

УДК 661.879+666.794

В. В. Гончарук<sup>1</sup>, Г. Н. Пишичко<sup>1</sup>, Л. Н. Пузырная<sup>1</sup>, А. Н. Масько<sup>2</sup><sup>1</sup> Інститут коллоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України, г. Київ<sup>2</sup> ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования», г. Киев

## МАТРИЦЫ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ СОЛЕЙ РАДИОАКТИВНЫХ КУБОВЫХ ОСТАТКОВ

Исследована возможность иммобилизации солей кубовых остатков АЭС в матрицах на основе природных минералов. Показано, что при содержании солей кубового остатка 10 масс. % стеклокерамические образцы состава клиноптилолит—монтмориллонит—стеклопорошок имеют высокую химическую устойчивость (скорость выщелачивания радионуклидов Cs-137 и Sr-90 не превышает  $1 \cdot 10^{-6}$  г/(см<sup>2</sup>·сут)).

**Ключевые слова:** матрица, иммобилизация, радиоактивные кубовые остатки, радионуклиды, стеклокерамика, природные минералы.

Атомная энергетика занимает одно из значимых мест среди источников электроэнергии. На сегодняшний день в мире работает около 440 энергоблоков АЭС, из них 14 — в Украине. К 2030 г. количество энергоблоков АЭС в мире вырастет ещё на 60 %. Увеличение объемов энергопотребления вследствие технического и интеллектуального прогресса человечества обуславливает рост количества отходов, в том числе радиоактивных, и неизбежно сопровождается резким обострением экологических проблем. В результате Чернобыльской аварии Украина занимает третье место в мире по объему накопления радиоактивных отходов [1]. Поэтому дальнейшее развитие программ использования ядерной энергетике возможно только при гарантии безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). Одной из основных составляющих РАО являются жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) низкого и среднего уровня активности, накопление которых все возрастает, что представляет серьёзную угрозу для окружающей среды.

Согласно современной концепции обращения с РАО, соответствующей рекомендациям МАГАТЭ, обращение с такими видами отходов предусматривает максимальное сокращение их объема, кондиционирование и фиксацию в устойчивых твердых матрицах с дальнейшим захоронением в глубинных геологических формациях [2, 3]. Это обеспечивает уменьшение вероятности попадания долгоживущих радионуклидов в окружающую среду за счет перевода ЖРО в отвержденную форму. Основные требования к выбору материала матрицы и технологического процесса фиксации РАО определяются необходимостью их преобразования в химически- и радиационно-устойчивую форму, сохраняющую свою стабильность на протяжении длительного времени хранения. Это гарантирует как изоляцию радиоактивных элементов от окружающей среды, так и уменьшение затрат на обслуживание хранилищ для долговременного хранения и (или) захоронения РАО.

К основным методам переработки ЖРО относятся глубокое упаривание, цементирование, битумирование и полимеризация (включение в термореактивные смолы) [4, 5], основанные на переводе ЖРО в инертную форму, пригодную для долговременного хранения и (или) захоронения. Однако следует заметить, что использование таких технологий не позволяет существенно сократить объем конечного радиоактивного продукта и гарантировать достаточную безопасность его хранения: для цементирования характерно увеличение суммарного объема отходов, большая водопроницаемость, длительный процесс гидратационного отверждения и низкая химическая устойчивость иммобилизованных ЖРО; термореактивные смолы являются достаточно дорогими материалами и обладают повышенной взрыво- и пожароопасностью, а также низкой радиационной стойкостью; битумирование требует применения сложного оборудования и специальных температурных условий хранения для предотвращения расслаивания компаунда.

Наиболее пригодными для надежного захоронения в геологических формациях до полного распада радионуклидов признаны остеклованные РАО с достаточной химической, термической и механической стойкостью [6]. Стекло может гомогенно инкорпорировать в свою структуру широкий спектр компонентов [7], т. е. большинство радионуклидов включаются в структуру стекол, участвуя в образовании решетки или помещаясь внутри неё, что обеспечивает низкую скорость выщелачивания радионуклидов ( $10^{-7} \dots 10^{-8}$  г/(см<sup>2</sup>·сут)) в условиях хранилища РАО по сравнению с другими материалами [8, 9]. Однако при использовании высокотемпературных методов остекловывания возникают определенные трудности: для РАО с переменным составом необходимо соответственно изменять и состав добавок шихты, чтобы получить достаточно качественный продукт. Кроме того, некоторые компоненты практически не включаются в стекло при их определенном содержании в радиоактивных отходах.

