

УДК 621.039.736

НОВЫЙ ЭВАКУИРУЕМЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПЛАВИТЕЛЬ С ДОННЫМ СЛИВОМ ДИЗАЙНА ФГУП “ПО “МАЯК” ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВАО В БОРОСИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО

© 2021 г. С. М. Шайдуллин^{1,2,*}, М. Б. Ремизов¹, П. В. Козлов^{1,3}, А. Б. Мелентьев¹,
К. В. Вербицкий¹, Д. И. Бендасов¹, М. А. Ребрин¹

¹ ФГУП “ПО “Маяк”, Озерск, Челябинская область, 456784, Россия

² СТИ НИЯУ МИФИ, Северск, Томская область, 636036, Россия

³ ОТИ НИЯУ МИФИ, Озерск, Челябинская область, 456783, Россия

*e-mail: shaidullinsergey@gmail.com

Поступила в редакцию 04.04.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принята к публикации 30.04.2021 г.

В данной статье описано текущее состояние технологии остекловывания высокоактивных отходов на радиохимическом производстве ФГУП “ПО “Маяк”. Рассмотрены концептуальные и технические решения по развитию технологии остекловывания различных видов жидких ВАО на предприятии в краткосрочной и в более длительной перспективе. Описаны проблемы радиохимического производства и их пути решения. Описаны основные технические отличия перспективного эвакуируемого малогабаритного плавителя от установок, эксплуатировавшихся на предприятии ранее. Определена максимальная испарительная способность плавителя по воде, производительность по исходному раствору, содержащему флюсующие добавки (сода и бура) при одновременной дозировке в плавитель сухой стеклофриты. Определены оптимальные условия для слива и остановки слива стекломассы применительно ко второму прототипу плавителя. Установлена работоспособность системы дозировки сухих реагентов и стеклофриты. Проведены два эксперимента по седиментации и сливу металло-сферического порошка, имитирующего дисперсную фазу благородных металлов, содержащихся в ВАО от переработки ОЯТ. Проведена серия из трех сливов, с поступенчатым увеличением вязкости и температуры плавления расплава стекла за счет дозировки стеклофриты без флюсующего раствора. Получены теплофизические данные кладки и изучены электрические параметры работы плавителя. Отработаны системы контроля и управления технологическим процессом. Установлена вязкость и химическая устойчивость используемого состава стекла.

Ключевые слова: боросиликатное стекло, остекловывание, высокоактивные отходы, химическая устойчивость, печь остекловывания

DOI: 10.1134/S2304487X21020097

Одной из наиболее серьезных и трудно решаемых проблем развития ядерной энергетики является проблема изоляции от биосферы большого количества образующихся в результате деления ядер урана радионуклидов [1]. Достаточно сказать, что к концу 90-х годов только в России уже были накоплены радиоактивные отходы суммарной активностью порядка $1.5 \cdot 10^9$ Ки, причем более 90% этого количества составляют радиоактивные отходы, образовавшиеся в результате производства оружейного плутония. Кроме того, к потенциальному источнику радиоактивных отходов следует отнести около 15000 т накопленного к 2004 году ОЯТ атомных электростанций и транспортных реакторов, находящихся в условиях

временного хранения и подлежащих переработке [2, 3].

Известно, что свыше 99% общей активности образующихся продуктов деления концентрируется в жидких ВАО. Согласно нормативам МАГАТЭ жидкие ВАО подлежат отверждению [4]. Основной целью является максимальное 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 реализованы два технологических процесса по иммобилизации ВАО в матрицы на основе стекла. Установки по иммобилизации ВАО в боросиликатные стекла работают во Франции и в Великобритании [5, 6]. В России на

ФГУП «ПО «Маяк» внедрен технологический процесс иммобилизации ВАО в алюмофосфатное стекло [7].

В 2028 году на предприятии планируется создание нового комплекса остекловывания, универсального по составу отверждаемых жидких высокоактивных отходов. В частности, для отверждения жидких ВАО от переработки ОЯТ энергетических реакторов (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, БН-800) предполагается использовать малогабаритные плавители прямого электрического нагрева на боросиликатном стекле [8]. Боросиликатные стекла показывают, что они имеют уникальное сочетание характеристик, которые делают их почти идеальными для этого применения. Боросиликатные стекла, содержащие ядерные отходы, столь же прочны, как и базальты, которым миллионы лет, что свидетельствует об их потенциальной долговечности. Эти стекла демонстрируют свою способность растворять весь спектр ядерных отходов. Они могут сделать это при температурах на сотни градусов ниже тех, которые необходимы для изготовления аналогичных силикатных стекол, не содержащих бор. Например, температура расплава будет поддерживаться на уровне 1150°C, в то время как стекловидные базальты (аналогичные стекла, не содержащие бор) потребуют температуры плавления около 1350°C. При такой высокой температуре ни один из летучих радионуклидов (например, Cs и Ru) не будет удерживаться в стекле [9].

