



ОРГАНИЗАЦИЯ АО «ТВЭЛ»

**Акционерное общество
«Высокотехнологический научно-
исследовательский институт
неорганических материалов имени
академика А.А. Бочвара»
(АО «ВНИИНМ»)**

ул. Рогова, д. 5а, Москва, 123098
Телефон: (499) 190-89-99,
E-mail: vniinm@rosatom.ru
ОКПО 07625329, ОГРН 5087746697198
ИНН 7734598490, КПП 775050001

Отзыв

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Кашеева Владимира Александровича на диссертационную работу Шайдуллина Сергея Минулловича «Легкоплавкое боросиликатное стекло для отверждения жидких высокоактивных отходов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Актуальность темы исследования

Развитие атомной энергетики и ядерной технологии в целом направлено на решение проблем ядерного топливного цикла, одной из которых является обращение с радиоактивными отходами (РАО). Согласно Федеральному закону об использовании атомной энергии № 170-ФЗ, РАО – это ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается. При этом наиболее сложным и важным представляется вопрос обращения с жидкими РАО с высокой удельной активностью (ВАО), подлежащими долговременному безопасному хранению и захоронению.

В России на ближайшие 25 лет принята программа строительства новых атомных электростанций как внутри страны, так и за рубежом. Однако существенным препятствием на пути развития атомной энергетики по-прежнему является высокая стоимость, технологическая сложность и

экологическая (радиационная) опасность обращения с РАО. Возникает необходимость разработки мероприятий по изоляции РАО от окружающей среды в течение длительного времени и стремление сократить срок обслуживания хранилищ, что требует перевода радионуклидов и других биологически опасных компонентов отходов в твердые формы.

К 2028 г. ФГУП «ПО «Маяк» планирует запустить новый универсальный комплекс остекловывания жидких ВАО. Для отверждения части жидких ВАО от переработки ОЯТ энергетических реакторов (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, БН-800) предполагается использовать новый малогабаритный плавитель прямого электрического нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк». С учетом технологических особенностей процесса остекловывания на данном плавителе необходимо разработать состав легкоплавкого боросиликатного стекла, которое с одной стороны должно удовлетворять существующим нормативным требованиям (изложенным в НП-019-2015), а с другой – имело бы необходимые температурно-вязкостные характеристики для обеспечения управляемого слива стекла через индукционно обогреваемое донное сливное устройство при температуре от 950 до 1150 °С.

Диссертационная работа Шайдуллина Сергея Минулловича посвящена весьма важной задаче – разработке боросиликатного стекла, предназначенного для иммобилизации жидких ВАО от переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) атомных электростанций. Таким образом, исследования, направленные на разработку химически устойчивых легкоплавких боросиликатных стекол, обеспечивающих изолирование от окружающей среды наиболее долгоживущих и биологически опасных радионуклидов в течение времени, требуемого для снижения их активности до приемлемого уровня, являются актуальными.

Структура и анализ работы

Диссертационная работа изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 47 таблиц, 7 приложений, состоит из введения,

пяти глав, заключения и списка литературы.

Цель диссертационной работы – это разработка состава и технологии синтеза боросиликатного стекла, пригодного для отверждения, безопасного контролируемого хранения и захоронения остеклованных ВАО. Задачи исследований в достаточной степени раскрывают пути и методы достижения цели диссертационной работы. Положения диссертации, выносимые на защиту, соответствуют цели и задачам, отражают новизну и практическую значимость исследований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной тематики, указаны объект и предмет исследования, определена степень разработанности темы. Сформулирована цель диссертационной работы, основные задачи, представлена научная новизна. Показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования, использованные в работе. Изложены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и приведены сведения об апробации диссертационной работы.

В **первой главе** приведен аналитический обзор научно-технической литературы по теме диссертационного исследования. Рассмотрено обращение с РАО методом остекловывания с применением алюмофосфатных и боросиликатных стекол. Приведены важнейшие нормативные и технологические требования к остеклованным формам отходов, описаны технологии и оборудование для переработки РАО методом остекловывания. Рассмотрен состав нового комплекса остекловывания ФГУП «ПО «Маяк». Описана конструкция малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк», приведены его характеристики.

Во **второй главе** описаны основные методы исследования и сырьевые материалы для синтеза боросиликатных стекол, приведено используемое лабораторное оборудование. В ней представлены методики изготовления исследуемых образцов боросиликатных стекол и проведения экспериментов по определению водоустойчивости.

