

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЭВАКУИРУЕМОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ПРЯМОГО ДЖОУЛЕВОГО НАГРЕВА ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК» ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЖРО ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ В БОРОСИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО В РАМКАХ СОЗДАНИЯ НОВОГО КОМПЛЕКСА ОСТЕКЛОВАНИЯ ВАО

М. Б. Ремизов, А. Б. Мелентьев, С. М. Шайдуллин,
К. В. Вербицкий, П. В. Козлов, Д. И. Бендасов

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2023 г.

В статье описано текущее состояние технологии остекловывания ВАО на радиохимическом производстве ФГУП «ПО «Маяк». Рассмотрены концептуальные и технические решения по ее развитию для различных видов жидких ВАО на предприятии. Проведен анализ основных отличий перспективного эвакуируемого малогабаритного плавителя от установок, эксплуатировавшихся ранее. Представлены этапы эволюции и результаты испытаний прототипов новых плавителей прямого джоулевого нагрева для варки боросиликатного стекла, проводившихся на предприятии в период с 2018 по 2020 год. Отражены широкий спектр выполненных исследований, а также опыт их использования. Приведены характеристики третьего улучшенного прототипа эвакуируемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк», разработанного в 2022 году по результатам испытаний предыдущих образцов.

Ключевые слова: малогабаритный плавитель, удаляемый плавитель, плавитель дизайна ФГУП «ПО «Маяк», боросиликатное стекло, остекловывание, высокоактивные отходы, завод РТ-1, федеральная целевая программа, радиоактивные отходы.

Введение

Одной из наиболее серьезных и трудно решаемых проблем развития ядерной энергетики является сложность изоляции от биосферы большого количества радионуклидов, образующихся в результате деления ядер урана [1]. Известно, что при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) АЭС свыше 99% общей активности образующихся продуктов деления урана концентрируется в определенной категории отходов — жидких высокоактивных отходах (ВАО).

Согласно нормативам МАГАТЭ [2] они подлежат отверждению. Основной целью является максимально возможное уменьшение их объема и кондиционирование, т. е. перевод в химически и радиационно устойчивую форму, сохраняющую свою стабильность на протяжении всего времени хранения.

В настоящее время в мире реализованы технологические процессы по иммобилизации ВАО в матрицы на основе стекла двух типов:

боросиликатного и алюмофосфатного. В России на ФГУП «ПО «Маяк» внедрен второй тип данного технологического процесса [3].

Создание нового комплекса остекловывания ФГУП «ПО «Маяк»

На заводе РТ-1 для получения фосфатного стекла применяют неэвакуируемые электропечи типа ЭП-500, в которых нагрев происходит за счет прямого прохождения тока промышленной частоты через расплав. За прошедший период времени на предприятии отработали расчетный срок и были выведены из эксплуатации четыре подобные печи, в 2020 г. — оставлена пятая, ЭП-500/5. В результате работы данных печей за 20 лет (эффективное время использования оборудования) было отверждено 35 000 м³ жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с получением свыше 8 000 т высокоактивного алюмофосфатного стекла, содержащего радионуклиды, суммарная активность которых на момент завершения процесса составляла свыше 800 млн Ки (см. табл. 1) [4], [5]. Конструкция указанных печей не предполагала их демонтажа после вывода из эксплуатации, ввиду чего данное оборудование остается под наблюдением в составе соответствующего здания. Перспективные решения в области остекловывания ЖРО должны предусматривать демонтаж отработанного плавителя, его фрагментацию и размещение наиболее активных частей совместно с отвержденными высокоактивными отходами. Результаты эксплуатации печей остекловывания ВАО типа ЭП-500 на ФГУП «ПО «Маяк» приведены в табл. 1.

В 2025 году планируется ввод в эксплуатацию шестой промышленной электропечи типа ЭП-500. Проектный срок ее службы должен составить 6 лет, производительность по стеклу — до 450 т/год (60 кг/ч), по исходному раствору — 250 л/ч, введение флюсующих добавок — в жидком виде. Электропечь ЭП-500/6 должна стать последним неэвакуируемым плавителем данного типа. Нужно отметить, что крупногабаритные высокопроизводительные электропечи для остекловывания ЖРО используются

только в практике России и США (на площадке атомного комплекса «Хэнфорд») [6].

Ввиду этого на радиохимическом производстве остаются актуальными и требуют решения следующие задачи развития технологии остекловывания:

1) обеспечение возможности отверждения всех видов образующихся жидких ВАО;

2) внедрение технологии, обеспечивающей максимальную компактизацию отвержденных отходов. Это позволит, в частности, обеспечить возврат остеклованных ВАО от переработки зарубежного ОЯТ в страну происхождения;

3) переход от неэвакуируемых плавителей к малогабаритным удаляемым установкам.

Для решения указанных задач в 2028 году на ФГУП «ПО «Маяк» планируется запуск нового комплекса остекловывания, универсального по составу отверждаемых жидких высокоактивных отходов. Его структура для радиохимического завода РТ-1 представлена на рис. 1 [7].

Комплекс должен включать в себя два удаляемых плавителя типа ЭП на алюмофосфатном стекле, которые являются результатом дальнейшего развития концепции ЭП-500. Они будут обеспечивать переработку «проблемных» ВАО сложного состава, накопленных за прошлые периоды деятельности предприятия, и ряда растворов от текущей переработки ОЯТ энергетических реакторов (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, БН-800). Для отверждения большей части этого потока жидких ВАО (преимущественно высокоактивных рафинатов от гидрометаллургических процессов) предполагается использовать новый малогабаритный плавитель прямого электрического нагрева на боросиликатном стекле, внедрение которого позволит включать в матрицу существенно большее количество радионуклидов (по сравнению с алюмофосфатным стеклом).

