

УДК 621.039.736

EDN RDMCXY

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БОРОФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ С ВКЛЮЧЕНИЕМ LiCl КАК ИМИТАТОРА ОТРАБОТАННОГО СОЛЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

Д.Ю. Сунцов¹, А.И. Тучкова¹, С.А. Якунин¹, М.И. Власов²

¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

²Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН), Екатеринбург

В лабораторных условиях разработан борофосфатный стекломатериал для иммобилизации отработанного электролита операции «металлизации» пирохимического передела МП ОДЭК. Разработан, изготовлен и испытан прототип устройства приема-передачи отработанного электролита. Подтверждена возможность переработки отработанного электролита операции «металлизации» пирохимического передела на полномасштабном макете опытно-промышленной установки ИПХТ с применением разработанного прототипа устройства приема-передачи отработанного электролита. Определены показатели качества полученных борофосфатных стекломатериалов, которые соответствуют требованиям нормативной документации.

Ключевые слова: РАО пирохимической переработки, остекловывание, хлоридные РАО, ИПХТ, электронная микроскопия, химическая устойчивость, гидrolитическая устойчивость, вязкость расплава, хлористый водород, модуль Юнга, внутреннее трение, температуропроводность, рамановская спектроскопия.

INVESTIGATION OF THE OF BOROPHOSPHATE GLASS PROPERTIES WITH THE INCLUSION OF LiCl AS A SIMULATOR OF SPENT SALT ELECTROLYTE AFTER PYROCHEMICAL PROCESSING OF SNF

D.Y. Suntsov¹, A.I. Tuchkova¹, S.A. Yakunin¹, M.I. Vlasov²

¹JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

²Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IVTE Ural Branch RAS), Yekaterinburg

In laboratory conditions, a boron phosphate glass material has been developed for the immobilization of the spent electrolyte from the “metallization” operation of the pyrochemical processing section of MP ODEK. A prototype device for receiving and transmitting spent electrolyte has been developed, manufactured and tested. The possibility of processing the spent electrolyte from the “metallization” operation of the pyrochemical processing stage on a full-scale mock-up of a pilot industrial installation of the ICP using the developed prototype of a device for receiving and transmitting spent electrolyte has been confirmed. The quality indicators of the obtained boron phosphate glass materials, which meet the requirements of regulatory documentation, have been determined.

Key words: RW from pyrochemical processing, vitrification, chloride RW, IMCC, electron microscopy, chemical stability, hydrolytic stability, melt viscosity, hydrogen chloride, Young's modulus, internal friction, thermal diffusivity, Raman spectroscopy.

Введение

Основным источником РАО, образующихся при пирохимической переработке ОЯТ, является отработанный электролит на основе хлоридов щелочных металлов.

В ранее проведенных в АО «ВНИИНМ» работах было показано, что величина включения хлоридов, содержащихся в отработанном электролите, лимитируется содержанием в нем хлорида лития, который по сравнению с другими хлоридами щелочных металлов имеет наименьшую растворимость в фосфатных расплавах.

Так, для отработанного электролита на основе эвтектического расплава $(3Li,2K)Cl$ было определено, что величина его включения в борофосфатное стекло не должна превышать 5%.

Превышение указанной величины приводит к нарушению однородности конечного стеклоблока и образованию на его поверхности легко-растворимой фазы.

В соответствии с последними изменениями в технологической схеме обращения с РАО, образующимися при пирохимической переработке ОЯТ при проведении операции электрохимического восстановления до металла целевых компонентов (U, Pu, Np, Am и Cm), содержащихся в таблетках окисленного ОЯТ, будет использоваться расплав электролита на основе $LiCl-Li_2O$.

При разработке метода кондиционирования электролита на основе $LiCl$ были учтены недостатки, выявленные по результатам ранее проведенных работ по иммобилизации электролита на основе эвтектики $(3Li,2K)Cl$. Принят процент включения 5 мас. %.

Помимо этого, также было обращено внимание на более высокую температуру плавления этого электролита (600 °C) по сравнению с электролитом на основе эвтектического расплава $(3Li,2K)Cl$, имеющим температуру плавления 350 °C.

Получение борофосфатного стекла

Синтез имитатора отработанного электролита проводили путем плавления при температуре 650 °C смеси, состоящей из хлоридов Li, Sr и Ba.

Борофосфатное стекло получали из шихты, состоящей из имитатора электролита и стеклообразующих компонентов, при температуре 950 °C. Проведенный рентгенофазовый анализ

(рис. 1.) показал отсутствие образования каких-либо кристаллических фаз при медленном охлаждении выбранного для иммобилизации электролита на основе хлорида лития состава борофосфатного стекла.

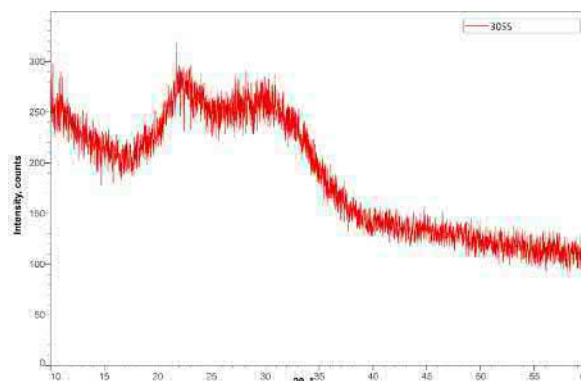


Рис. 1 – Рентгенограмма образца борофосфатного стекла с электролитом

В ходе технологических испытаний на опытно-промышленной установке ИПХТ синтезировано борофосфатное стекло подобранный состава и исследованы его следующие физико-химические характеристики:

- вязкость расплава;
- гидролитическая устойчивость конечного стекла;
- однородность (равномерность распределения основных компонентов стекломатрицы по объему стеклоблока);
- унос хлорид-ионов.

В технологической схеме процесса пирохимической переработки ОЯТ предполагается, что по мере насыщения используемого в этом процессе электролита продуктами деления он будет частично выводиться из электролизера для очистки с последующей рециркуляцией или поступать в виде РАО для иммобилизации методом остекловывания.

Удаление расплавленного электролита предполагается осуществлять путем его перекачивания из основного аппарата по обогреваемому трубопроводу в приемную емкость (бидон), которая затем будет перемещена в камеру с находящейся там установкой ИПХТ.

