапов. Соотношение стабильной и активной составляющих в синтезированных образцах компаунда от одной партии к другой изменялось. В частности, доля активных изотопов, соответствующая и обеспечивающая заданные значения тепловыделения образцов стеклоподобного компаунда, — не более 1, не менее 15, не менее 25, не менее 35 кВт/м^3 (образцы партии № 1, 2, 3 и 4 соответственно), — постепенно увеличивалась, а количество стабильных пропорционально уменьшалось. Тепловыделение последней партии образцов — не менее 35 кВт/м^3 — совпадало с полным замещением цезия и стронция в составе стеклофритты, то есть МД 3,36 % Cs_2O и 1,21 % SrO в стекле обеспечивались исключительно за счет введения смеси нуклидов цезия и стронция в составе концентрата КФ.

Для отверждения полученного концентрата КФ была разработана и изготовлена опытная установка остекловывания в камерном радиохимическом исполнении с системой локальной газоочистки. Ее внешний вид при размещении в



1 — печь; 2 — обогреваемый фильтр; 3 — выпарной аппарат; 4 — перистальтический насос; 5 — камера системы видеонаблюдения; 6 — байонетная гребенка; 7 — изложницы для слива расплава стекла

Рис. 5. Внешний вид установки отверждения концентрата КФ

«горячей» камере представлен на рис. 5. Процесс проводили согласно отработанной ранее схеме: засыпка в тигель (печь) стеклофритты с определенным содержанием оксидов цезия и стронция, запуск и разогрев печи, дозирование на расплав стеклофритты соответствующего ее составу количества концентрата КФ, денитрация и включение оксидов из концентрата КФ в состав стекла, слив его расплава в изложницы.

Время варки одной партии стекла с установленным тепловыделением с момента засыпки фритты в тигель до момента окончания слива составляло от 12 до 36 ч, в зависимости от объема остекловываемого в данной операции концентрата КФ. Полученные образцы после этого медленно остывали в изложницах. Стадии данного процесса показаны на рис. 6.

Основными контролируемыми параметрами компаунда с включением КФ являлись активность стекломассы, удельное объемное тепловыделение, МЭД на поверхности бидонов с отвержденной КФ ВАО, доля альфа-излучателей в стекле, водоустойчивость компаунда.

Скорости выщелачивания Cs и Sr из всех четырех партий активных стекол были близки к результатам, полученным на моделях, и составляли не более $6{,}2 \cdot 10^{-5}$ г/(см^2·сут), то есть не превышали предельного значения по ТТ — 10^{-4} г/(см^2·сут). Следовательно, все образцы стеклоподобного компаунда с включением КФ являлись водоустойчивыми.

Ряд физических параметров, в частности теплофизические характеристики, был предварительно установлен на модельных стеклах идентичного состава. Исследование проводили по разработанной специалистами ФГУП «ПО «Маяк» методике экспериментального определения теплопроводности, теплоемкости и термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) БСС [9].

Значения теплоемкости и теплопроводности боросиликатного стекла указанного выше состава, определенные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, составили 1,06 кДж/(кг·К) и 1,24 Вт/(м·К) соответственно. Согласно результатам дилатометрического исследования ТКЛР данного БСС составил $8{,}9 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$. Таким образом, можно констатировать, что данные параметры образцов отвечали ТТ.

В рамках настоящей работы разработан комплекс методик аналитического контроля, позволяющий определить характеристики стеклоподобного компаунда, требующиеся для проведения его паспортизации и верификации на соответствие ТТ представителями потенциального заказчика. Химический и радиохимический составы стекла устанавливали путем инструментального анализа концентрата КФ и дальнейшего пересчета с учетом процента включения активной составляющей. В случае отсутствия возможности прямого измерения в растворе того или иного компонента, применяли расчетный алгоритм, в частности, по экспериментально определенным реперам.