Все указанные электропечи должны будут иметь предусмотренную проектом процедуру демонтажа, разборки и удаления для обеспечения соответствия природоохранному законодательству и снижению издержек при создании новых установок за счет повторного использования значительной части инфраструктуры [5], [7].

Таблица 1. Результаты эксплуатации печей остекловывания ВАО типа ЭП-500 на ФГУП «ПО «Маяк»

Наименование	ЭП-500/2	ЭП-500/1р	ЭП-500/3	ЭП-500/4	ЭП-500/5
Годы эксплуатации	1987–1988	1991–1997	2001–2006	2006–2010	2016–2020
Остекловано ВАО, тыс. м ³	1	11,5	8,0	8,1	6,6
Получено стекла, т	162	2 200	1 800	2 040	1 898
Отверждено радионуклидов, млн Ки	4	282	175	182	167



Рис. 1. Состав нового комплекса остекловывания ФГУП «ПО «Маяк»

Таким образом, на ближайшее десятилетие в России основным способом отверждения ВАО будет оставаться технология остекловывания в печах прямого электрического нагрева. При этом будет расширяться номенклатура применяемых стекол и характеристик отверждаемых отходов.

Эвакуируемый малогабаритный плавитель с донным сливом дизайна ФГУП «ПО «Маяк»

В настоящий момент в мире используются два основных метода варки стекол для отверждения ЖРО — с кальцинацией перед варкой и без нее; их условно называют двух- и одностадийными процессами. Первый процесс используют во Франции и Великобритании, второй — в США, России, Германии, Японии, Индии, Южной Корее [6].

В России на сегодняшний день двухстадийный процесс не применяется ввиду того, что он отличается относительно низкой надежностью оборудования для работы с гетерогенными средами и отсутствием возможности обслуживания такой установки персоналом в случае каких-либо поломок.

При витрификации необходимы высокие температуры, примерно от 1 000 до 1 250 °С. Во всех применяемых на практике процессах остекловывания используется электрический нагрев, который осуществляется либо пропусканием тока через расплав стекла (прямой или джоулев нагрев), либо индукцией высокочастотных токов внешним источником. В США, Германии и России используются плавители прямого нагрева [8].

Стоит отметить, что малогабаритные плавители прямого джоулевого нагрева с вертикальной компоновкой и донным сливом в настоящий момент являются актуальным направлением исследований для мировой атомной отрасли и рассматриваются практически всеми ключевыми предприятиями, занимающимися переработкой ОЯТ. Так, вертикальные плавители прямого джоулевого нагрева с производительностью 9 и 52 кг/ч по стекломассе были заложены в проекты японских заводов Tokai и Rokkasho Reprocessing Plant (RRP) соответственно. В Индии малогабаритные плавители типа AVS внедрены на заводах в Тарапуре и WIP в Тромбее [9]. Вертикальный плавитель применяется в США, Саванна Ривер, на заводе Defence Waste Processing Facility (DWPF) для переработки накопленных ЖРО от оборонных программ прошлых лет [10]. Наиболее проработанными плавителями такого рода являются немецкие VEK, разработанные The Institute for Nuclear Waste Disposal of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT-INE). Их эксплуатация позволила иммобилизовать до $7,7 \cdot 10^{17}$ Бк в составе жидких ВАО с относительно высоким содержанием благородных металлов, полученных при эксплуатации пилотного завода по переработке ОЯТ Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) [11]–[13].

Разработка конструкции нового вакууируемого малогабаритного плавителя с донным сливом дизайна на ФГУП «ПО «Маяк» была начата в 2015 году силами собственных специалистов — проектировщиков, исследователей, расчетчиков и технологов. К его конструкции предъявлялись следующие требования:

- небольшой размер (относительно 130-тонных печей типа ЭП-500);
- возможность демонтажа, разборки и удаления;
- способность остекловывать ВАО с высоким содержанием благородных металлов;
- высокая надежность (срок службы не менее трех лет).

С 2018 по 2019 год первый прототип удаляемого малогабаритного плавителя испытывался на радиохимическом заводе ФГУП «ПО «Маяк», за время работы которого было получено значительный массив данных по его электрическим и тепловым параметрам. Общая схема опытного стенда для испытаний первого прототипа представлена на рис. 2.

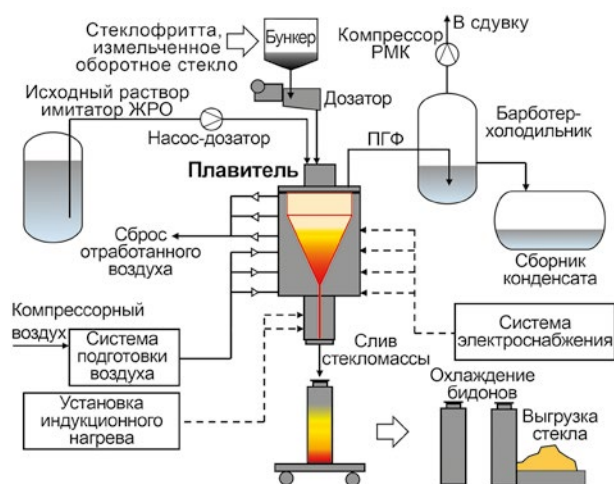


Рис. 2. Общая схема опытного стенда для испытаний первого прототипа плавителя

В состав опытного стенда входят:

- плавитель — электропечь прямого электрического нагрева с несколькими парами основных электродов, донным электродом с двумя токоподводами, сливной фильерой и установкой индукционного нагрева сливной фильеры;
- системы дозирования стеклофритты и модельных растворов;
- система воздушного охлаждения;
- система подготовки сжатого воздуха;
- система газоотведения;
- система стартового разогрева.