Одним из необходимых условий проведения процесса остекловывания является необходимость в предварительном смешении отверждаемых РАО с нужными для получения стекольного расплава флюсующими добавками.

В используемых и разработанных к настоящему времени аппаратах для смешения и дозировки компонентов стеклообразующей шихты

необходимые для ее получения исходные материалы должны быть в виде гранул или порошка.

Одним из вариантов организации дозирования отработанного электролита является сухое дозирование предварительно гранулированного или измельченного в порошок продукта. Проработка этого варианта с применением выпускаемых промышленностью аппаратов показала наличие сложных технических проблем, как общих, так и для реализации в радиохимическом исполнении; кроме того, технологичность данного подхода вызывает сомнения в связи с необходимостью введения дополнительных высокотемпературных стадий в технологическую схему.

Поэтому было разработано, изготовлено и испытано экспериментальное устройство приема и передачи отработанного электролита для выработки принципа его передачи и дозирования в холодный тигель при остекловывании.

Устройство, представляющее собой передвижную электропечь с металлическим контейнером и сливным устройством, показано на рис. 2. Электропитание устройства осуществляли при использовании регулятора мощности «Термолюкс 010».

Предварительные испытания устройства приема и передачи отработанного электролита проводили с целью:

- определения режимов плавки смеси хлоридов (имитатора отработанного электролита);
- проверки работоспособности сливного устройства;
- принципиальной возможности массового дозирования расплава имитатора отработанного электролита в холодный тигель для последующего остекловывания;
- определения технологических параметров массового дозирования расплава имитатора.



а)



б)



в)



Рис. 2. Устройство приема и передачи отработанного электролита: печь (а), регулятор мощности (б), внутренний контейнер для расплава электролита (в)

Имитатор массой 2 кг был приготовлен непосредственно в устройстве приема и передачи отработанного электролита.

В процессе предварительных экспериментов устройство приема и передачи прошло успешные испытания при синтезе имитатора

отработанного электролита и массовой выдачи его в контейнер. Процесс слива представлен на рис. 3. а параметры – в таблице 1. Средняя скорость подачи имитатора электролита составила 35 г/с.



Рис. 3. Процесс слива из устройства приема и передачи имитатора электролита

Таблица 1

Параметры слива электролита

Время открытия сливного устройства, с	Масса слитого имитатора электролита, г
1	35
2	70
45	1580

Одновременно с этим были зафиксированы некоторые замечания. Первая версия внутреннего контейнера была изготовлена из тонколистовой нержавеющей стали, которая в процессе нагрева коробилась, а верхняя часть подвергалась коррозии. Поэтому для дальнейших испытаний внутренний контейнер был переделан и изготовлен более надежным из толстостенной нержавеющей стали.

Для проведения экспериментов на полномасштабном макете опытно-промышленной установки ИПХТ он был модернизирован с целью организации массовой подачи расплава имитатора отработанного электролита и массовой подачи сухих стеклообразующих добавок. Внешний вид модернизированной установки представлен на рис. 4–7.

Мнемосхема дозирующего комплекса представлена на рис. 8, а технические характеристики опытно-промышленной установки ИПХТ – в таблице 2.

Модернизация установки заключается в добавлении узла, обеспечивающего разогрев до температуры плавления и дозирование имитатора отработанного электролита. Состав узла:

- устройство приема и передачи электролита;
- регулятор температуры;
- сливной шток с приводом;
- вытяжная вентиляция;
- труба подачи расплавленного электролита в ИПХТ;
- шкаф управления дозирующим комплексом;
- радарный уровнемер.