К таким компонентам, содержание которых в стекле с включением КФ важно с точки зрения

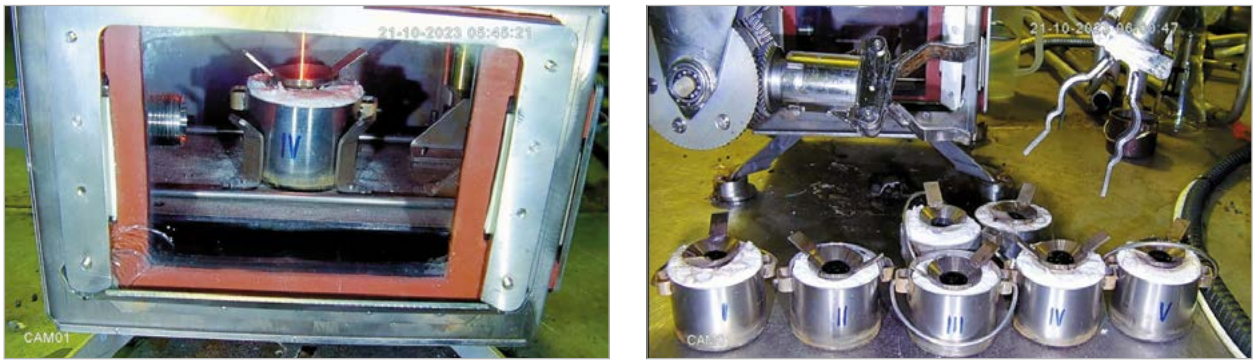


Рис. 6. Слив стекла в изложницу и внешний вид изложниц с образцами

обоснования возможности захоронения данного компаунда в приповерхностных (среднеглубинных) хранилищах, относятся следующие радионуклиды: ^{135,137}Cs, ^{90}Sr, $^{238\text{-}242}$Pu, ^{237}Np, ^{244}Cm, ^{241,243}Am, ^{234,235,236,238}U, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I, ^{151}Sm. Для определения их объемной активности в концентрате КФ разработаны методики, при необходимости подобраны оптимальные условия для их предварительного выделения и очистки от мешающих компонентов, установлены коэффициенты выхода и оценена относительная погрешность стадии пробоподготовки, определены условия для инструментального измерения активности либо массовой концентрации.

Для радионуклидов, определение которых нереализуемо инструментальным методом в настоящее время в силу отсутствия соответствующих открытых радиоактивных источников с аттестованным значением удельной активности, в частности ^{63}Ni, ^{93}Zr, ^{94}Nb, ^{151}Sm, ^{242m}Am, ^{126}Sn, ^{245}Cm, ^{246}Cm, разработан расчетный метод, учитывающий параметры перерабатываемого ядерного топлива, включая технологические переделы.

Пересчет содержания радионуклидов на конечный продукт — остеклованную КФ — выполняли с учетом характеристик, взятых для синтеза стекла составляющих (объем и химический состав концентрата КФ, состав и масса стеклофритты) и степени их включения в матрицу БСС. Данные о содержании основных радионуклидов в концентрате КФ, полученные инструментальным методом, и результаты расчета активности указанных нуклидов в партиях стекла с различным заданным тепловыделением приведены в табл. 2.

Результаты сравнения ряда измеренных или определенных расчетным путем характеристик синтезированных образцов боросиликатного стекла с включением концентрата КФ с техническими требованиями приведены в табл. 3.

Исходя из полученных результатов испытаний (см. табл. 2 и 3) можно сделать вывод, что

Таблица 2. Радиохимический состав концентрата КФ и расчетное содержание нуклидов в стеклах с разным включением активной составляющей