Ограниченная растворимость продуктов деления в стеклянной матрице может вызвать ухудшение свойств иммобилизованных ЖРО, предназначенных для захоронения [10]. К тому же для стекол характерна склонность к спонтанной кристаллизации (девитрификации) при повышенных температурах, что приводит к значительному (иногда на три порядка) ухудшению их химической устойчивости.

Несомненным преимуществом перед стеклом и бетоном на данном уровне развития технологий иммобилизации радионуклидов обладают синтетические минералоподобные матрицы (аналоги природных минералов) различных видов SYNROC, которые являются эталоном химической устойчивости (скорость выщелачивания радионуклидов около  $10^{-9}$  г/(см<sup>2</sup>·сут)) за счет прочного структурного вхождения радионуклидов в кристаллические минералоподобные фазы [11, 12]. Главным недостатком, ограничивающим их использование, состоит в значительных экономических затратах на трудо- и энергоемкое оборудование, обеспечивающее высокие температуры (до 1300...2000 °С) и высокое давление (до 100 МПа), а также использование сложных оксидов аналогов природных минералов для получения кристаллических матриц, связывающих радионуклиды.

Недостатки указанных матричных материалов в свете современных требований способствовали развитию альтернативного направления, связанного с использованием в качестве основного сырья для керамических матриц дешевых алюмосиликатных природных минералов, кристаллическая структура которых способна к изоморфному включению радионуклидов. Поскольку керамические материалы на основе природных алюмосиликатов менее чувствительны к добавкам отходов и являются огнеупорным материалом с достаточной механической и химической стойкостью, то это позволяет осуществлять иммобилизацию ЖРО, обеспечивающую эффективное связывание радионуклидов при сравнительно небольшом объеме и массе матриц [13—15]. К тому же термодинамическая стабильность керамик выше, чем стекол. Следует также отметить, что значительная часть радиоактивных шламов очистки ЖРО содержит цеолиты (клиноптилолит), слоистые (монтмориллонит) и слоисто-ленточные силикаты (пальгорскит), которые характеризуются высокими сорбционными свойствами и высокой дисперсностью [16]. Таким образом, большие объемы шламов очистки ЖРО, содержащие указанные природные алюмосиликатные материалы, могут быть переработаны по керамической технологии.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности надежной иммобилизации солей кубовых остатков переработки

ЖРО АЭС в низкотемпературных (700...800 °С) керамических и стеклокерамических матрицах с использованием в качестве основного матричного материала природных алюмосиликатных минералов.

**Методика эксперимента.** Для получения керамических матриц использовали монтмориллонит и пальгорскит Черкасского месторождения, цеолит-содержащий туф Сокирницкого месторождения, главным породообразующим минералом которого является клиноптилолит. Состав указанных природных минералов приведен в табл. 1.

Для получения стеклокерамических матриц использовали стеклопорошок — измельченный бой бесцветного тарного стекла. Химический состав стекла приведен в табл. 1. Применение стеклобоя при формовании исследуемых матриц способствует интенсификации процессов спекания.

В работе использовали реальный кубовый остаток (КО) переработки жидких радиоактивных отходов ВВЭР-1000 Хмельницкой АЭС (суммарная β-активность, определенная с помощью β-радиометра “КРК-1-01А”, составляла  $1,4 \cdot 10^4$  Бк/дм<sup>3</sup>, рН=10), и модельный раствор-имитат, который по макрокомпонентам отвечал реальному КО (для исследования условий формирования, обжига и физико-механических свойств матриц). Химическую устойчивость матриц оценивали на образцах, полученных с добавлением в шихту реальных кубовых остатков. Общее солесодержание имитата кубового остатка АЭС составляло 400 г/дм<sup>3</sup>.

Порошок-имитат солей кубового остатка готовили путем упаривания и высушивания модельного раствора в вакуумном сушильном шкафу. Полученный порошок измельчали в керамической ступке и просеивали через сито (0,08 мм) для получения однородной фракции.