Рис. 4. Модернизированная установка ИПХТ. Шкаф управления

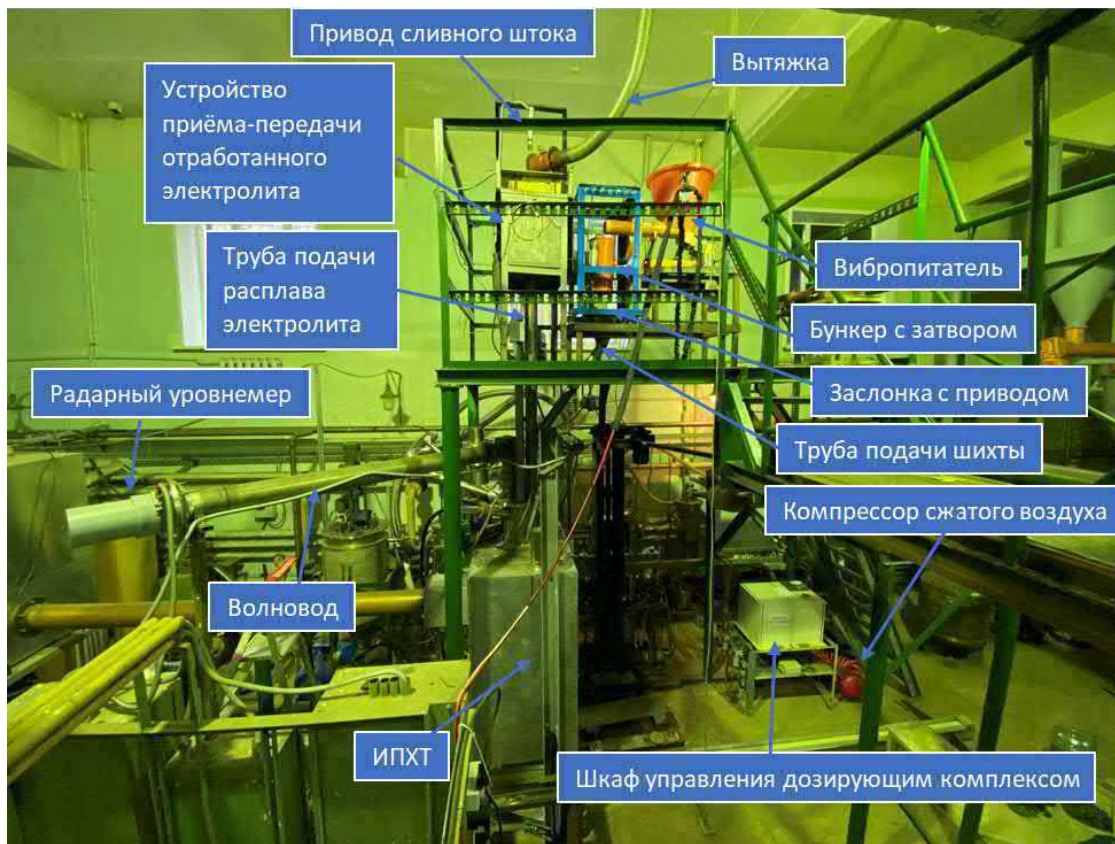


Рис. 5. Модернизированная установка ИПХТ. Общий вид

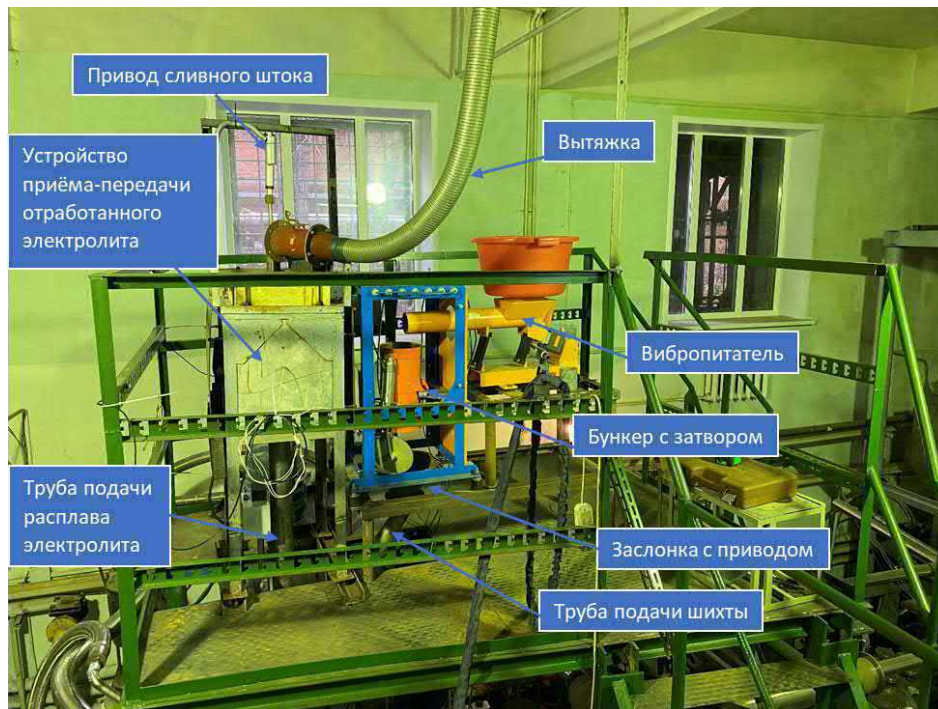


Рис. 6. Модернизированная установка ИПХТ. Узел дозирования электролита

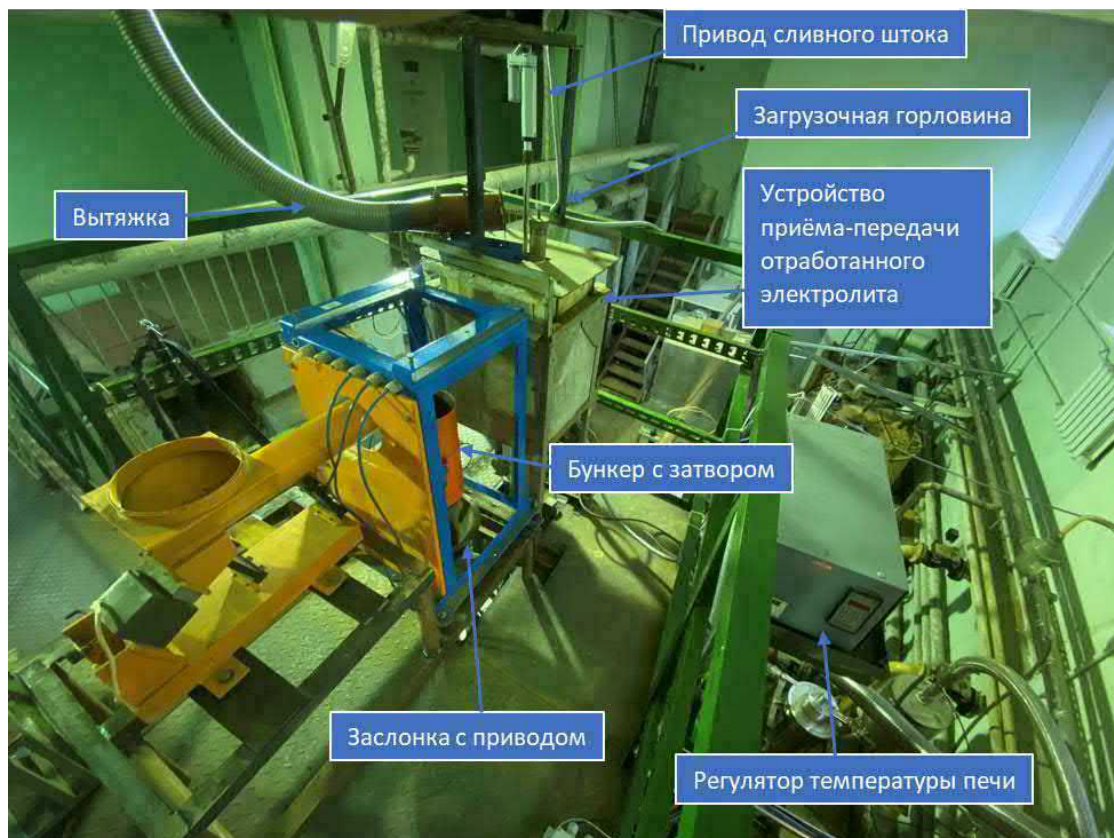


Рис. 7. Модернизированная установка ИПХТ. Устройство приема и передачи отработанного электролита