РН	Объемная активность в концентрате КФ, Бк/дм^3	Удельная активность стекла, Бк/т				Предельно допустимое содержание по установленным требованиям, Бк/т*
		партия № 1	партия № 2	партия № 3	партия № 4	
^{14}C	$<3{,}2\cdot10^{2}$	$<3{,}5\cdot10^{3}$	$<5{,}2\cdot10^{4}$	$<8{,}4\cdot10^{4}$	$<1{,}1\cdot10^{5}$	$4{,}5\cdot10^{10}$
^{90}Sr	$1{,}2\cdot10^{12}$	$1{,}4\cdot10^{15}$	$2{,}0\cdot10^{16}$	$3{,}2\cdot10^{16}$	$4{,}4\cdot10^{16}$	–
^{99}Tc	$8{,}9\cdot10^{6}$	$7{,}9\cdot10^{9}$	$1{,}1\cdot10^{11}$	$1{,}8\cdot10^{11}$	$2{,}5\cdot10^{11}$	$2{,}5\cdot10^{10}$
^{129}I	$<1{,}4\cdot10^{2}$	$<6{,}3\cdot10^{3}$	$<9{,}0\cdot10^{4}$	$<1{,}5\cdot10^{5}$	$<2{,}0\cdot10^{5}$	$1{,}9\cdot10^{6}$
^{134}Cs	$1{,}30\cdot10^{11}$	$1{,}4\cdot10^{14}$	$2{,}0\cdot10^{15}$	$3{,}2\cdot10^{15}$	$4{,}4\cdot10^{15}$	Не установлено
^{135}Cs	$8{,}34\cdot10^{6}$	$8{,}9\cdot10^{9}$	$1{,}3\cdot10^{11}$	$2{,}1\cdot10^{11}$	$2{,}8\cdot10^{11}$	$2{,}1\cdot10^{13}$
^{137}Cs	$1{,}34\cdot10^{12}$	$1{,}4\cdot10^{15}$	$2{,}0\cdot10^{16}$	$3{,}3\cdot10^{16}$	$4{,}5\cdot10^{16}$	–
^{234}U	26	$2{,}9\cdot10^{4}$	$4{,}2\cdot10^{5}$	$6{,}7\cdot10^{5}$	$9{,}2\cdot10^{5}$	$1{,}3\cdot10^{7}$
^{235}U	0,35	$4{,}0\cdot10^{2}$	$5{,}7\cdot10^{3}$	$9{,}2\cdot10^{3}$	$1{,}3\cdot10^{4}$	$1{,}9\cdot10^{7}$
^{236}U	2,9	$3{,}2\cdot10^{3}$	$4{,}6\cdot10^{4}$	$7{,}5\cdot10^{4}$	$1{,}0\cdot10^{5}$	$1{,}7\cdot10^{11}$
^{238}U	2,7	$3{,}0\cdot10^{3}$	$4{,}3\cdot10^{4}$	$6{,}9\cdot10^{4}$	$9{,}4\cdot10^{4}$	$6{,}4\cdot10^{7}$
^{237}Np	96	$1{,}1\cdot10^{5}$	$1{,}5\cdot10^{6}$	$2{,}5\cdot10^{6}$	$3{,}4\cdot10^{6}$	$3{,}8\cdot10^{8}$
^{238}Pu	$1{,}5\cdot10^{4}$	$1{,}7\cdot10^{7}$	$2{,}4\cdot10^{8}$	$3{,}9\cdot10^{8}$	$5{,}3\cdot10^{8}$	$3{,}2\cdot10^{10}$
^{239}Pu	$1{,}7\cdot10^{3}$	$1{,}9\cdot10^{6}$	$2{,}7\cdot10^{7}$	$4{,}3\cdot10^{7}$	$5{,}9\cdot10^{7}$	$1{,}9\cdot10^{8}$
^{240}Pu	$1{,}35\cdot10^{3}$	$1{,}5\cdot10^{6}$	$2{,}2\cdot10^{7}$	$3{,}5\cdot10^{7}$	$4{,}8\cdot10^{7}$	$6{,}4\cdot10^{8}$
^{241}Pu	$2{,}8\cdot10^{5}$	$3{,}2\cdot10^{8}$	$4{,}5\cdot10^{9}$	$7{,}3\cdot10^{9}$	$1{,}0\cdot10^{10}$	$2{,}0\cdot10^{14}$
^{242}Pu	$3{,}5\cdot10^{4}$	$3{,}9\cdot10^{7}$	$5{,}6\cdot10^{8}$	$9{,}0\cdot10^{8}$	$1{,}2\cdot10^{9}$	$1{,}4\cdot10^{10}$
^{241}Am	$1{,}9\cdot10^{6}$	$2{,}1\cdot10^{9}$	$3{,}0\cdot10^{10}$	$4{,}8\cdot10^{10}$	$6{,}6\cdot10^{10}$	$6{,}0\cdot10^{9}$
^{243}Am	$2{,}1\cdot10^{4}$	$2{,}3\cdot10^{7}$	$3{,}3\cdot10^{8}$	$5{,}3\cdot10^{8}$	$7{,}2\cdot10^{8}$	$1{,}6\cdot10^{10}$
^{244}Cm	$1{,}3\cdot10^{6}$	$1{,}8\cdot10^{9}$	$2{,}6\cdot10^{10}$	$4{,}2\cdot10^{10}$	$5{,}7\cdot10^{10}$	Не установлено
^{245}Cm	$6{,}0\cdot10^{2}$	$6{,}7\cdot10^{5}$	$9{,}5\cdot10^{6}$	$1{,}5\cdot10^{7}$	$2{,}1\cdot10^{7}$	$1{,}6\cdot10^{10}$
^{246}Cm	$4{,}6\cdot10^{2}$	$5{,}2\cdot10^{5}$	$7{,}4\cdot10^{6}$	$1{,}2\cdot10^{7}$	$1{,}6\cdot10^{7}$	$1{,}6\cdot10^{10}$