В **третьей главе** представлены результаты исследований составов боросиликатных стекол первой, второй, третьей и четвертой серий, на основании которых, приведена принципиальная схема технологического процесса иммобилизации жидких ВАО в разработанное легкоплавкое боросиликатное стекло.

В **четвертой главе** представлены результаты исследований коррозионных повреждений конструкционных материалов стекловаренной печи (огнеупоров, бетона шамотного, хром-никелевого сплава и нержавеющей стали) при взаимодействии с расплавами стекол.

В **пятой главе** приведены результаты отработки технологии варки боросиликатного стекла в полупромышленном масштабе на стендовой установке.

Текст диссертации изложен логично и последовательно. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Научная новизна

Впервые определена граница области легкоплавких составов системы $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{X}$ ($\text{X} = \text{Al}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{CaO}, \text{TiO}_2, \text{Li}_2\text{O}, \text{SrO}, \text{Cs}_2\text{O}, \text{ZrO}_2, \text{MoO}_3, \text{La}_2\text{O}_3, \text{CeO}_2, \text{Nd}_2\text{O}_3, \text{NiO}, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$), имеющих высокую водоустойчивость при 25 °С, термическую и кристаллизационную стойкость, механическую прочность, и по совокупности свойств обеспечивающих безопасное хранение и захоронение образующегося стеклоподобного компаунда.

Установлено, что неупорядоченная сетка стеклообразной части образцов боросиликатных стекол, содержащих от 0,2 до 20,2 (мас. %) компонентов имитаторов ВАО, характеризуется высокой химической однородностью и состоит из симметричных и тетраэдрических боратных единиц и алюминатных тетраэдров. Определенная часть боратных структурных единиц, объединена в боратные надструктурные группировки с одним тетраэдром. Замена Na_2O на оксиды щелочных или щелочноземельных металлов, при условии постоянства суммарного содержания модифицирующих оксидов в

составе стекла, приводит к определенному перераспределению модифицирующих катионов между боратными структурными единицами и не приводит к каким-либо значимым изменениям в строении неупорядоченной сетки стекла.

Экспериментально определено, что расплав синтезированного легкоплавкого боросиликатного стекла состава, мас. %: $47,8\text{SiO}_2 - 15,1\text{Na}_2\text{O} - 14,7\text{B}_2\text{O}_3 - 22,4\text{X}$ ($\text{X} = 2,5\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,8\text{MgO} - 4,2\text{CaO} - 1,0\text{TiO}_2 - 2,8\text{Li}_2\text{O} - 1,3\text{SrO} - 0,8\text{Cs}_2\text{O} - 1,6\text{ZrO}_2 - 1,4\text{MoO}_3 - 0,4\text{La}_2\text{O}_3 - 1,8\text{CeO}_2 - 1,5\text{Nd}_2\text{O}_3 - 0,2\text{NiO} - 0,3\text{Cr}_2\text{O}_3 - 0,9\text{Fe}_2\text{O}_3$) обладает пониженным коррозионным воздействием на бадделеитокорундовый и хромалюмоцирконовый огнеупоры, бетон шамотный, которые используются для варочных зон электрических печей; на сплав ХН70Ю и сталь 12Х18Н10Т, из которых выполнены электроды и сливная фильера, газоходы, обечайка, токоподводы, корпус и прочее периферийное оборудование малогабаритного плавителя.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты дополняют и обобщают имеющиеся в научно-технической литературе данные о свойствах боросиликатных стекол, содержащих имитаторы компонентов ВАО, и их коррозионном воздействии на конструкционные материалы стекловаренной печи. Результаты работы могут быть использованы в качестве справочного материала при исследовании боросиликатных стекол. Предложенная математическая модель может применяться для оценки физико-химических свойств боросиликатных стекол, обеспечивающих безопасное хранение образующегося стеклоподобного компаунда, и разработки технических решений по их усовершенствованию. Полученная информация о границах области легкоплавких составов боросиликатных стекол, а также об их коррозионном воздействии на конструкционные материалы стекловаренной печи является необходимой основой для дальнейшей эксплуатации малогабаритного плавителя в составе нового комплекса остекловывания жидких ВАО на ФГУП «ПО «Маяк».