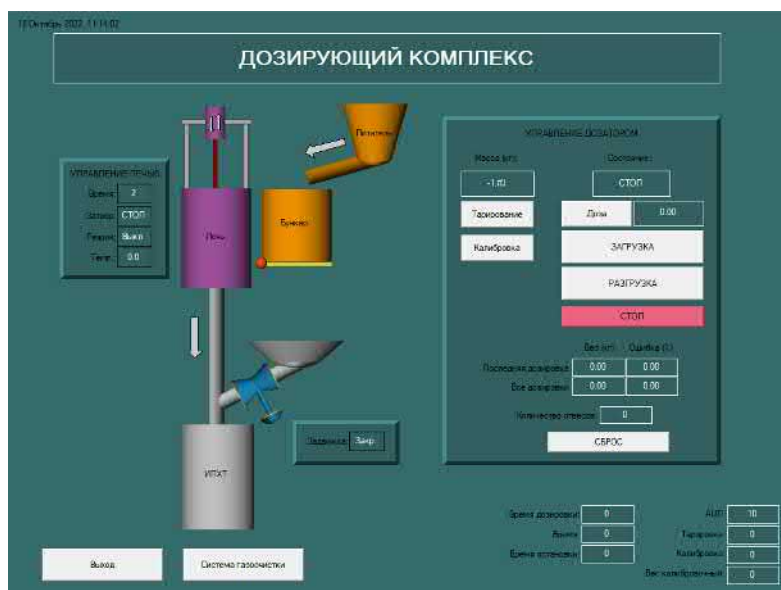


Рис. 8. Мнемосхема дозирующего комплекса

Таблица 2

Основные технические характеристики опытно-промышленной установки ИГХТ

Наименование показателя	Значение
Тигель	
Температура процесса плавления, °С, не более	1500
Объем сливаемого расплава за 1 цикл, дм ³	5
Площадь зеркала расплава, дм ²	5
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч, не более	5
Температура охлаждающей воды, °С	
- на входе	20 ± 5
- на выходе	45 ± 5
Давление подаваемой воды, МПа (кгс/см ²), не менее	0,4 (4,0)
Удельное электрическое сопротивление воды, кОм·см, не более	20
Разрежение внутри тигля, Па	200
Индуктор	
Колебательная мощность, кВт, не более	60
Частота тока, МГц	1,76
Напряжение на индукторе, кВ, не более	7,5
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч, не менее	0,5
Удельное электрическое сопротивление воды, кОм·см, не более	20
Контейнер для стекломассы	
Вместимость полная, м ³	1,0
Вместимость рабочая, м ³	0,9
Взвешиваемая масса, кг	170 – 250
Узел дозирования	
Производительность вибропитателя стеклообразующих добавок, кг/порцию загрузки	0,05 – 2,00
Рабочая температура устройства приема-передачи электролита, °С	700
Скорость выдачи электролита из устройства приема-передачи, г/с	35

Кроме того, для удобства подачи всех компонентов стекла внесены изменения в узел дозирования борфосфатной шихты, которые заключаются в добавлении вибропитателя, бункера с затвором, заслонки с приводом, трубы подачи шихты, компрессора сжатого воздуха.

В процессе проведения эксперимента молекулярного хлора и хлороводорода в отходящих

газах не обнаружено. Измерение проводили с использованием индикаторных трубок ТИ-С12-0,2 и ТИ-НС1-0,15.

Масса слитого стекломатериала составила 13,6 кг. Оценочная производительность узла плавления при используемом режиме загрузки составила 6,8 кг/ч по стеклу. Основные стадии процесса представлены на рис. 9.