Схематическое изображение конструкции первого прототипа удаляемого малогабаритного плавителя приведено на рис. 3.

Первый прототип плавителя представлял собой малогабаритную печь остекловывания прямого джоулевого нагрева максимальной мощностью 250 кВт.

Его варочная огнеупорная ванна имела воронкообразную форму и была изготовлена из керамических блоков на основе оксида

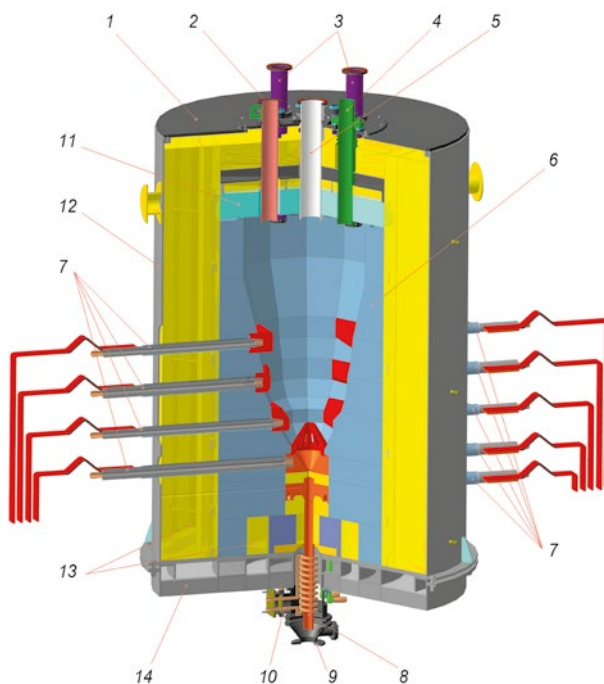


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции первого прототипа удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»: 1 — крышка, 2 — патрубок термопары, 3 — подача стеклофритты, 4 — газоход, 5 — подача раствора, 6 — варочная ванна из керамического огнеупора, 7 — токоподводы с электродами, 8 — фильера, 9 — корпус индуктора, 10 — индуктор, 11 — свод плавителя, 12 — корпус плавителя, 13 — теплоизоляция, 14 — основание плавителя

алюминия и кремния с дополнительной двойной теплоизоляцией. Объем варочной зоны — около $0,5 \text{ м}^3$. Площадь зеркала расплава составила $0,49 \text{ м}^2$, объем расплава — $0,24 \text{ м}^3$. В варочной ванне были установлены три пары электродов. На дне размещалась воронка с защитным устройством, препятствующая засорению сливного канала и накоплению твердой фазы, не растворимой в стекле. Под ней через керамическую вставку был установлен донный электрод, переходящий в сливную фильеру. Все электроды были изготовлены из коррозионно-стойкого никелевого сплава ХН70Ю. Внешний корпус плавителя сделан из стали 12Х18Н10Т. Охлаждение электродов и пода печи проводилось осушенным сжатым воздухом. Питание каждой из трех пар электродов осуществлялось через отдельный трансформатор. Еще один трансформатор был зарезервирован для питания пары «донный электрод — сливная воронка», он же использовался при запуске плавителя для питания сборки стартовых нагревателей, устанавливаемых в проходки его свода. После этого указанные нагреватели извлекались, и проходки использовались для установки

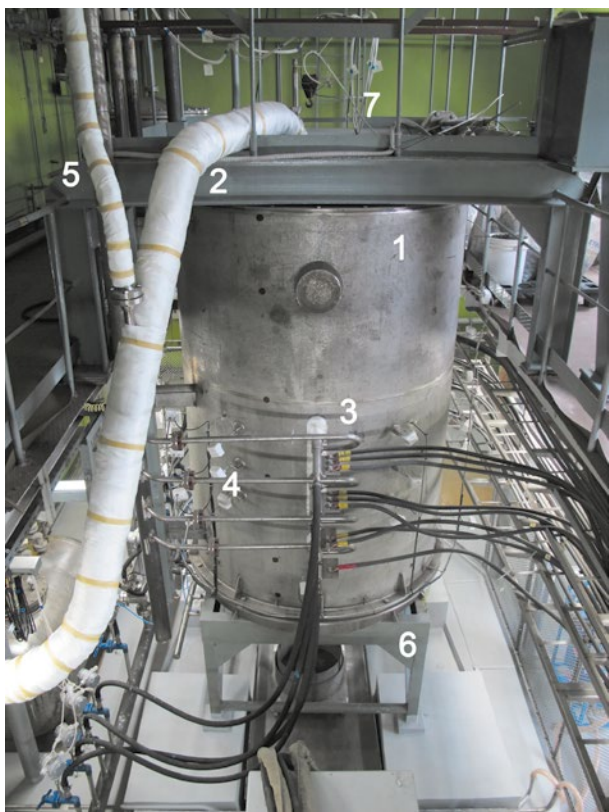


Рис. 4. Опытный стенд для испытаний плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»: 1 – корпус плавителя; 2 – газозод; 3 – токоподводы; 4 – система охлаждения токоподводов; 5 – резервный газозод; 6 – основание плавителя; 7 – площадка обслуживания

контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), питателя исходного раствора и подачи стеклофритты.

Внешний вид опытного стенда представлен на рис. 4.

Для осуществления слива стекломассы из плавителя требовалось достичь контролируемого расплавления стеклянной пробки в фильере сливного устройства. Это достигалось в два этапа. Вначале фильеру разогревали до температур от 1000 до 1100 °С с помощью водоохлаждаемого индукционного нагревателя мощностью 70 кВт. Далее подавали напряжение на фильеру и донный электрод. По мере проплавления стекломассы в канале между ним и воронкой появлялась проводимость, и дальнейший разогрев стеклянной пробки осуществлялся за счет джоулевого нагрева. Ее расплавление способствовало открытию сливного устройства, после чего стекломасса выдавалась в бидон.