*Требования установлены по техническому заданию. Перечень радиоэкологически опасных РН и оценка их предельно допустимых удельных активностей в компаунде осуществлялись сотрудниками ИБРАЭ РАН.

Таблица 3. Результаты сравнения ряда характеристик образцов активного БСС с техническими требованиями

Показатель	Значения в ТТ	Значения, полученные при расчете и измерениях	Заключение о соответствии/несоответствии
Масса, г	Не менее 10	От 10,5 до 11,1	Соответствует
Скорость выщелачивания (водоустойчивость стекол), г/(см^2·сут)	^{137}Cs – не более 10^{-4} ^{90}Sr – не более 10^{-4}	^{137}Cs – от $4{,}4\cdot10^{-6}$ до $5{,}5\cdot10^{-5}$; ^{90}Sr – от $4{,}9\cdot10^{-6}$ до $6{,}2\cdot10^{-5}$	Соответствует
Тепловыделение стекломассы, кВт/м^3	От 1 до 50	От 1,2 до 38,9	Соответствует
Активность стекломассы, Ки/кг	От 100 до 5 000	От 153 до 4 800	Соответствует
Доля активности α-излучателей, %	–	От $7{,}8\cdot10^{-5}$ до $7{,}9\cdot10^{-5}$	–
МЭД, мЗв/ч	–	От 111 до 3 522	–

по большинству нормируемых показателей все изготовленные образцы БСС с включением концентрата КФ соответствовали предъявляемым требованиям, в том числе по массе, водоустойчивости, активности и тепловыделению. Боросиликатное стекло партии № 1 полностью отвечало ограничениям по содержанию критичных контролируемых радионуклидов. Показатели партий № 2—4 с повышенным включением цезий-стронциевой фракции превышали нормы по предельной УА ^{241}Am и ^{99}Tc. Следовательно, достигнутой степени очистки концентрата КФ от данных радионуклидов оказалось недостаточно для синтеза, согласно требованиям ПН СбЯТЦ, высоконасыщенного по радиоцезию и радиостронцию БСС. Как упоминалось выше, результаты лабораторных экспериментов по очистке модельных растворов дают основания для определенного оптимизма по повышению степени очистки, а следовательно, возможности увеличения показателя насыщения стекла при выполнении ТТ по содержанию примесных компонентов.