Данные 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 использования значительной части инфраструктуры [8].

Для отверждения прочих типов жидких ВАО предполагается создание печей типа ЭП на алюмофосфатном стекле, в конструкцию которых будет изначально заложена процедура демонтажа после завершения эксплуатации.

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 характеристики отверждаемых отходов [10].

На ФГУП «ПО «Маяк» процесс остекловывания жидких ВАО применяется в промышленном масштабе с 1987 г. Иммобилизация жидких ВАО радиохимического производства в устойчивый матричный материал происходит на неэвакуируемых плавителях прямого электрического нагрева типа ЭП-500. За прошедший период времени на предприятии отработали расчетный срок и бы-

ли выведены из эксплуатации 4 подобные печи. В 2020 г. была остановлена пятая печь ЭП-500/5. В результате работы данных печей за 20 лет (эффективное время эксплуатации оборудования) было отверждено 35000 м³ ЖРО с получением свыше 8000 т высокоактивного алюмофосфатного стекла, содержащего радионуклиды, суммарная активность которых на момент отверждения составляла свыше 800 млн Ки (рис. 1) [11].

С 2023 г. планируется ввод в эксплуатацию шестой промышленной электропечи ЭП-500/6. Проектный срок ее эксплуатации будет составлять 6 лет, производительность по стеклу – до 720 т/год (100 кг/ч), по раствору – 350 л/ч, масса – 130 т, введение флюсующих добавок – в жидком виде.

Электропечь ЭП-500/6 является последним неэвакуируемым плавителем данного типа. Следующие за ней 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 использования значительной части инфраструктуры.

Тем не менее, на радиохимическом производстве остаются актуальными и требуют решения следующие задачи развития технологии остекловывания:

- обеспечение возможности отверждения всех видов образующихся жидких ВАО;
- внедрение технологии, обеспечивающей возврат остеклованных ВАО от переработки зарубежного ОЯТ в страну происхождения;
- переход от неэвакуируемых плавителей к удаляемым установкам.

Указанные задачи должны быть решены в ходе создания нового комплекса остекловывания (НКО), который должен быть запущен в работу ориентировочно в 2028 г. Согласно разработанной концепции нового комплекса остекловывания в его составе предполагается использование эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого электрического нагрева с производительностью по упаренному раствору около 20 л/ч.

Плавитель предназначен для варки боросиликатного стекла, характеризующегося (по сравнению с алюмофосфатным стеклом) рядом преимуществ: значительно большей емкостью по отношению к продуктам деления, химической и радиационной стойкостью, устойчивостью к раскристаллизации [12]. В то же время, боросиликатное стекло отличается более высокой температурой варки (от 1100 до 1200°C).

Плавитель представляет собой малогабаритную печь остекловывания прямого джоулевого нагрева мощностью 250 кВт. Конструкция плавителя