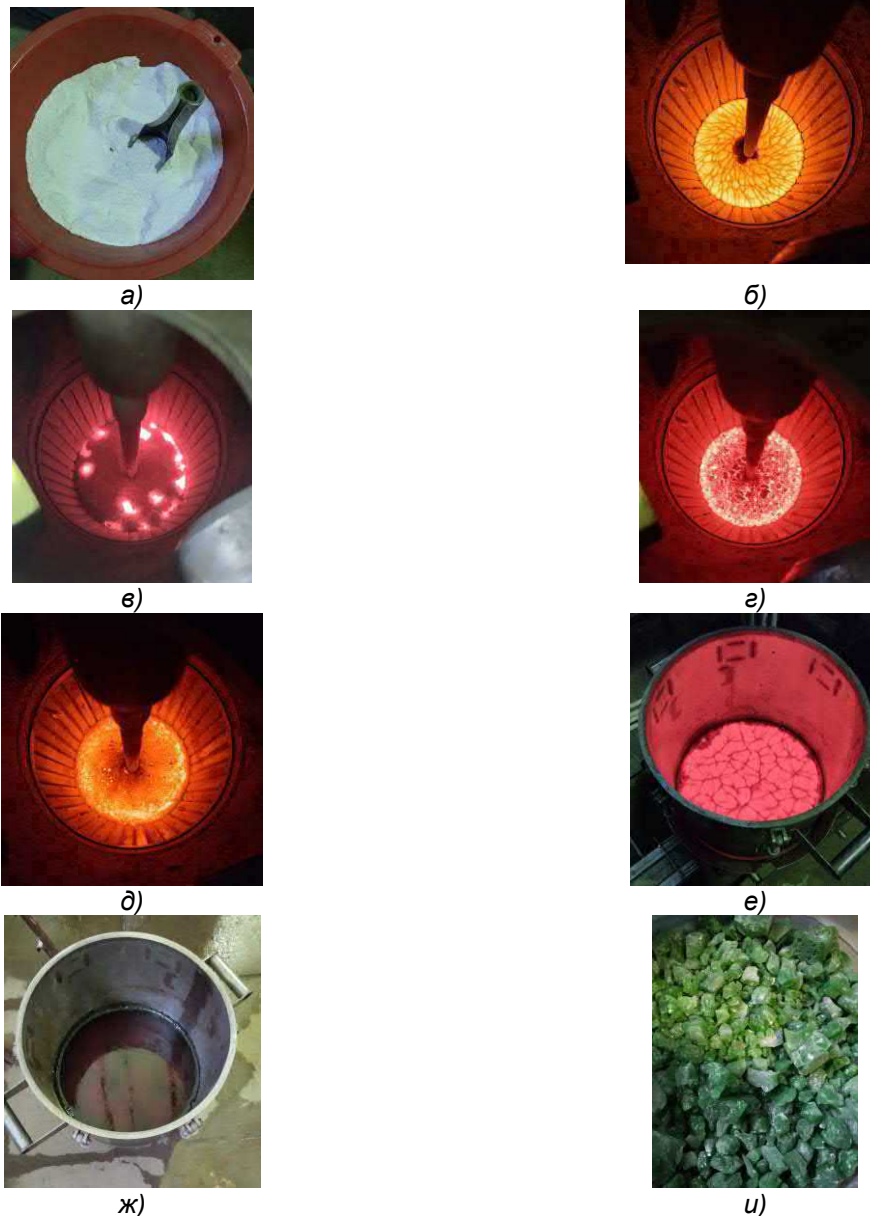


Рис. 9. Основные стадии процесса остекловывания имитатора отработанного электролита на опытно-промышленной установке ИПХТ: приготовление стеклообразующих добавок (а), получение первоначальной ванны расплава (б), загрузка порции стеклообразующих добавок и имитатора отработанного электролита (в), проплавление загруженной порции (г), вид зеркала расплава перед началом загрузки следующей порции (д), стекло после слива в контейнер (е), стекло после остывания (ж), борфосфатная стеклофритта (и)

Физико-химические свойства борфосфатного стекла, полученного при проведении технологических испытаний

Оценка однородности борфосфатного стекла проводилась с использованием методов

электронной микроскопии. Результаты картирования поверхности стекла, приведенные на рис. 10, свидетельствуют о равномерном распределении по объему стеклоблока основных компонентов, входящих в состав матрицы.



Рис. 10. Результаты картирования поверхности стекла, полученного в ИПХТ

Испытания химической устойчивости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52126-2003 [1]:

- температура проведения испытаний $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$;

- отбор проб воды для последующего определения в ней концентрации нуклидов проводили на 1, 3, 7, 10, 14, 21 и 28 сут. контакта образцов стекла с дистиллированной водой. Скорость выщелачивания отдельных радионуклидов (или их смеси) R_n , $(\text{г}/(\text{см}^2 \text{сут}))$ вычисляли по формуле:

$$R_n^i = \frac{a_n^i}{A_0^i S t_n}, \quad (1)$$

где a_i – активность (Бк) или масса (г) отдельного нуклида (или их смеси), выщелоченного за данный интервал времени;

A_0 – удельная активность (Бк/г) или массовая концентрация (г/г) нуклида (или их смеси) в исходном образце;

S – площадь открытой геометрической поверхности образца, см^2 ;

t_n – продолжительность i -го периода выщелачивания, сут.

Концентрацию компонентов в контактной воде определяли методом пламенной спектроскопии (атомно-абсорбционный спектрофотометр Analytik Jena contrAA 800, госреестр СИ 69708-17).

Результаты испытаний гидролитической устойчивости, рассчитанные как среднее арифметическое трех параллельных измерений, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний гидролитической устойчивости

Элемент	Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут)		
	1 сут	14 сут	1 сут
Натрий	$5,9 \cdot 10^{-5}$	Натрий	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Литий	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Литий	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Стронций	$< 1 \cdot 10^{-6}$	Стронций	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Барий	$< 1 \cdot 10^{-6}$	Барий	$< 1 \cdot 10^{-6}$

Анализ представленных в таблице 3 результатов показывает, что скорости выщелачивания Na и Li в установившемся режиме на 28 сут. контакта с водой составляют величины $0,8 \cdot 10^{-5}$ г/(см²·сут.) и $1,4 \cdot 10^{-5}$ г/(см²·сут.) соответственно. Следует отметить, что получить количественную оценку гидролитической устойчивости борфосфатного стекла по стронцию не удалось по причине недостаточной чувствительности применяющегося метода анализа контактной воды.

На приведенном на рис. 11. калибровочном графике, построенном для анализа контактной воды на содержание иона стронция, видно, что предел его обнаружения составляет величину не менее 0,01 мг/дм³. Анализ проб контактной воды, отобранной в ходе проведения испытаний гидролитической устойчивости, показал, что концентрация стронция во всех пробах оказалась менее предела обнаружения, т.е. менее 0,01 мг/дм³.

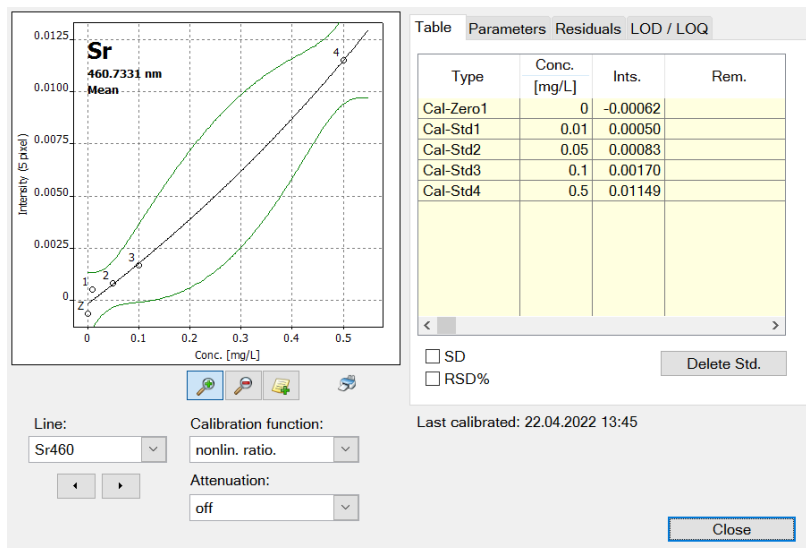


Рис. 11. Калибровочный график для определения концентрации стронция

Несмотря на отсутствие конкретных значений по концентрации стронция в контактной воде, полученные результаты могут быть использованы для ориентировочной оценки скорости его выщелачивания.

Для этого были сделаны следующие допущения:

- концентрация Sr²⁺ в контактной воде $a_i < 0,01$ мг/дм³;
 - усредненный объем контактной воды 30 см³;
 - площадь поверхности образца $S = 10$ см²;
 - удельное содержание Sr²⁺ $A_0 = 0,0007$ г/г.
- При оценке по формуле (1) скорости выщелачивания стронция можно уверенно сказать,

что при принятых допущениях она будет менее $4 \cdot 10^{-6}$ г/(см²·сут.) уже за 1 сут. контакта поверхности образца с дистиллированной водой. При увеличении длительности испытаний до 28 сут. следует ожидать снижения скорости выщелачивания до значений менее $1 \cdot 10^{-6}$ г/(см²·сут.).