Таким образом, впервые с использованием реальных ВАО проведен комплекс работ по выделению и очистке концентрата КФ, его расширенному анализу, остекловыванию и паспортизации полученных образцов стекломатрицы. Результаты прошли верификацию со стороны представителей потенциального заказчика, что позволяет перейти к опытно-промышленной стадии реализации «пилотных» проектов в области обращения с ОЯТ АЭС на принципах «Сбалансированного ЯТЦ».

Литература

1. *Широков А. И., Лукин С. А., Чадов С. М., Конников А.В., Ворошилов Ю.А., Калмыков Д. К.* Испытания экстракционной технологии выделения фракции цезия-стронция из реального раствора ВАО экстрагентом на основе краун-эфиров // Новая технологическая платформа атомной энергетики : Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Сибирского химического комбината, Северск, 23—25 апреля 2024 г. — Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С. 88.

2. Патент № RU 2318258 C2 Российская Федерация. Извлечение радионуклидов экстрагентами, содержащими краун-эфиры : № RU 2004/000348 : заявл. 09.09.2004 опубл. 27.02.200 / Глаголенко Ю.В., Логунов М. В., Мамакин И. В., Ровный С.И., Яковлев Н. Г. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Проектно-конструкторское и производственно-внедренческое предприятие «Деймос ЛТД», Государственное учреждение «Федеральное агентство по правовой защите результатов интеллектуальной деятельности военного, специального и двойного назначения» при Министерстве юстиции Российской Федерации. Бюл. № 6.

3. *Широков А. И., Ворошилов Ю. А., Лукин С. А., Логунов М. В., Конников А. В., Бугров К. В., Миндеров А. В., Чадов С. М., Макаров О. Н.* Опытная проверка экстракционной технологии фракционирования ВАО с использованием экстрагента на основе краун-эфиров // Радиохимия-2022 : X Российская конференция с международным участием, Санкт-Петербург, 26—30 сентября 2022 г. — М.: ООО «Месол», 2022. С. 364.

4. *Калмыков Д. К., Широков А. И., Ворошилов Ю. А., Логунов М. В., Зубов А. М.* Проработка методов глубокой очистки «короткоживущей» фракции от минорных актинидов // Открытая научно-техническая конференция молодежного движения топливной компании «Science and Youth TVEL» : Сборник тезисов, Северск, 14—19 августа 2023 года. — Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 32.

5. *Чеснокова А. Ю., Брайчун Е. В., Поляков Е. В., Козлов П. В., Брайчун Е. С., Дворянчикова Е. М.,*

Джевелло К. А. Исследование свойств боросиликатных стекол с различным содержанием цезий-стронциевой фракции // Открытая научно-техническая конференция Молодежного движения АО «СХК»: ОНКТ МД АО «СХК», 11—13 апреля 2023 г., Северск. — М. : АО «СХК», 2023. С. 35.

6 .*Nikulina A. Yu., Polyakov E. V., Remizov M. B., Kozlov P. V., Maltsev A. A., Braichun E. S., Dzhevello K. A.* Study of Properties of Model Borosilicate Glasses with Various Contents of a Cesium–Strontium Fraction for the Development of Technical Requirements // Glass Physics and Chemistry. 2024. Vol. 50. No. 5. Pp .572—580. DOI: 10 .1134/S108765962460118 .

7 .*Nikulina A. Yu., Braichun E. V., Polyakov E. V., Remizov M. B., Kozlov P. V., Levunin A. S.* Synthesis and Study of Radioactive Specimens of Borosilicate Glasses with Different Content of Cesium–Strontium Fraction // Radiochemistry. 2025. Vol. 67. No. 4. Pp .520—526. DOI: 10 .1134/S106636222504013 .