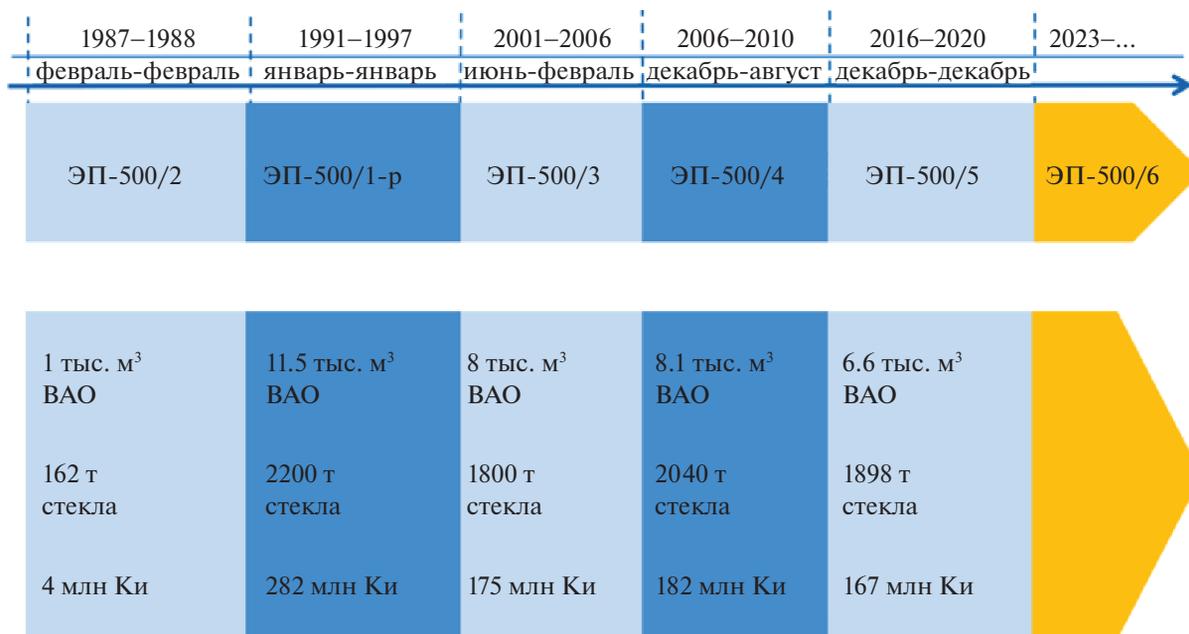


Рис. 1. Результаты эксплуатации печей остекловывания ВАО на ФГУП “ПО “Маяк”.

теля предполагает удаление печи после выработки срока службы в контейнер (транспортно-упаковочный контейнер). Внешний корпус плавителя изготовлен из нержавеющей стали, электроды — из коррозионностойкого хромоникелевого сплава. Охлаждение электродов и пода печи осуществляется осушенным сжатым воздухом.

Варочная огнеупорная ванна плавителя имеет воронкообразную форму, изготовлена из керамических блоков с дополнительной теплоизоляцией (рис. 2).



Рис. 2. Огнеупорный бассейн плавителя.

Плавитель оборудован донным сливным устройством с фильерой, нагреваемой индукционным способом (рис. 3).

Система охлаждения установки индукционного нагрева — водяная, двухконтурная. Остекловывание происходит в процессе расплавления стеклофриты и ее смешения с раствором ВАО. Слив стекломассы в бидон осуществляется при разогреве фильеры. Бидон поджимается к сильфонному компенсатору для исключения загрязнения камеры печи. Остановка слива осуществляется при одновременном отключении индуктора и подаче охлаждающего воздуха в специально организованные полости конструкции.

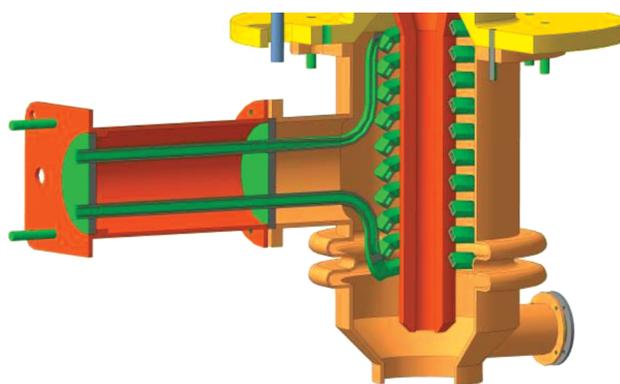


Рис. 3. Донное сливное устройство с фильерой, нагреваемой индукционным способом.

Таблица 1. Состав использованной стеклофриты

| Массовая концентрация оксида элемента, масс. % | | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------|
| SiO ₂ | B ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | Na ₂ O | MgO |
| 44.53 | 21.36 | 3.90 | 4.53 | 25.12 | 0.56 |

В 2015 г. начаты проектные работы по данному плавителю. На настоящий момент уже последовательно создано и испытано два опытных образца с целью отработки основных проектных решений.

С 2018 по 2019 г. испытан первый прототип удаляемого малогабаритного плавителя, за время работы которого был получен значительный массив данных по электрическим и тепловым параметрам плавителя. Отработаны оптимальные электрические и временные параметры работы системы управления электропечи, отработан процесс предварительного (стартового) разогрева рабочего пространства печи с загруженной стеклофритой карбид-кремниевыми нагревателями, исследован процесс варки стекла охлаждаемыми воздухом электродами из хром-никелевого сплава, включая загрузку фритты и замер уровня расплава. Проверена работоспособность всех электродов. Испытаны разные коммутации электродов. Продолжительность работы первого прототипа составила 120 сут.

На основании полученных данных с 2019 по 2020 г. был доработан и испытан второй прототип плавителя. Проведена обкатка всех основных и вспомогательных систем опытного стенда плавителя. Осуществлены мероприятия по сушке кладки и загрузке стеклофриты, разогреву и наплавлению стекломассы.