Остановка процесса происходила путем быстрого охлаждения фильеры и проходящего через нее расплава стекла за счет подачи воздуха в полость донного электрода, а также обдува ее внешней поверхности из патрубка, направленного в промежуток между витками индуктора.

Существенным недостатком первого прототипа являлась необходимость длительной подготовки к сливу стекломассы. Требовался продолжительный (более 10 часов) разогрев донного электрода для перевода сливного устройства в режим готовности. После этого слив достигался за короткий промежуток времени (десять минут), однако требовался точный контроль параметров электрического тока в сливном канале, так как был возможен перегрев стекломассы и превышение рекомендованной температуры в 1100 °С для металлических частей сливного тракта.

В целом за время эксплуатации первого прототипа малогабаритного плавителя были установлены оптимальные электрические и временные параметры системы управления электропечи, осуществлен процесс предварительного (стартового) разогрева ее рабочего пространства с загруженной стеклофриттой с помощью стартовых карбид-кремниевых нагревателей, исследован процесс варки и флюсовки боросиликатного стекла. Также была проверена работоспособность всех электродов, испытаны разные варианты их коммутации. Общая продолжительность эксплуатации первого прототипа составила 200 суток.

На основании полученных данных с 2019 по 2020 год был изготовлен и подвергнут испытаниям второй, доработанный прототип плавителя. Модернизации подверглась в первую очередь его донная часть, индуктор был поднят на несколько сантиметров вверх для равномерного прогрева сливной фильеры по всей длине, а также улучшена система охлаждения донного электрода, увеличен объем канала между сливной воронкой и донным электродом, внедрена новая система обдува фильеры, представляющая собой полый цилиндр с форсунками, охватывающий индуктор.

На рис. 5 представлено схематическое изображение конструкции сливного устройства для первого и второго прототипов удаляемого малогабаритного плавителя.

В состав самого плавителя был добавлен дополнительный элемент — внутренняя цилиндрическая обечайка из жаропрочной стали вокруг кладки, между ними внедрена шамотно-кварцевая засыпка, что позволило продлить срок службы образца и улучшить запирающие свойства стекломассы по швам кладки и вдоль нагретых конструктивных элементов. Опытный стенд для испытаний второго прототипа при этом не претерпел существенных изменений.

В ходе исследования данного малогабаритного плавителя была определена его максимальная

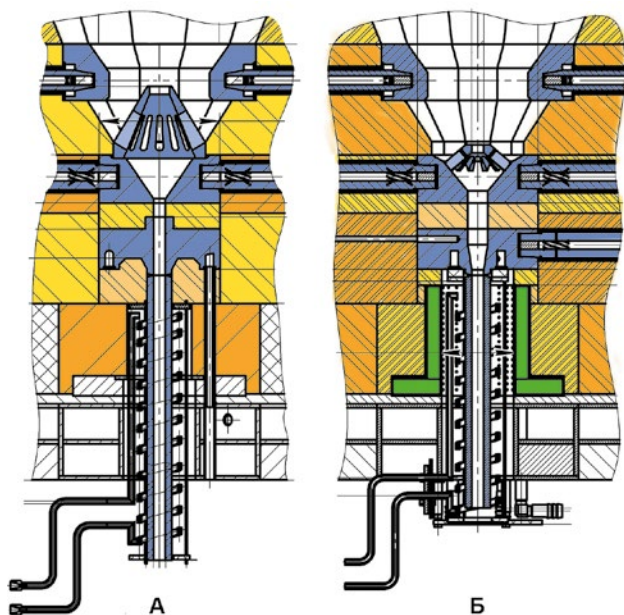


Рис. 5. Схематические изображения конструкции сливного устройства первого и второго прототипов удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»: А – первого прототипа; Б – второго прототипа

испарительная способность по воде, которая составила 25 дм³/ч. В процессе ее дозирования через охлаждаемый питатель в центре свода производили контроль температурных параметров плавителя, газовой фазы, а также визуальные наблюдения за поверхностью расплава через резервную проходку в его крышке. Продолжительность каждого этапа составляла 12 часов для стабилизации данных показателей. Эффективность испарительного процесса определяли на основании температуры расплава и газовой фазы, а также по площади пятна охлажденного стекла на поверхности расплава.

Установлена производительность плавителя по исходному раствору, содержащему флюсующие добавки (144 г/дм³ соды и 36 г/дм³ буры), составившая 15 дм³/ч, и производительность по фритте – 10,5 кг/ч, при одновременной дозировке.

Определены оптимальные условия для старта и остановки слива стекломассы применительно ко второму прототипу плавителя. Его теплофизические параметры при проведении этих операций приведены на рис. 6.

Перед сливом стекломассы температура в газовой фазе плавителя не превышала 950 °С. Для обеспечения слива на втором прототипе подготовку необходимо было начинать приблизительно за 10 часов до операции. Для этого снимали воздушное охлаждение с донного электрода, постепенно происходил разогрев этого элемента с 300 °С до температур 500–550 °С. Далее

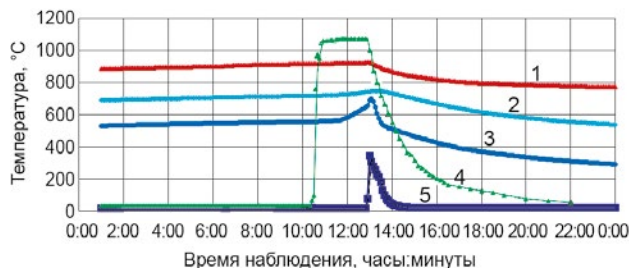


Рис. 6. Теплофизические параметры плавителя при сливе стекломассы (температура, °С): 1 – парогазовой фазы над расплавом; 2 – сливной воронки; 3 – донного (нижнего) электрода; 4 – на фильере; 5 – охлаждающего воздуха в полости воронки

за 3 часа до слива включали индуктор, разогревали фильеру до температур от 1 050 до 1 100 °С, поддерживали ее до момента слива. За счет передачи тепла от фильеры начался разогрев стеклянной пробки между донным электродом и сливной воронкой.