Полученное значение соответствует принятым в Российской Федерации критериям качества матричных материалов, содержащих ВАО, по скорости выщелачивания Sr [2].

Для измерения вязкости расплавов использовали вибрационный вискозиметр, принцип работы которого основан на преобразовании амплитуды колебаний датчика, помещенного в расплавленный материал, в соответствующий электрический сигнал [3].

Принципиальная схема установки для определения вязкости расплава стекломассы приведена на рис. 12.

Градуировку вискозиметра (рис. 13) выполняли по эталонным жидкостям фирмы Cannon Instrument Company (США) в интервале значений вязкости от 5 до 200 дПа·с. Для нагрева расплавов в процессе измерения вязкости использовали печь сопротивления с силовыми нагревателями (SiC). Температуру в печи поддерживали с точностью ± 5 °С при помощи тиристорного регулятора температуры «Термодат».

НЧ-генератор

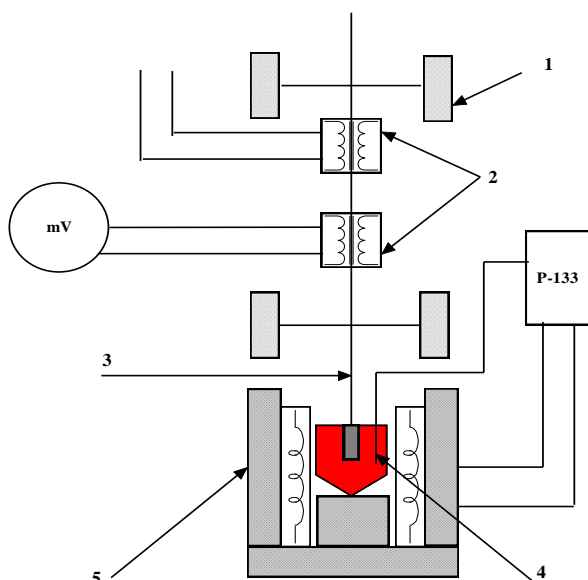


Рис. 12. Принципиальная схема установки измерения вязкости расплавов: 1 – подвеска датчика; 2 – электромагнитные катушки; 3 – датчик с Pt наконечником; 4 – термопара; 5 – печь сопротивления

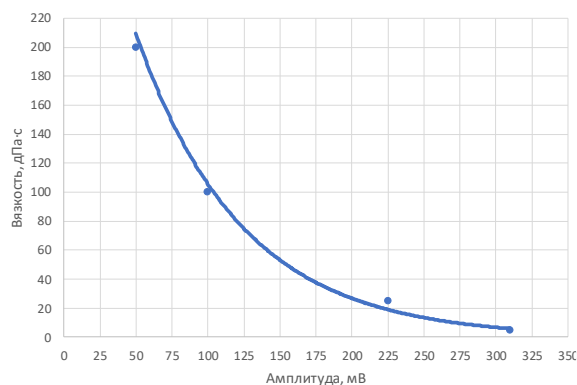


Рис. 13. Градуировочный график для измерения вязкости

На рис. 14. приведены данные по вязкости полученного в ИПХТ расплава борофосфатного стекла.

Для оценки степени включения хлоридов образца полученного на опытно-промышленной установке ИПХТ борофосфатного стекла были проанализированы на содержание в них хлорид-ионов.

Массовую концентрацию хлорид-ионов в отобранных пробах стекла и барботерной жидкости определяли потенциометрическим методом с использованием ионоселективного электрода на рН-метре / иономере ИТАН.

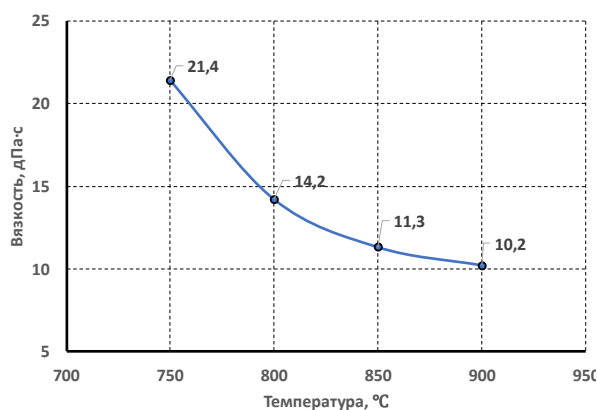


Рис. 14. Зависимость вязкости расплава борофосфатного стекла от температуры

Для анализа содержания хлористого водорода в газовой фазе использовали колористическую индикаторную трубку на хлороводород TI-[HCl-0,15], которая обеспечивает контроль содержания в газовой фазе хлористого водорода в диапазоне 1–10 мг/м³.

Сущность метода заключается в изменении окраски индикаторного порошка в результате реакции с вредным веществом (газом или па-

ром) в анализируемом воздухе, просасываемом через трубку. Измерение концентрации вредного вещества производится по длине изменившего первоначальную окраску слоя индикаторного порошка в трубке [4].

Результаты оценки содержания в газовой фазе хлористого водорода и хлора по показаниям в колористической индикаторной трубки показали их отсутствие.

Помимо оценки делокализации хлористого водорода в газовую фазу был проведен анализ содержания хлорид-ионов в полученном в ИПХТ стекле. Для этого образец борофосфатного стекла растворяли в азотной кислоте, а затем определяли концентрацию с использованием рН-метра / иономера ИТАН.

Калибровочные эталоны готовили путем растворения не содержащего хлоридов борофосфатного стекла в азотной кислоте с последующим введением хлорида лития, обеспечивающего ряд калибровочных концентраций по хлорид-иону. По результатам измерений массовая доля хлоридов в стекле составило 86,33 % от введенного.

Принятым вариантом обращения с отработанным электролитом операции «металлизации» является остекловывание в борофосфатное стекло. Для этого перед подачей в ИПХТ необходимо провести смешение расплавленного электролита со стеклообразующими добавками. Конечным продуктом является борофосфатная матрица, а отходящие газы остекловывания поступают в систему газоочистки. Схема процесса представлена на рис. 15.