Определена максимальная испарительная способность плавителя по воде, которая составила 25 дм³/ч. В процессе дозирования контролировали температурные параметры плавителя, температуру газовой фазы, а также проводили визуальные наблюдения за поверхностью расплава через резервную проходку в крышке плавителя. Продолжительность каждого этапа дозирования составляла 12 ч для стабилизации температурных параметров. Эффективность испарительного процесса определяли на основании температурных параметров плавителя (температуры расплава и температуры газовой фазы), а также по площади пятна охлажденного стекла на поверхности расплава.

Определена производительность по исходному раствору, содержащему флюсующие добавки (сода и бура) при одновременной дозировке в плавитель сухой стеклофриты. Производительность при одновременной дозировке солевого

раствора (содержащего 144 г/дм³ соды и 36 г/дм³ буры) и стеклофрите, составила 15 дм³/ч и 10.5 кг/ч соответственно.

Определены оптимальные условия для слива и остановки слива стекломассы применительно ко второму прототипу плавителя.

Установлена работоспособность системы дозировки сухих реагентов и стеклофриты, система обеспечивает дозировку установленных навесок реагентов в установленные промежутки времени.

Проведена серия из трех сливов, с поступенчатым увеличением вязкости и температуры плавления расплава стекла за счет дозировки стеклофриты без флюсующего раствора. Отмечено, что инициация слива занимает более продолжительное время, скорость истечения расплава из сливной фильеры значительно уменьшилась.

Проведены два эксперимента по седиментации и сливу металло-сферического порошка, имитирующего дисперсную фазу благородных металлов, содержащихся в ВАО от переработки ОЯТ. Установлено, что мелкодисперсный порошок достаточно равномерно распределяется в расплаве стекла при сливе, время осаждения и седиментации частиц МСП в плавителе составляет менее 4 ч. Конструкция донного сливного устройства обеспечивает стабильное удаление металлических частиц из плавителя вместе с потоком расплава.

Время остановки слива составило от 2 до 10 мин, основными факторами, влияющими на скорость остановки, являются температура расплава, вязкость стекла и расход охлаждающего воздуха, поступающего на обдув фильеры.

Состав использованной в ходе испытаний стеклофриты представлен в табл. 1.

Для перевода вещества в стеклообразное состояние необходимо это вещество расплавить и путем переохлаждения полученного расплава получить твердое стекло. При этом большую роль играет изменение вязкости расплава в интервале стеклования. Вязкость расплава во многом определяет скорость варки стекла. Скорость растворения и химического взаимодействия компонентов в расплаве и диффузионных процессов тем больше, чем меньше вязкость стекломассы [13]. График зависимости вязкости боросиликатного стекла, приведенного в табл. 1 от температуры представлен на рис. 4.

Вязкость силикатных стекол зависит от прочности химических связей между ионами и степени связности кремнекислородного каркаса [14], поэтому оксиды щелочных металлов и металлов II группы (щелочноземельных MgO, CaO, SrO, BaO и побочной подгруппы: ZnO, CdO) понижают вязкость, причем оксиды Zn, Cd и Pb – сильнее, чем щелочноземельные оксиды, но в области

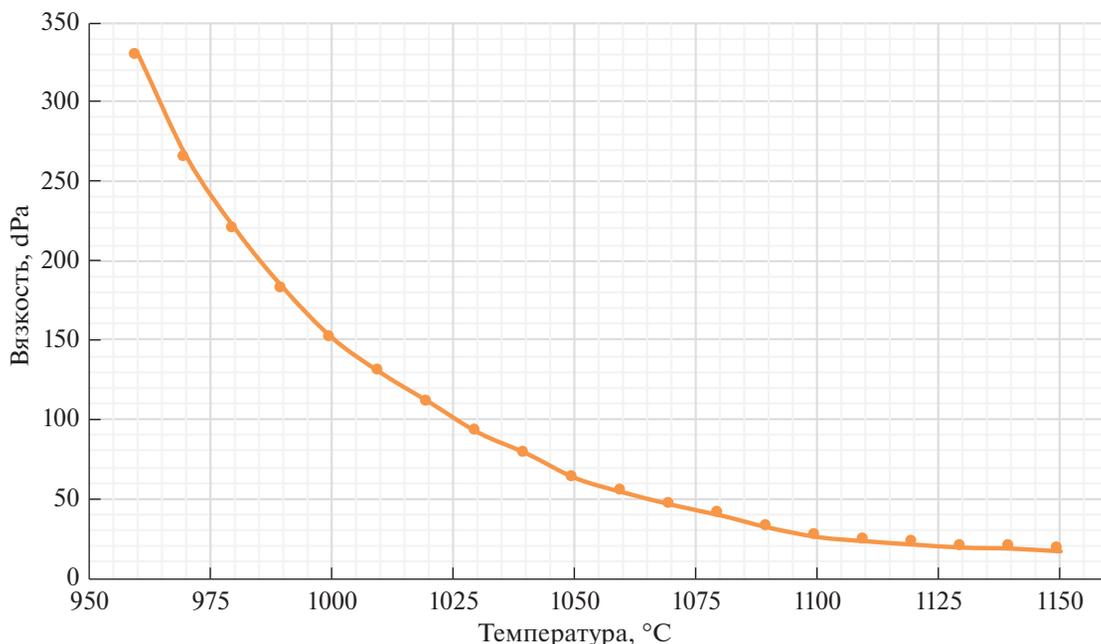


Рис. 4. График зависимости вязкости от температуры.