Электрические параметры второго прототипа при сливе приведены на рис. 7. Питание первой (верхней) пары электродов осуществлялось от трансформатора Т-1, второй и третьей – от Т-2 и Т-3 соответственно, Т-4 был зарезервирован для подачи тока на пару «сливная воронка – донный электрод». При работе регулировали напряжение на электродах. Прохождение слабого тока между воронкой и донным электродом на втором прототипе начиналось примерно за два часа до слива, когда происходило достаточное снижение сопротивления стеклянной пробки по мере ее разогрева и постепенного проплавления. К моменту слива ток в промежутке между донным электродом и воронкой достигал 70 А при напряжении до 36 В.



Рис. 7. Ток, подаваемый на электроды плавителя при осуществлении слива стекломассы

Для выбранного состава стекломассы слив начинался в определенный момент, когда температура на донном электроде достигала 654 °С. Далее она возрастала до 690 °С. Процесс останавливали подачей воздуха в кольцевую полость донного электрода, температура воздуха на выходе составляла максимум 340 °С, за 30 минут

продувки она постепенно снижалась до 180 °С. Однако для надежной остановки слива требовалось также включать обдув фильеры. Обычно ее охлаждали с 1070 °С до ~700 °С за 3–5 минут.

Температура на воронке в начале слива составила 741 °С, а максимум в 750 °С был достигнут через 20 минут после того, как включили подачу воздуха на обдув и охлаждение фильеры. Далее она постепенно снижалась до 530 °С к концу суток.

В целом остановка слива на втором прототипе занимала до 10 минут, наблюдалось постепенное истончение струи стекла и затем сход некоторого количества нитей и капель полузастывшей стекломассы. Основными факторами, влияющими на скорость остановки, являются температура расплава, вязкость стекла и расход охлаждающего воздуха, поступающего на обдув фильеры.

Протекания тока между сливной воронкой и электродом одной из пар для разогрева при сливе не требовалось, хотя такой вариант был опробован (для верхней и средней пар электродов). В процессе отключали трансформатор Т-1 (см. рис. 7), так как происходило оголение верхней пары электродов, питавшейся от него.

Т-4 также отключали непосредственно после того, как начинался слив. После этого напряжение на трансформаторах Т-2 и Т-3 было повышено из-за того, что требовалось скомпенсировать отключение первой пары электродов.

На рис. 8 представлена фотография процесса слива боросиликатного стекла из фильеры второго прототипа удаляемого малогабаритного плавителя.

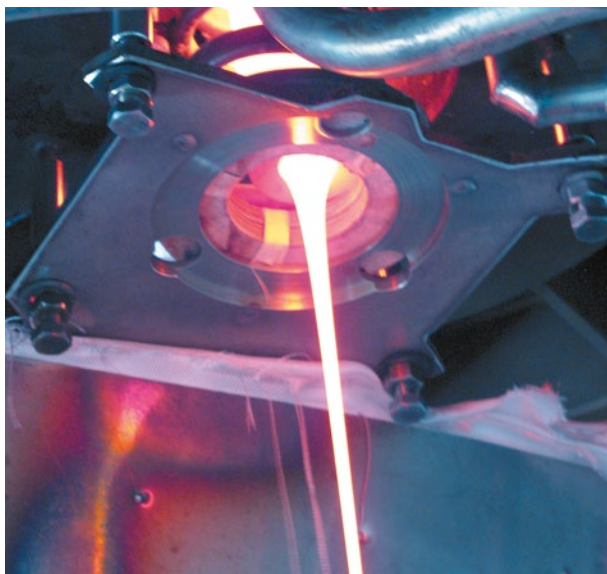


Рис. 8. Слив боросиликатного стекла из фильеры второго прототипа удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»

В ходе испытаний также проведена серия из трех сливов с поступенчатым увеличением вязкости и температуры плавления расплава стекла за счет дозировки стеклофритты без флюсующего раствора. Было отмечено, что инициация слива занимает более продолжительное время, скорость истечения расплава из фильеры значительно уменьшалась.

Также были проведены два эксперимента по внесению в стекломассу металлоферического порошка из нержавеющей стали марки 06ХН28МДТ с крупностью частиц от 0,40 до 0,63 мм, имитирующего дисперсную фазу благородных металлов, содержащихся в ВАО от переработки ОЯТ. Установлено, что мелкодисперсный порошок достаточно равномерно распределяется в расплаве стекла при сливе, время седиментации частиц порошка в плавителе составляет менее 4 часов. Конструкция донного сливного устройства обеспечивает стабильное удаление металлических частиц из плавителя вместе с потоком расплава.

В ходе исследования была установлена работоспособность системы вибрационной дозировки сухих реагентов и стеклофритты, которая обеспечивала дозировку установленных навесок реагентов в определенные промежутки времени.

Продолжительность непрерывной эксплуатации второго прототипа составила 185 суток. На основании данных, полученных в ходе испытаний первого и второго прототипов, а также изучения элементов конструкции после разборки плавителей, в 2022 году был разработан проект третьего варианта малогабаритного удаляемого плавителя.

Существенным изменениям подверглись его кладка, корпус, крышка, теплоизоляция, электроды и сливное устройство.