8 .*Ремизов М. Б., Мелентьев А. Б., Шайдуллин С. М., Вербицкий К. В., Козлов П. В., Бендасов Д. И.* Разработка и испытания эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого джоулева нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк» для отверждения ЖРО от переработки ОЯТ в боросиликатное стекло в рамках создания нового комплекса остекловывания ВАО // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 35—46. DOI: 10 .25283/258 -9707-2024-1-35-46.

9 .*Зорин Е. С., Козлов П. В., Старовойтов Н. П., Поляков Е. В., Коренев С. В., Еремяшев В. Е.* Применение термоаналитических методов для исследования теплофизических характеристик остекловванных форм радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2025. № 1. С. 25—31.

Информация об авторах

Широков Андрей Игоревич, инженер-технолог технологической лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: andreyshirokov@inbox .ru

Ворошилов Юрий Аркадьевич, кандидат технических наук, начальник группы технологической лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: vyuriy@telecom . zersk .ru

Конников Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, начальник исследовательской лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: kozlov_pavel@inbox .ru

Поляков Евгений Викторович, начальник группы лаборатории по обращению и кондиционированию радиоактивных отходов, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: e.v .polya ov@yandex .ru

Чухланцева Екатерина Владимировна, кандидат химических наук, начальник группы аналитической лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Лукин Сергей Александрович, исполняющий обязанности начальника, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: lukin235@yandex .ru

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

Борисенко Владимир Павлович, инженер-технолог исследовательской лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Чадов Станислав Михайлович, начальник цеха завода 235, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: mayak@po-mayak .ru

Шереметьев Андрей Владимирович, руководитель проектного офиса, АО «Техснабэкспорт» (115184, Москва, Озерковская наб., 28, стр. 3), e-mail: tenex@tenex .ru

Библиографическое описание статьи

Широков А. И., Ворошилов Ю. А., Конников А. В., Козлов П. В., Поляков Е. В., Чухланцева Е. В., Лукин С. А., Логунов М. В., Борисенко В. П., Чадов С. М., Шереметьев А. В. Разработка и испытания комплексной технологической схемы выделения из ВАО от переработки ОЯТ АЭС и отверждения короткоживущей цезий-стронциевой фракции с получением и паспортизацией опытных образцов стеклоподобного компаунда // Радиоактивные отходы. 2026. №2 (35). С. 63—74. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-63-74.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A COMPREHENSIVE PROCESS FLOW CHART FOR THE EXTRACTION OF A SHORT-LIVED CESIUM-STRONTIUM FRACTION FROM HLW RESULTING FROM NPP SNF REPROCESSING AND ITS SOLIDIFICATION INVOLVING GLASS COMPOUND PILOT SAMPLE PRODUCTION AND CERTIFICATION

Shirokov A. I.[1], Voroshilov Yu. A.[1], Konnikov A. V.[1], Kozlov P. V.[1], Polyakov E. V.[1], Chukhlantseva E. V.[1], Lukin S. A.[1], Logunov M. V.[1], Borisenko V. P.[1], Chadov S. M.[1], Sheremetyev A. V.[2]

[1] FSUE "PA "Mayak", Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

[2] "OJSC Techsnabexport", Moscow, Russia

Article received on February 25, 2026

The study considers a package of methods developed and tested as part of the new Sustainable Nuclear Fuel Cycle (SNFC) product line providing the extraction of the short-lived cesium-strontium fraction (SF) concentrate from high-level waste (HLW) resulted from spent nuclear fuel (SNF) reprocessing, its treatment and solidifi ation. The operations were conducted at a pilot facility in a series of hot cells of the RT-1 plant at PA Mayak. Dynamic extraction method with crown ethers was used to effectively separate the cesium-strontium fraction. Refining sorption treatment o the cesium and strontium re-extract from minor actinides and other long-lived contaminants was performed. The study yielded a borosilicate glass composition providing reliable isolation of the SF enabling its long-term storage. Pilot samples of highly active glass with varying inclusions of cesium-strontium fractions have been manufactured. A package of analytical control methods has been developed based on which the composition of the SF concentrate can be evaluated and the glass compound can be certified One of the pilot samples was studied and it was found that its characteristics were meeting all the SNFC requirements. Thus, it was demonstrated that the compound containing SF no longer required disposal in deep geological formations upon its return to the international customer.