относительно низких температур их действие неоднозначно. Введение тугоплавких оксидов Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 приводит к повышению вязкости [15]. Согласно [11] вязкость расплавов в рабочем диапазоне выработки стекла от 900 до 1100°C для обеспечения контролируемого слива должна составлять менее 100 ДПа, при этом вязкость в отмеченном диапазоне не должна резко увеличиваться.

В соответствии с ГОСТ Р 52126-2003 [16] используемое стекло исследовали на химическую устойчивость для оценки скорости выщелачивания радионуклидов из образцов, находящихся при длительном контакте с водой. Контактный раствор меняли через 1, 3, 7, 10, 15, 21, 28, 35, 56 и 90 сут от начала опыта. По истечении заданного времени раствор декантировали и анализировали на содержание элементов методом ICP-MS.

Графики зависимостей скорости и степени выщелачивания макрокомпонентов (Na, B) из стекла от времени приведены на рис. 5, 6.

При анализе результатов по выщелачиванию исходили из следующих предположений. Поскольку в нормативных требованиях [17] присутствуют ограничения только по отдельным радионуклидам (^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{239}Pu), то при оценке показателя выщелачивания стабильных элементов группировали их по близости химических свойств с указанными радионуклидами, в частности – по типу и характеристикам связей с другими компонентами в структуре стекла. Исходя из этих сооб-

ражений, натрий близок к цезию, магний – к стронцию.

Из представленных данных видно, что с увеличением массовой доли оксида натрия в боросиликатных стеклах уменьшается их химическая устойчивость.

Скорость выщелачивания натрия и бора уже на 21 сут ниже нормативной величины. Замечено, что поведение бора при выщелачивании идентично поведению натрия.

Таким образом, проведен запуск стенда для проведения испытания конструкции плавителя и отработки технологии варки стекла. Получены теплофизические данные кладки и изучены электрические параметры работы плавителя. Отработаны системы контроля и управления технологическим процессом, охлаждения конструктивных элементов плавителя, загрузки стеклофриты и растворов, слива стекломассы.

Установлено, что используемый состав стекла имеет вязкость от 25 до 100 ДПа в диапазоне температур от 1030 до 1100°C. Приемлемой химической устойчивостью используемое стекло не обладает.

На данный момент идет создание промышленного прототипа, доработанного с учетом проведенных испытаний. Переработана конструкция и материалы огнеупорной кладки печи, узлы подачи стеклофриты и растворов, отдельные элементы систем охлаждения, сливного устройства, контроля уровня расплава и температуры. Испытания нового образца малогабаритного плавителя