Внутреннее трение (ВТ) и модуль упругости измерены в амплитудно-независимой области при частотах деформации 1,0 Гц, в температурном интервале 25-400 °С, методом вынужденных колебаний на динамическом механическом анализаторе «DMA Q800». Величина внутреннего трения – $\text{tg}(\varphi)$ ($=Q^{-1}$), где φ – разность фаз между приложенным напряжением σ и результирующей деформацией ε . Внутреннее трение является безразмерной величиной и точность ее определения в данной работе $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

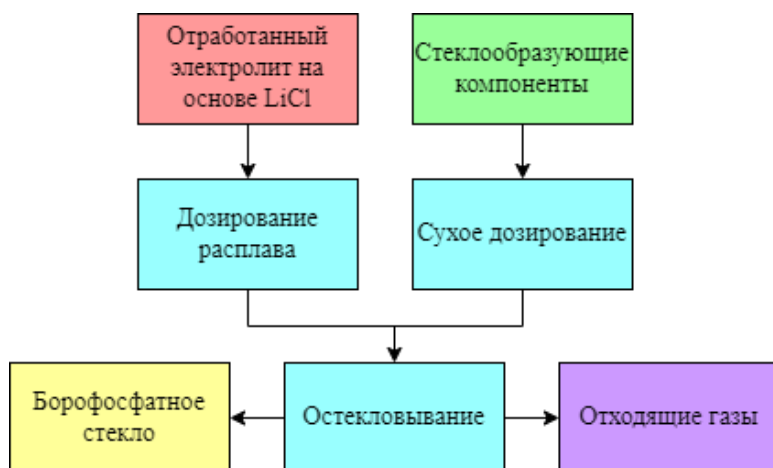


Рис. 15. Схема остекловывания отработанного электролита «металлизации»

В данной работе модуль Юнга при комнатной температуре для всех образцов (за исключением некоторых) определялся методом наименьших квадратов по 16 испытаниям (по 4 испытания на каждой стороне образца).

В работе амплитуда деформаций – 10 мкм, частота деформаций 1 Гц.

Результаты определения модуля Юнга представлены в таблице 4.

Температурная зависимость модуля Юнга и внутреннего трения представлена на рис. 16.

На всех образцах наблюдались пики внутреннего трения (их природа не определена),

присутствует рост внутреннего трения (в узком диапазоне температур) с выходом на новое фоновое значение внутреннего трения (после пика полка внутреннего трения увеличилась), и это сопровождается резким (при температуре пика) уменьшением модуля Юнга (образец 3 разрушился при температурах в диапазоне пика). Такое резкое увеличение внутреннего трения и модуля упругости может свидетельствовать о фазовом переходе (изменения в структуре образца).

Результаты измерений температуропроводности образца 10x10x2 мм борофосфатного

стекла с добавкой LiCl (троекратные измерения одного образца методом LFA), а также однократных измерений аналогичных образцов, предварительно облученных дозой 0,1

и 1,0 МГр, представлены на рис. 17.

На рис. 18 представлены данные рамановской спектроскопии, полученные на образцах борфосфатного стекла с добавкой LiCl.

Таблица 4

Результаты определения модуля Юнга

Модуль Юнга E, ГПа			
Сторона 1	Сторона 2	Сторона 3	Сторона 4
Образец 1. 0,88 x 2,34 мм			
48,5	49,9	47,4	49,6
47,3	49,6	49,5	50,3
49,8	50,4	51,2	49,2
49,5	49,4	49,5	49,6
48,5	49,9	47,4	49,6
E _{ср}	49,41 ± 0,53 (1,073 %), P = 0,95		
Образец 2. 1,02 x 2,4 мм			
Испытан только по двум сторонам (неровный образец)			
48,9	48,9	-	-
48,2	48,6	-	-
49,9	47,9	-	-
48,5	49,3	-	-
E _{ср}	48,77 ± 0,53 (1,079 %), P = 0,95		
Образец 3, 1,87 x 0,89 мм			
Испытан только по двум сторонам (неровный образец)			
46,8	47,5	-	-
46,2	47,1	-	-
47,5	47,8	-	-
45,8	47,4	-	-
E _{ср}	47,01 ± 0,59 (1,245 %), P = 0,95		
Общая погрешность (средняя по трем образцам): E_{ср} = 70,69 ± 0,34 (0,479 %), P = 0,95			

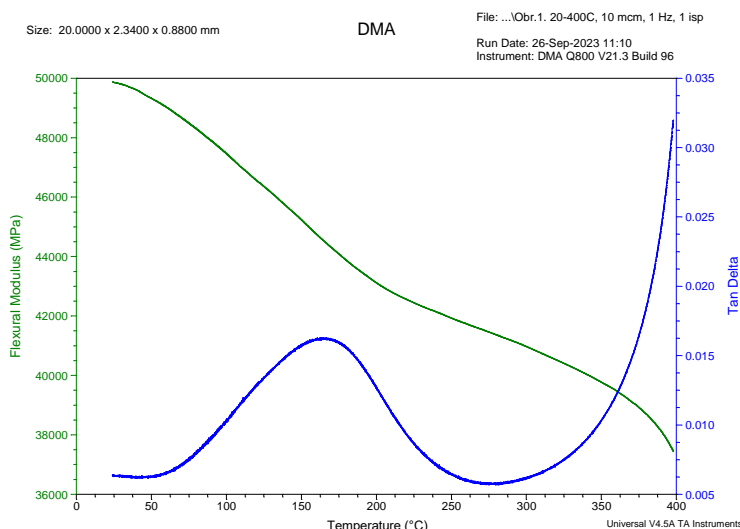


Рис. 16. Температурная зависимость модуля Юнга (МПа) и внутреннего трения (Tan Delta) БФС LiCl. Образец 1, частота 1 Гц.