Сравнение основных показателей малогабаритных плавителей первой, второй и перспективной третьей версии приведено в табл. 2.

Составы боросиликатного стекла, использовавшегося для загрузки плавителей, приведены в табл. 3. По результатам тестирования первого прототипа, для снижения температуры варки стекла и достижения хорошо контролируемого слива состав боросиликатного стекла модифицировали, эта композиция использовалась для испытаний второго прототипа плавителя. Были продолжены работы по созданию легкоплавкого боросиликатного стекла [14], которое отвечает требованиям, изложенным в НП-019-2015 [15]. В итоге для испытаний третьего прототипа плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» был предложен новый состав боросиликатного стекла, который также приведен в табл. 3.

Таблица 2. Сравнение основных показателей первого, второго и третьего прототипов малогабаритных плавителей дизайна ФГУП «ПО «Маяк»

Параметр	Первый, второй прототипы плавителя	Третий прототип плавителя
Полный объем бассейна печи, м ³	0,50	0,56
Рабочий объем бассейна печи, м ³	0,24	0,40
Площадь зеркала расплава, м ²	0,49	0,43
Оценка максимальной производительности по исх. раствору ВАО, дм ³ /ч	15	18–20
Производительность по расплаву, не менее, кг/ч	8,2	15
Объем одного слива, дм ³	35	75
Мощность электрическая суммарная, кВт	250	165
Оценочная масса плавителя, т	12	18*

*с учетом съемной внешней теплоизоляции

Таблица 3. Состав боросиликатного стекла для испытаний прототипов плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»

Прототип	Массовая концентрация оксида элемента, мас. %							
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Li ₂ O	TiO ₂
1	49,1	21,5	4,1	4,9	19,9	0,6	-	-
2	44,5	21,4	3,9	4,5	25,1	0,6	-	-
3	48,2	22,1	4,2	4,9	16,0	0,6	2,0	2,0

Для третьего прототипа объем стекломассы, которую можно слить из улучшенного плавителя до достижения минимального рабочего уровня, был увеличен до 75 дм³, два слива позволяют полностью заполнить новый нержавеющий контейнер (бидон), выполненный в габаритах широко применяемого бидона типа CSD-V. Также важно отметить, что, в отличие от первого и второго прототипов малогабаритных плавителей, для третьего при изменении уровня стекломассы площадь зеркала расплава не меняется.

Для надежного удержания стекломассы в третьем прототипе предусмотрена новая многослойная кладка из хром-корундового огнеупора. При этом геометрия блоков была подвергнута существенной доработке, в том числе с точки зрения ее упрощения для обеспечения технологичности при изготовлении. На плавителе также предполагается использование взаимозаменяемых блок-пробок для питателя и стартовых нагревателей.

Его внешняя теплоизоляция должна быть выполнена в виде двух съемных модулей и может вновь использоваться на последующих плавителях. Схематичное изображение внутренней

части плавителя и съемной теплозащиты представлены на рис. 9.

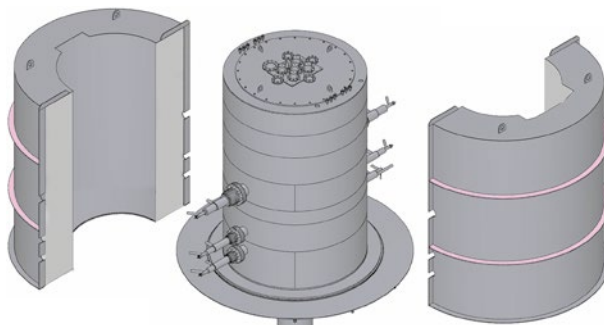


Рис. 9. Схематичное изображение третьей версии малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» со съемной теплозащитой

Основные конструкционные решения, реализованные для трех прототипов малогабаритного удаляемого плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк», защищены авторским свидетельством [16].

Заключение

На ФГУП «ПО «Маяк» с 2015 года собственными силами ведется разработка конструкции эвакуируемого малогабаритного плавителя с донным сливом расплава для отверждения ВАО от переработки ОЯТ энергетических реакторов в боросиликатное стекло. В период с 2018 по 2020 год проведены длительные испытания первого и второго прототипов плавителя собственного дизайна.

На основании полученных данных спроектирован третий прототип удаляемого плавителя, в котором переработана конструкция и материалы огнеупорной кладки печи, узлы подачи стеклофритты и растворов, отдельные элементы систем охлаждения, сливного устройства, контроля уровня расплава и температуры. Испытания третьего прототипа малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» будут проведены в 2024 году и он будет использован в составе нового комплекса остекловывания ФГУП «ПО «Маяк», создаваемого в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» (ФЦП ЯРБ-2) [17]. Запуск в эксплуатацию указанного объекта запланирован на 2028 год.

Литература

1. Землянухин В. И., Ильенко Е. И., Кондратьев А. Н. и др. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.

2. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Основное руководство. — Вена, МАГАТЭ, 1981. 56 с.
3. Глаголенко Ю. В., Дзекун Е. Г., Дрожко Е. Г., Медведев Г. М., Ровный С. И., Суслов А. П. Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 1996. № 2. С. 3—10.
4. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Беланова Е. А., Власова Н. В., Орлова В. А., Мартынов К. В. Модификация состава алюмофосфатных стёкол с имитаторами ВАО для повышения их устойчивости. 1. Влияние модификаторов на вязкость и кристаллизационную способность расплавов // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 1 (93). С. 3—15.
5. Шайдуллин С. М., Ремизов М. Б., Козлов П. В., Мелентьев А. Б., Вербицкий К. В., Бендасов Д. И., Ребрин М. А. Новый эвакуируемый малогабаритный плавитель с донным сливом дизайна ФГУП «ПО «Маяк» для отверждения ВАО в боросиликатное стекло // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2021. Т. 10. № 2. С. 183—190. DOI: 10.1134/S230448 X21020097.
6. Ожован М. И., Полуэктов П. П. Применение стекол при иммобилизации радиоактивных отходов // Безопасность окружающей среды, 2010, № 1. — URL: <https://www.atomi-energy.ru/technology/33037> (дата обращения: 30.11.2023)
7. Шайдуллин С. М., Козлов П. В., Ремизов М. Б., Мелентьев А. Б., Бендасов Д. И., Вербицкий К. В., Чермных А. А., Ребрин М. А. Создание на ФГУП «ПО «Маяк» нового плавителя с донным сливом для отверждения ВАО в боросиликатное стекло в рамках нового комплекса остекловывания // Сборник научных трудов IX Национальной научно-технической конференции. Союз машиностроителей России. — М.: Издательский дом «Камертон», 2020. С. 34—38.
8. 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. С. 3—10.
9. Raj K., Prasad K. K., Bansal N. K. Radioactive waste management practices in India // Nuclear Engineering and Design. 2006. Vol. 236. No. 7. Pp. 914—930. DOI: 10.1016/j.nengdes.2005.09.010.
10. Defense Waste Processing Facility. — URL: https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_dwpf.pdf (дата обращения: 23.10.202)
11. Vienna J. Nuclear Waste Vitrification in the United States: Recent Developments and Future Options // International Journal of Applied Glass Science. 2010. Vol. 1. No. 3. Pp. 309—321. DOI: 10.1111/j.2041-1294.2010.0002
12. Grünwald W. KIT-INE's melter operation experience. Institut für Nukleare Entsorgung. Russian-German Workshop on HLLW Vitrification KIT-INE Campus North. April 26—27, 2012.
13. Weisenburger S. Progress in Nuclear Waste Vitrification by Ceramic Melter Technique. JAERI-Conf 99-004. 1999. Pp. 241—251.
14. Шайдуллин С. М., Ремизов М. Б., Беланова Е. А., Чеснокова А. Ю., Козлов П. В., Ромадова С. И. Исследование методом симплексного планирования свойств боросиликатных стекол, разрабатываемых для испытаний малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» // Радиохимия—2022: X Российская конференция с международным участием, Санкт-Петербург, 26—30 сентября 2022 года. — М.: ООО «Месол», 2022. С. 469.
15. НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. — М.: Ростехнадзор, 2015. 22 с.
16. Устройство для остекловывания радиоактивных отходов: пат. на полезную модель № 205723 U1 Российская Федерация, МПК G21F 9/16. № 2020138393 / Козлов П. В., Ремизов М. Б., Зубриловский Е. Н., Мелентьев А. Б., Бендасов Д. И., Вербицкий К. В., Шайдуллин С. М., Чермных А. А., Ребрин М. А.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк». — № 2020138393; заявл. от 23.11.202; опубл. 30.0.2021 Бюл. № 22.
17. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2035 года». — URL: <https://фцп-яrb.рф/> (дата обращения: 01.10.2023).

Информация об авторах

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

Мелентьев Анатолий Борисович, кандидат химических наук, инженер-технолог 1 категории опытно-технологической группы завода 235, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: melentev74@mail.ru

Шайдуллин Сергей Минуллович, начальник группы лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: shaidullin sergey@gmail.com.

Вербицкий Кирилл Владимирович, инженер-технолог 1 категории опытно-технологической группы завода 235, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: kknd.spawn@mail.ru

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

Бендасов Данил Игоревич, начальник группы управления по проектированию и конструированию, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: i_c_e_74@mail.ru

Библиографическое описание статьи

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 джоулевого 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.

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

Remizov M. B., Melentyev A. B., Shaidullin S. M., Verbitsky K. V., Kozlov P. V., Bendasov D. I.

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

Article received on December 14, 2023

The article describes the State of Art in HLW vitrification at the PA Mayak's radiochemical production facility. It presents some conceptual and engineering designs that may further advance the vitrification technology at the enterprise considering various types of liquid HLW. The article discusses the key differences between the promising evacuable small-sized melter and the units previously operated at the enterprise. It overviews its evolution stages and the results of tests run at PA Mayak in 2018–2020 on the prototypes of evacuable small-sized direct Joule-heated melters designed for borosilicate glass melting. The paper overviews a wide range of the implemented studies and the melters' operational experience. It focuses more specifically on the third improved prototype of an evacuable small-sized melter with its designs developed by PA Mayak in 2022 based on the previously tested prototypes.

Keywords: small-sized melter, evacuable melter, melter designed by PA Mayak, borosilicate glass, vitrification, high-level waste, RT-1 plant, federal target program, radioactive waste.