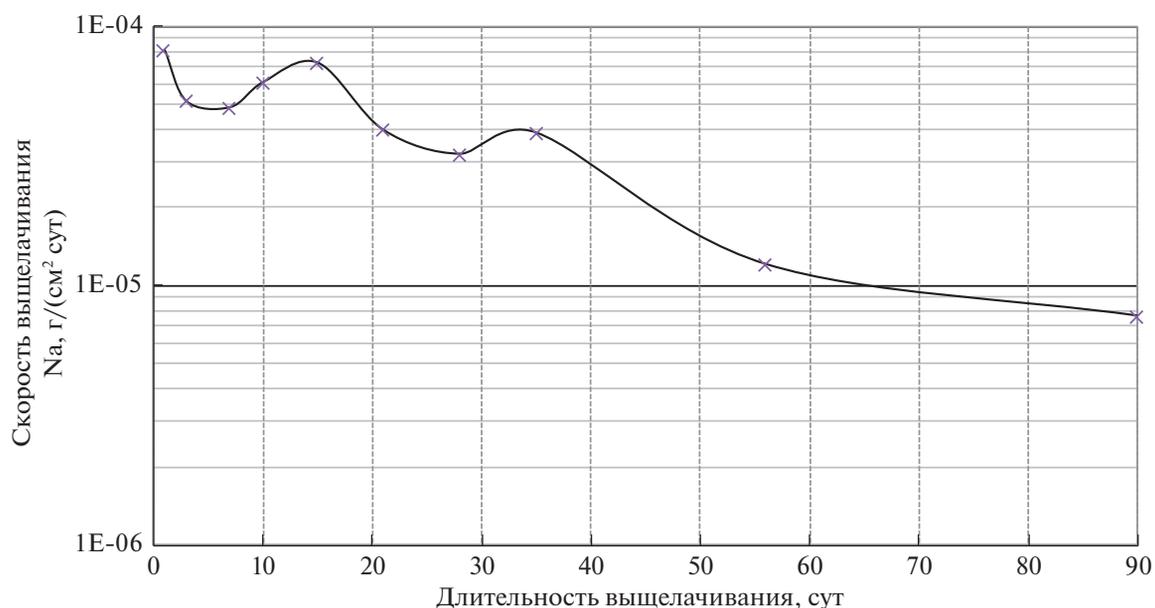


Рис. 5. График зависимости скорости выщелачивания натрия от времени.

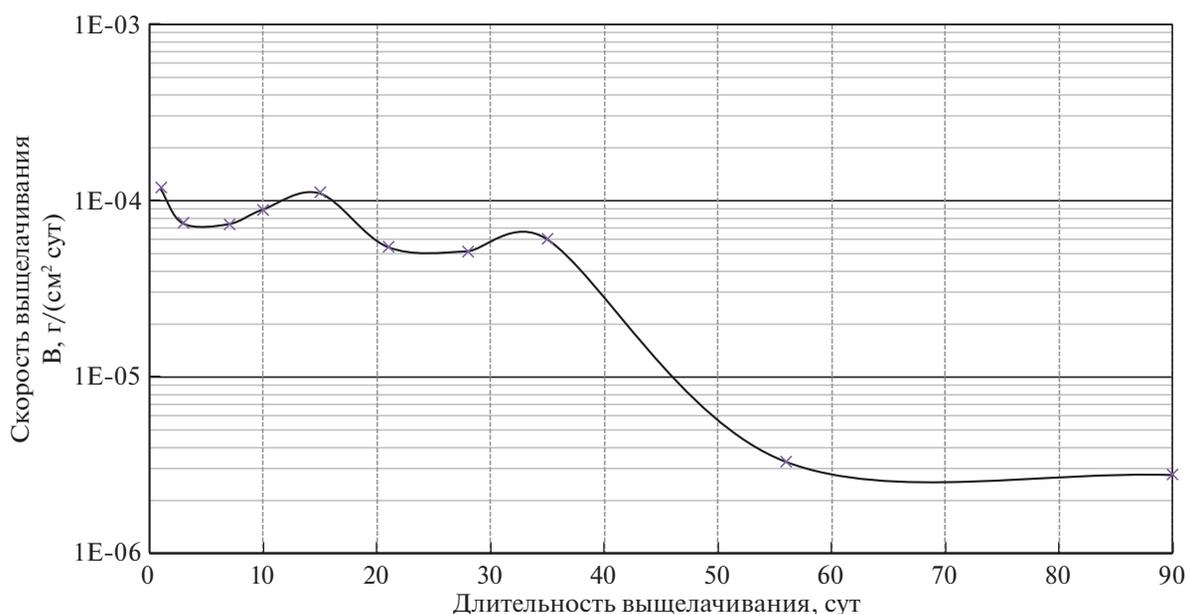


Рис. 6. График зависимости скорости выщелачивания бора от времени.

запланированы на 2022 год. Продолжена разработка состава стекломатрицы с пониженной температурой варки с целью обеспечения ее химической устойчивости требованиям нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Землянухин В.И., Ильенко Е.И., Кондратьев А.Н. и др. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1989. 2-е изд., перераб. и доп. 280 с.
2. Вашман А.А., Демин А.В., Крылова Н.В. и др. Фосфатные стекла с радиоактивными отходами / Под ред. Вашмана А.А., Полякова А.С. М.: ЦНИИ-атоминформ, 1997. 172 с.
3. Солонин М.И. Состояние и перспективы развития ядерного топливного цикла мировой и российской энергетики // Атомная энергия. 2005. Т. 90. Вып. 6. С. 448–459.

4. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Основное руководство. Вена: МАГАТЭ, 1981. 56 с.
5. *Crandall J.L., Krause H., Sombert C., Uematsu K.* High level waste reprocessing and disposal // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1985. V. 48. P. 106–117.
6. Radioactive waste management: a status report. Vienna: IAEA, 1985.
7. *Глаголенко Ю.В., Дзекун Е.Г., Дрожко Е.Г., Медведев Г.М., Ровный С.И., Сулов А.П.* Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении “Маяк” // *Вопросы радиационной безопасности.* 1996. № 2. С. 3.
8. *Шайдуллин С.М., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Вербицкий К.В., Мелентьев А.Б., Бендасов Д.И.* Плавитель с донным сливом для отверждения ВАО в боросиликатное стекло. Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: Материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, 8–12 апреля 2019 г., Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2019. С. 47.
9. *Advocat T., Delayve J.-M., Peugeot S., Pinet O., Deschanel X.* Nuclear glass formulation, structure and properties, in *Nuclear Waste Conditioning, J.-F. Parisot*, Ed. Paris: CEA Saclay and Group Moniteur, 2009. P. 33–49.
10. *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.
11. *Козлов П.В., Ремизов М.Б., Беланова Е.А., Власова Н.В., Орлова В.А., Мартынов К.В.* Модификация состава алюмофосфатных стекол с имитаторами ВАО для повышения их устойчивости. 1. Влияние модификаторов на вязкость и кристаллизационную способность расплавов // *Вопросы радиационной безопасности.* 2019. № 1. С. 3–15.
12. *Алой А.С., Трофименко А.В., Кольцова Т.И., Никандрова М.В.* Физико-химические характеристики остеклованных модельных ВАО ОДЦ ГХК // *Радиоактивные отходы.* 2018. № 4 (5). С. 67–75.
13. *Горшков В.С., Савельев В.Г., Федоров Н.Ф.* Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.
14. *Соболев И.А., Ожован М.И. и др.* Стекла для радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 1999. 240 с.
15. *Дмитриев С.А., Стефановский С.В.* Обращение с радиоактивными отходами: Учебное пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. М., 2000. 125 с.
16. ГОСТ Р 52126–2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003.
17. НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности [Текст]. Введ. 2015–25–06. М.: Ростехнадзор России, 2015. 22 с.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 183–190

New Removable Small Melter Equipped with a Bottom Drain System Developed at the Mayak Production Association for Immobilization of HLW in Borosilicate Glass

S. M. Shaydullin^{a,b,#}, M. B. Remizov^a, P. V. Kozlov^{a,c}, A. B. Melent'ev^a, K. V. Verbitskiy^a,
D. I. Bendasov^a, and M. A. Rebrin^a

^a *Mayak Production Association, Ozersk, Chelyabinskaya oblast, 456784, Russia*

^b *Seversk Institute of Technology, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Seversk, Tomskaya oblast, 636036, Russia*

^c *Ozorsk Institute of Technology, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Ozersk, Chelyabinskaya oblast, 456783, Russia*

[#]*e-mail: shaidullinsergey@gmail.com*

Received April 4, 2021; revised April 29, 2021; accepted April 30, 2021

Abstract—The current status of the technology for vitrification of high-level waste at the Radiochemical Plant of the Mayak Production Association has been described. Conceptual and technical solutions related to development of the technology for vitrification of different types of liquid HLW at the Mayak Production Association in the short and long terms have been considered. Problems of the Radiochemical Plant and their possible solutions, as well as main technical differences of the promising removable small-size melter from facilities used at the Mayak Production Association earlier, have been described. The maximum water evaporation capacity of the melter and its production capacity have been determined in terms of initial solution containing fluxing additives (sodium carbonate and borax) at simultaneous feeding of dry glass frit into the melter. The optimal conditions have been identified for molten glass discharge and for stopping the glass flow discharge for the second melter prototype. The performance of the system for dosing dry reacting agents and glass frit has been tested. The study includes two experiments on sedimentation and discharge of spherical

metal powder simulating the disperse phase of noble metals, which are contained in HLW resulted from SNF reprocessing. A series of three discharge procedures characterized by a stepwise increase in the viscosity and temperature of glass melting by means of feeding the glass frit without fluxing solution have been performed. The thermophysical characteristics of the brickwork and studied electric parameters of the melter operation have been obtained. Process monitoring and control systems have been developed. The viscosity and chemical stability of the applied glass composition have been determined.

Keywords: borosilicate glass, vitrification, high-level waste, chemical stability, vitrification melter