Разработанный легкоплавкий состав боросиликатного стекла,

соответствующий нормативным (НП-019-2015) и технологическим требованиям, обусловленными конструкцией установки остекловывания, может быть использован для отверждения жидких ВАО от переработки ОЯТ в стеклоподобный компаунд на ФГУП «ПО «Маяк».

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность научных результатов и выводов по работе обеспечена использованием комплекса современных методов исследований и высокотехнологического оборудования. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается согласованностью полученных данных с экспериментальными исследованиями и апробацией на промышленном оборудовании. Полученные результаты соответствуют современному международному и российскому уровню научных работ по данной тематике и хорошо согласуются с научными наработками, научными представлениями и работами авторских коллективов основных научных школ по данному направлению.

По материалам диссертации опубликовано 44 научных работы, из них 9 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 7 статей в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus. Получен патент РФ на полезную модель. По совокупности представленные публикации полностью отражают основное содержание диссертационной работы Шайдуллина С.М.

Таким образом, достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов основана на большом экспериментальном материале и сомнений не вызывает.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации Шайдуллина С.М. соответствует паспорту научной специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Вопросы

1. Каким видом ядерного топлива обусловлен выбор компонентов имитатора ВАО?

2. Одним из требований НП-019-2015 является газовыделение. Почему в данной диссертационной работе этот показатель не исследовался?

Замечания

1. Для более удобного сопоставления составов боросиликатных стекол, таблицы 2.3 и 2.4 следовало бы привести в одном стиле.

2. Стоит отметить, что обнаруживаются опечатки, технические несогласования и стилистические погрешности.

Рекомендации

1. Для окончательного внедрения разработанного легкоплавкого состава боросиликатного стекла для малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» в составе нового комплекса остекловывания, необходимо исследовать его радиационную устойчивость, то есть сохранение свойств стеклокомпаунда, в том числе однородности, прочности и водоустойчивости, в соответствии с показателями, установленными НП-019-2015, при воздействии ионизирующего излучения, обусловленного включаемыми радионуклидами.

2. Наличие благородных металлов в высокоактивных отходах является существенной проблемой для установок остекловывания, решение которой может значительно увеличить срок эксплуатации дорогостоящего оборудования. Поэтому, рекомендую провести экспериментальные работы по седиментации благородных металлов в малогабаритном плавителе. В качестве модельной системы благородных металлов можно использовать систему рутений-палладий, которую использовали при разработке технологии остекловывания и обоснования конструкции германского плавителя VEK.

Заключение

Высказанные выше замечания и рекомендации носят не принципиальный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Шайдуллина Сергея Минулловича, которая

выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне с использованием современных физико-химических методов исследований. Актуальность работы, а также ее научная новизна и практическая значимость не вызывают сомнений.

Выводы работы соответствуют поставленным задачам. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Совокупность представленных в работе результатов, теоретических положений и выводов позволяет квалифицировать ее как работу, в результате которой решена научная задача, имеющая важное техническое значение. Результаты работы могут быть использованы в организациях атомной промышленности, занимающихся совершенствованием и разработкой современных методов обращения с радиоактивными отходами: ФГУП «ПО «Маяк» (г. Озерск), АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск), ФГУП «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск), ФГУП «Радон» (г. Москва). Представленные в работе материалы могут быть использованы в учебном процессе при подготовке методических указаний, учебных пособий и монографий в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», а также при разработке технологий и материалов в АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (г. Москва), АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (г. Санкт-Петербург).

Таким образом, можно сделать вывод, что диссертационная работа

Шайдуллина С.М. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту научной специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов по направлению технические науки и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней во ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шайдуллин Сергей Минуллович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора – директор отделения АО «ВНИИНМ»


_____/Кашеев Владимир Александрович/19.05.2025

Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара».

Адрес: 123098, Россия, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а.

E-mail: VIKascheev@bochvar.ru; kannal7@mail.ru

Телефон: +7-903-550-00-50.

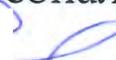
Подпись кандидата физико-математических наук Кашеева В.А. заверяю,
Первый заместитель генерального
директора – директор по развитию
АО «ВНИИНМ»,

кандидат технических наук



Перцев А.А.

Я, Кашеев Владимир Александрович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе.


_____/Кашеев Владимир Александрович/19.05.2025