References

1. Zemlyanukhin V. I., Ilyenko E. I., Kondratyev A. N. et al. *Radiokhimicheskaya pererabotka yadernogo topliva AES* [Radiochemical processing of nuclear fuel from nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 280 p.
2. *Underground disposal of radioactive waste*. Basic Guidance. Vienna, IAEA, 1981. 56 p.
3. Glagolenko Yu. V., Dzekun E. G., Drozhko E. G., Medvedev G. M., Rovnyi S. I., Suslov A. P. Strategiya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami na proizvodstvennom ob'yedinenii "Mayak" [Strategy for radioactive waste management at PA Mayak]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 1996, no. 2, pp. 3–10.
4. Kozlov P. V., Remizov M. B., Belanova E. A., Vlasova N. V., Orlova V. A., Martynov K. V. Modifikatsiya sostava alyumofosfatnykh stokol s imitatorami VAO dlya povysheniya ikh ustoychivosti. 1. Vliyaniye modifikator v na vyazkost' i kristallizatsionnyuyu sposobnost' rasplavov [Modifying the Composition of Aluminophosphate Glasses Containing HLW Simulators with a View to Increasing Their Durability. 1. Effect of Modifying Agents on Viscosity and Crystallization Ability of the Melts]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2019, no. 1 (93), pp. 3–15.
5. Shaydullin S. M., Remizov M. B., Kozlov P. V., Melent'ev A. B., Verbitsky K. V., Bendasov D. I., Rebrin M. A. Novyy evakuiruyemyy malogabaritnyy plavitel' s donnym slivom dizayna FGUP "PO "Mayak" dlya otverzhdeniya VAO v borosilikatnoye steklo [New Removable Small Melter Equipped with a Bottom Drain System Developed at the Mayak Production Association for Immobilization of HLW in Borosilicate Glass]. *Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI" — Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 183–190. DOI: 10.1134/S230448 X21020097.
6. Ozhovan M. I., Poluehktov P. P. Primeneniye stekol pri immobilizatsii radioaktivnykh otkhodov. *Bezopasnost' okruzhayushchej sredy — Environmental safety*, 2010, no. 1. — URL: <https://www.atomi-energy.ru/technology/33037> (accessed on: 30.11.2023)
7. Shaydullin S. M., Kozlov P. V., Remizov M. B., Melent'ev A. B., Bendasov D. I., Verbitskiy K. V., Chermnykh A. A., Rebrin M. A. Sozdaniye na FGUP "PO "Mayak" novogo plavitelya s donnym slivom dlya otverzhdeniya VAO v borosilikatnoye steklo v ramkakh novogo kompleksa osteklovyvaniya [New melter with a bottom drain for HLW immobilization into borosilicate glass designed by PA Mayak as part of a new vitrification complex]. *Sbornik nauchnykh trudov IX Natsional'noy nauchno-tekhnicheskoj konferentsii. Soyuz mashinostroiteley Rossii* [Proceedings of the IX National Scientific and Technical Conference. Russian Union of Mechanical Engineers]. Moscow, Publishing house Kamerton Publ., 2020. Pp. 34–38.
8. 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, pp. 3–10.
9. Raj K., Prasad K. K., Bansal N. K. Radioactive waste management practices in India. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, vol. 236, no. 7, pp. 914–930. DOI: 10.1016/j.nengdes.2009.03
10. *Defense Waste Processing Facility*. — URL: https://www.srs.gov/general/news/factsheets/srr_dwpf.pdf (accessed on: 23.10.2023)
11. Vienna J. Nuclear Waste Vitrification in the United States: Recent Developments and Future Options. *International Journal of Applied Glass Science*, 2010, vol. 1, no. 3, pp. 309–321. DOI: 10.1111/j.2041-1294.2010.0002
12. Grünwald W. KIT-INE's melter operation experience. Institut für Nukleare Entsorgung. *Russian-German Workshop on HLLW Vitrification KIT-INE Campus North*. April 26–27, 2012.
13. Weisenburger S. Progress in Nuclear Waste Vitrification by Ceramic Melter Technique. *JAERI-Conf 99-004*. 1999. Pp. 241–251.
14. Shaydullin S. M., Remizov M. B., Belanova E. A., Chesnokova A. Yu., Kozlov P. V., Romadova S. I. Issledovaniye metodom simpleksnogo planirovaniya svoystv borosilikatnykh stekol, razrabatyvayemykh dlya ispytaniy malogabaritnogo plavitelya dizayna FGUP "PO "Mayak" [Properties of borosilicate glasses developed to test a small-sized melter designed by PA Mayak studied by the simplex planning method]. *Radiokhimiya—2022. X Rossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem* [Radiochemistry—2022 20th Russian conference with international participation]. Saint-Petersburg, September 26–30, 2022. Moscow, Mesol Publ., 2022. P. 469.
15. NP-019-15. *Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2015. 22 p.
16. *Ustrojstvo dlya osteklovyvaniya radioaktivnykh otkhodov* [Device for glazing radioactive waste]. Pat. RU No. 205723 Russian Federation. Kozlov P. V., Remizov M. B., Zubrilovskiy E. N., Melent'ev A. B., Bendasov D. I., Verbitskiy K. V., Shaydullin S. M., Chermnykh A. A., Rebrin M. A. Patentee Federal State

Unitary Enterprise “Production Association “Mayak”, No. 2020138393 ; application date 23 .11 .202 ; publication date 30 .0 .2021 Bull. No. 22.
17. Federal'naya celevaya programma “Obespechenie yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti na 2016—2020 gody

i na period do 2035 goda” [The Federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2016—2020 and for the period up to 2035]. — URL: <https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/> (accessed on: 01 .10 .2023

Information about the authors

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

Melentyev Anatoly Borisovich, Candidate of Chemical Sciences, process Engineer of the 1st category of the experimental technological group of the plant 235, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: melentev74@mail .ru

Shaidullin Sergey Minulloovich, Head of the laboratory group for the treatment and conditioning of RAW materials of the Central Factory Laboratory, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Verbitsky Kirill Vladimirovich, process engineer of the 1st category of the experimental technology group of the plant 235, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kknd .spawn@mail .r

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

Bendasov Danil Igorevich, Head of the Design and Construction Management Group, FSUE “PA “Mayak” (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: i_c_e_74@mail .ru

Bibliographic description

Remizov M. B., Melentyev A. B., Shaidullin S. M., Verbitsky K. V., Kozlov P. V., Bendasov D. I. Evacuatable 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. *Radioactive Waste*, 2024, no. 1 (26), pp. 35—46. DOI: 10 .25283/258 -9707-2024-1-35-46. (In Russian).