DOI: 10.1134/S2304487X21020097

REFERENCES

- Zemlyanukhin V.I., Il'enko Ye.I., Kondrat'ev A.N. et al., *Radiokhimicheskaya pererabotka yadernogo topliva AES* [Radiochemical Reprocessing of Nuclear Fuel from NPPs], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 280 p.
- Vashman A.A., Dyomin A.V., Krylova N.V. et al., *Fosfatnyye styokla s radioaktivnymi otkhodami* [Phosphate Glasses Containing Radioactive Waste], Moscow, TcNIAtominform Publ., 1997, 172 p.
- Solonin M.I., Sostoyaniye i perspektivy razvitiya yadernogo toplivnogo tsikla mirovoy i rossiyskoy energetiki [Status of and prospects for the development of a nuclear fuel cycle for nuclear power worldwide and in Russia], *Atomnaya energiya*, 2005, vol. 90, no. 6, pp. 448–459. (in Russian).
- Underground Disposal of Radioactive Waste: Basic Guidance (Russian version), Vienna, IAEA Publ., 1981, 56 p.
- Crandall J.L., Krause H., Sombert C., Uematsu K., High level waste reprocessing and disposal, *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 1985, vol. 48, pp. 106–117.
- Radioactive Waste Management: A Status Report, Vienna, IAEA Publ., 1985.
- Glagolenko Yu.V., Dzekun Ye.G., Drozhko Ye.G., Medvedev G.M., Rovnyi S.I., Suslov A.P., Strategiya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami na proizvodstvennom obyedineniyi Mayak [Strategy for radioactive waste management at the Mayak PA], *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 1996, no. 2, pp. 3 (in Russian).
- Shaydullin S.M., Kozlov P.V., Remizov M.B., Verbitskiy K.V., Melent'ev A.B., Bendasov D.I. [Melter equipped with bottom drain for immobilization of HLW in borosilicate glass], *Aktual'nyye problemy innovatsionnogo razvitiya yadernykh tekhnologiy: Materialy konferentsii v ramkakh Nauchnoy sessii NIYaU MIFI* [Current problems of Innovative Development of Nuclear Technologies: Proceedings of the conference in the framework of scientific session of NRNU MEPhI], Seversk, SIT NRNU MEPhI Publ., 2019, p. 47 (in Russian).
- Advocat T., Delaye J.-M., Peugeot S., Pinet O., Deschanel X., Nuclear glass formulation, structure and properties, *Nuclear Waste Conditioning*, Paris, CEA Saclay and Group Moniteur Publ., 2009, pp. 33–49.
- Batorshin G.Sh., Remizov M.B., Kozlov P.V., Logunov M.V., Kustov S.V., Tekhnologiya pererabotki yadernogo naslediya FGUP PO Mayak – nakoplenykh vysokoaktivnykh geterogennykh otkhodov [Technology for reprocessing the Mayak PA nuclear legacy, i.e. accumulated heterogeneous high-level waste], *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 2015, no. 1, pp. 3–10 (in Russian).
- Kozlov P.V., Remizov M.B., Belanova Ye.A., Vlasova N.V., Orlova V.A., Martynov K.V., Modifikatsiya sostava alyumofosfatnykh styokol s imitatorami VAO dlya povysheniya ikh ustoychivosti. 1. Vliyaniye modifikatorov na vyazkost' i kristallizatsionnyuyu sposobnost' rasplavov [Modification of composition of aluminophosphate glasses containing HLW simulators for increasing their durability. 1. Impact of modifiers on viscosity and crystallization ability of glass melts], *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 2019, no. 1, pp. 3–15 (in Russian).
- Aloy A.S., Trofimenko A.V., Kol'tsova T.I., Nikandrova M.V., Fiziko-khimicheskiye kharakteristiki osteklovannykh otkhodov VAO ODTs GKKhK [Physical and chemical characteristics of vitrified simulated HLW from the Pilot Demonstration Center of the Siberian Chemical Combine], *Radioaktivnyye otkhody*, 2018, no. 5, pp. 67–75 (in Russian).
- Gorshkov V.S., Savel'ev V.G., Fyodorov N.F., *Fizicheskaya khimiya silikatov i drugikh tugoplavkikh soyedineniy* [Physical chemistry of silicates and other compounds with high melting point], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 400 p.
- Sobolev I.A., Ozhovan M.I. et al., *Styokla dlya radioaktivnykh otkhodov* [Glasses for radioactive waste], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1999, 240 p.
- Dmitriyev S.A., Stefanovskiy S.V., *Obrashcheniye s radioaktivnymi otkhodami: Uchebnoye posobiye* [Radioactive waste management: Study guide], Moscow, Mendeleev RChTU Publ., 2000, 125 p.
- GOST R 52126-2003. Otkhody radioaktivnyye. Opredeleniye khimicheskoy ustoychivosti otverzhdyonnykh vysokoaktivnykh otkhodov metodom dlitel'nogo vyshchelachivaniya* [State Standard R 52126-2003. Radioactive waste. Determination of chemical stability of solidified high-level waste by the method of long-term leaching], Moscow, Gosstandart Rossii: Izdatelstvo standartov, 2003.
- NP-019-15. Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Rules and regulations 019-15. Collection, reprocessing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements], Moscow, Rosstekhnadzor Rossii Publ., 2015, 22 p.