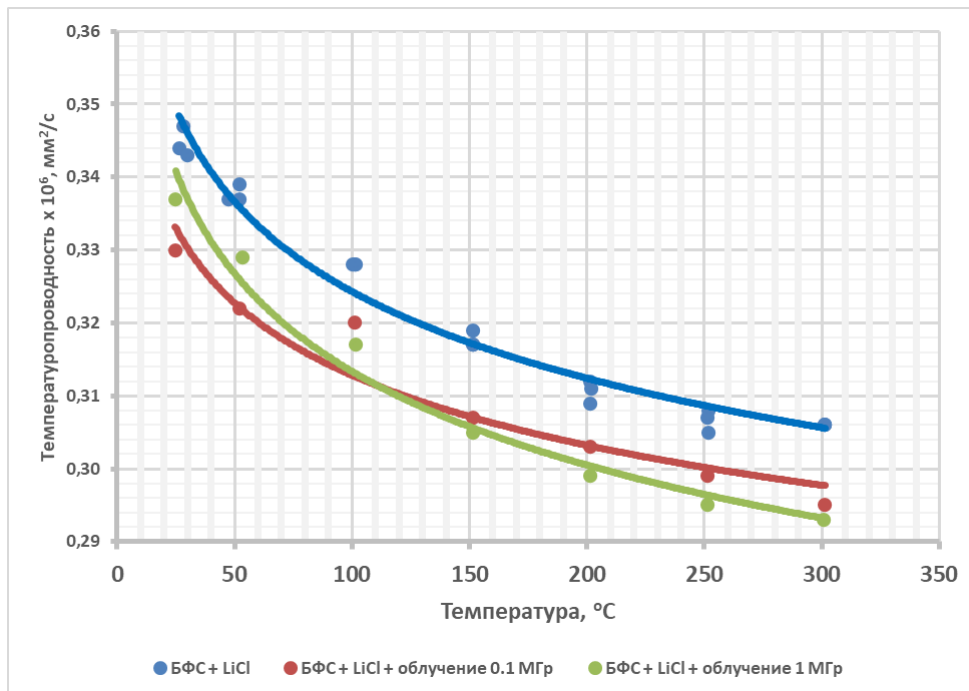


Рис. 17. Результаты измерения температуропроводности образцов борофосфатного стекла с добавкой LiCl

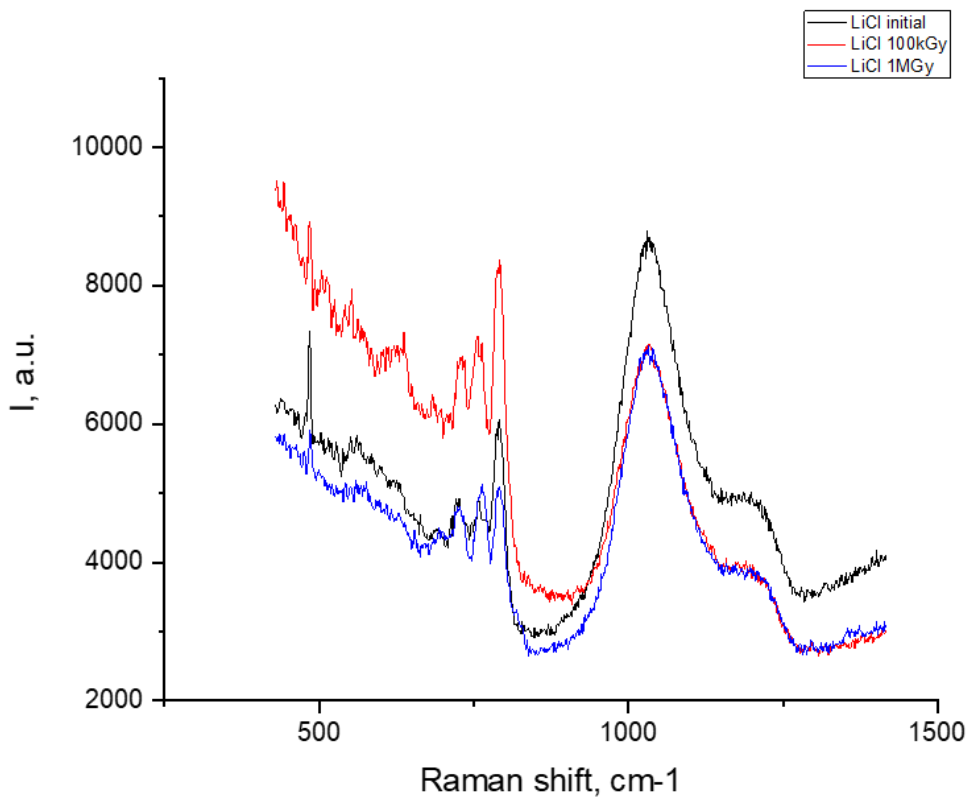


Рис. 18. Результаты рамановской спектроскопии образцов борофосфатного стекла с добавкой LiCl

Заключение

В лабораторных условиях разработан борофосфатный стекломатериал для иммобилизации отработанного электролита операции «металлизации» пирохимического передела МП ОДЭК.

Разработан, изготовлен и испытан прототип устройства приема-передачи отработанного электролита.

Подтверждена возможность переработки отработанного электролита операции «металлизации» пирохимического передела на полномасштабном макете опытно-промышленной установки ИПХТ с применением разработанного прототипа устройства приема-передачи отработанного электролита.

Определены показатели качества получен-

ных борофосфатных стекломатериалов, которые соответствуют требованиям нормативной документации.

Дальнейшая разработка технологии обращения с отработанным электролитом предполагает подбор технологических режимов и отработку технологии на полномасштабном макете опытно-промышленной установки ИПХТ. Для этого необходимо провести модернизацию (доработку) полномасштабного оборудования для обращения с имитатором отработанного электролита (система подготовки исходного продукта, узел дозирования продуктов, система газоочистки, узел плавления, система АСУТП).

Работа выполнена в рамках договора от 06.06.2023 № 740/1199-Д-04/26/11406-Д, заключенного по договору от 06.06.2023 № 740/1199-Д.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52126-2003 Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания. – М.: Стандартинформ - 2006. – 6 с.
2. НП-019-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору – 2015. – 23 с.
3. Соловьев А.Н., Росин А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. – Новосибирск: Наука - 1979 – 140 с.
4. ГОСТ 12.1.014-84 Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Метод измерения концентраций вредных веществ индикаторными трубками. – М.: Стандартинформ - 2010. – 7 с.

Поступила в редакцию / Received 25.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.09.2025

Принята к публикации / Accepted 10.09.2025