Keywords: *sustainable nuclear fuel cycle, high-level waste, short-lived fraction, extraction, crown ether, cesium, strontium, actinides, borosilicate glass, monitored radionuclides, radioactive waste.*

References

1 . Shirokov A. I., Lukin S. A., Chadov S. M., Konnikov A. V., Voroshilov Yu. A., Kalmykov D. K. *Ispytaniya ekstraktsionnoy tekhnologii vydeleniya fraktsii tseziya-strontsiya iz real'nogo rastvora VAO ekstragentom na osnove kraun-efirov* [Testing of a method providing the extraction of a cesium-strontium fraction from a genuine HLW solution using a crown ether-based extractant]. *Vserossiyskaya*

nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Novaya tekhnologicheskaya platforma atomnoy energetiki", posvyashchennaya 75-letiyu so dnya osnovaniya Sibirskogo khimicheskogo kombinata [All-Russian Scientific and Practical Conference New Technological Platform for Nuclear Energy dedicated to the 75th anniversary of the Siberian Chemical Plant]. Seversk, April 23—25, 2024. Tomsk, TPU Publishing House Publ., 2024. P. 88.

2 . Patent. RU 2318258 C2. Russian Federation. Izvlecheniye radionuklidov ekstragentami, soderzhashchimi kraun-efi y [Extraction of radionuclides with extractants containing crown ethers]. No .RU 2004/000348 : appl. on 09 .09 .200 : published on 27 .02 .200 / Glagolenko Yu. V., Logunov M .V., Mamakin I. V., Rovnyy S. I., Yakovlev N. G .; Bulletin No .6.

3 . Shirokov A. I., Voroshilov Yu. A., Lukin S. A., Logunov M. V., Konnikov A. V., Bugrov K. V., Minderov A .V., Chadov S. M., Makarov O. N. *Opytnaya proverka ekstraktsionnoy tekhnologii fraktsionirovaniya VAO s ispol'zovaniyem ekstragenta na osnove kraun-efiro* [Pilot testing of an extraction method for HLW fractionation using an extractant based on crown ethers]. *X Rossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem "Radiokhimiya-2022"* [X Russian conference with international participation Radiochemistry-2022], St. Petersburg, September 26—30, 2022. Moscow, Mesol Publ., 2022. P. 364.

4 . Kalmykov D. K., Shirokov A. I., Voroshilov Yu .A., Logunov M. V., Zubov A. M. *Prorabotka metodov glubokoy ochistki "korotkozhivushchey" fraktsii ot minornykh aktinidov* [Refining the methods for high-level purification of the "short-lived" fraction from minor actinides]. *Otkrytaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Open scientific and technical conference] Science and Youth TVEL, Tomsk, August 14—19, 2023. Collection of abstracts. Tomsk, TPU Publishing House Publ., 2023. P. 34.

5 . Chesnokova A. Yu., Braichun E. V., Polyakov E. V., Kozlov P. V., Braichun E. S., Dvoryanchikova E. M., Dzhevello K. A. *Issledovaniye svoystv borosilikatnykh stekol s razlichnym soderzhaniyem tseziy-strontsiyevoy fraktsii* [Studying the properties of borosilicate glasses with different concentrations of the cesium-strontium fraction]. *Otkrytaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Molodezhnogo dvizheniya AO "SKHK"* [Open Scientific and Technical Conference of the Youth Movement at JSC SCC]. ONKT MD JSC "SKhK", April 11—13, 2023, Seversk. Moscow, JSC SCC Publishing house Publ., 2023. P. 35.

6 . Nikulina A. Yu., Polyakov E. V., Remizov M. B., Kozlov P. V., Maltsev A. A., Braichun E. S., Dzhevello K .A. Study of Properties of Model Borosilicate Glasses with Various Contents of a Cesium–Strontium Fraction for the Development of Technical Requirements. *Glass Physics and Chemistry,* 2024, vol. 50, no .5, pp .572—580. DOI: 10 .1134/S108765962460118 .

7 . Nikulina A. Yu., Braichun E. V., Polyakov E. V., Remizov M. B., Kozlov P. V., Levunin A. S. Synthesis and Study of Radioactive Specimens of Borosilicate Glasses with Different Content of Cesium–Strontium Fraction. *Radiochemistry,* 2025, vol. 67, no. 4, pp .520—526. DOI: 10 .1134/S106636222504013 .

8 . Remizov M. B., Melentyev A. B., Shaidullin S. M., Verbitsky K. V., Kozlov P. V., Bendasov D. I. Razrabotka i ispytaniya evakuiruyemogo malogabaritnogo plavitelya pryamogo dzhouleva nagreva dizayna FGUP "PO "Mayak" dlya otverzhdeniya ZHRO ot pererabotki OYAT v borosilikatnoye steklo v ramkakh sozdaniya novogo kompleksa osteklovyvaniya VAO [Evacuable Small-Sized Direct Joule-Heated Melter Designed by PA Mayak to Immobilize LRW from SNF Reprocessing into Borosilicate Glass Developed and Tested as Part of a New HLW Vitrification Complex]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2024, no. 1 (26), pp. 35—46. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-35-46.

9 . Zorin Ye. S., Kozlov P. V., Starovoytov N. P., Polyakov Ye. V., Korenev S. V., Yeremyashev V. Ye. Primeneniye termoanaliticheskikh metodov dlya issledovaniya teplofizicheskikh kharakteristik osteklovannykh form radioaktivnykh otkhodov [Use of Thermo-Analytical Methods for Investigation of Thermo-Physical Characteristics of Vitrified Radioactive Waste Forms]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Issues of radiation safety,* 2025, no. 1, pp .25—31.

Information about the authors

Shirokov Andrey Igorevich, Process Engineer at the Technological Laboratory, Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: andreyshirokov@inbox.ru.

Voroshilov Yuriy Arkadyevich, Ph.D., Head of the Technological Laboratory Group, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: vyuriy@telecom.ozersk.ru.

Konnikov Andrey Valerievich, Ph . ., Head of the Research Laboratory, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Kozlov Pavel Vasilyevich, PhD, Associate Professor, Head of the Research Laboratory, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kozlov_pavel@inbox .ru

Polyakov Evgeny Viktorovich, Head of the Laboratory Group for the Treatment and Conditioning of Radioactive Waste, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: e.v .polya ov@yandex .ru

Chukhlantseva Ekaterina Vladimirovna, Candidate of Chemical Sciences, Head of the Analytical Laboratory Group, Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Lukin Sergey Alexandrovich, Acting Head, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: lukin235@yandex .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

Borisenko Vladimir Pavlovich, Technological Engineer of the Research Laboratory, Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Chadov Stanislav Mikhailovich, Shop Supervisor of Plant 235, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: mayak@po-mayak .ru

Sheremetyev Andrey Vladimirovich, Head of the Project Offi e, "OJSC Techsnabexport" (28/3, Ozerkovskaya nab., Moscow, 115184, Russia), e-mail: tenex@tenex .ru

Bibliographic description

Shirokov A. I., Voroshilov Yu. A., Konnikov A. V., Kozlov P. V., Polyakov E. V., Chukhlantseva E. V., Lukin S. A., Logunov M. V., Borisenko V. P., Chadov S. M., Sheremetyev A. V. Development and Testing of a Comprehensive Process Flow Chart for the Extraction of a Short-Lived Cesium-Strontium Fraction from HLW Resulting from NPP SNF Reprocessing and its Solidification Involving Glass Compound Pilot Sample Production and Certification *Radioactive Waste,* 2026, no. 2 (35), pp. 63—74. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-63-74. (In Russian).