Таблица 1. Химический состав матричных материалов (содержание, масс. %)

Компонент	Цеолит-содержащий туф	Монтмориллонит	Пальгорскит	Тарное стекло
SiO <sub>2</sub>	69,2	61,0	61,0	70,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,1	15,2	7,0	2,0
CaO	2,0	2,0	—	9,0
MgO	0,7	1,7	15,0	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4	6,4	1,0	2,0
FeO	0,1	0,4	—	—
Na <sub>2</sub> O	2,5	0,1	—	15,0
K <sub>2</sub> O	2,9	0,1	—	2,0
TiO <sub>2</sub>	0,2	—	—	—
Другие	2,6	4,6	—	—
Потери при прокаливании	9,2	8,0	—	—

Модельные шихты готовили впрыскиванием определенного количества воды (в зависимости от массы воздушно-сухой шихты) в смесь сухих компонентов с помощью ингаляционного прибора при постоянном перемешивании смеси, с последующей выдержкой до формования в герметичной таре в течение 18 ч.

Для прессования керамических образцов использовали лабораторный ручной гидравлический пресс. Выдержка при конечном давлении в течение 1 мин при каждом цикле прессования позволяла более полно удалять воздух в межслоевом пространстве дисперсных частиц шихты и, таким образом, повышать плотность образцов. Матрицы формовали в виде таблеток диаметром 30 мм и высотой 8...9 мм полусухим двухсторонним прессованием при давлении 40 МПа (в условиях его медленного нарастания). Более высокое давление прессования приводит к снижению прочности образцов в связи с явлением перепрессовки тонкозернистых порошков, что подтверждается растрескиванием образцов. Матрицы, полученные при более низком давлении, не спекаются до максимальной плотности.

Сравнительно небольшие геометрические размеры образцов, измеряемых с помощью микрометра, были выбраны для удобства проведения исследований, в том числе для предотвращения образования трещин, вызванных неравномерностью термического расширения материала при нагреве, и повышения точности определения физико-механических свойств прессовок.

Образцы модельных матриц выдерживали на воздухе в течение 6 ч, а затем сушили в сушильном шкафу в течение 16 ч. Спрессованные таблетки спекали при различных температурах в электрической печи сопротивления в воздушной атмосфере, с выдержкой при конечной температуре на протяжении 1 ч на корундово-мулитовой лещадке (огнеупорной плитке), посыпанной порошком  $Al_2O_3$ . Принятый режим сушки и обжига моделировал температурные условия работы промышленных установок спекания, работающих в непрерывном режиме. Температура обжига составляла 700...800 °С, что способствовало минимальному испарению радионуклидов цезия, которое могло происходить только с верхнего слоя сформированных матриц. Охлаждались образцы произвольно по мере охлаждения печи.

Для того чтобы радионуклиды надёжно иммобилизовались в керамическую и стеклокерамическую матрицы в течение необходимого времени, образцы должны обладать определённым комплексом физико-механических характеристик. Поэтому для полученных стеклокерамических образцов определяли следующие показатели [17, 18]:

*открытую пористость, %:*

$$P_o = \frac{m_1 - m}{m_1 - m_2} \cdot 100,$$

где  $m$  — масса сухого образца, г;  $m_1$  — масса насыщенного водой образца, г;  $m_2$  — масса образца в воде, г;

*водопоглощение, %:*

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100,$$

где  $m$  — масса сухого образца, г;  $m_1$  — масса насыщенного водой образца, г;

*плотность, г/см<sup>3</sup>:*

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  — масса обожженного образца, г;  $V$  — объем обожженного образца, см<sup>3</sup>;

*объемную усадку, %:*

$$y_o = \frac{V - V_1}{V} \cdot 100,$$

где  $V$  — объем сформированного образца, см<sup>3</sup>;  $V_1$  — объем обожженного образца, см<sup>3</sup>.

К другим важным характеристикам матричных материалов можно отнести химическую устойчивость, поскольку выщелачивание грунтовыми водами — основной путь попадания радионуклидов из захороненных отходов в окружающую среду [19]. Химическую устойчивость полученных стеклокерамических образцов, содержащих соли КО, оценивали по скорости выщелачивания радионуклидов, определяемой по суммарной  $\beta$ -активности при соблюдении стандартных условий, предусмотренных ГОСТ Р 52126 [20].

Стеклокерамические матрицы с измеренной площадью внешней поверхности помещали в индивидуальные контейнеры для выщелачивания с контактными водными растворами при температуре 25 °С. Выщелачивание проводили в течение 0,25, 1, 3, 7 сут. Через определенный интервал времени раствор сливали и помещали образец в контейнер со свежим контактном раствором.

Скорость выщелачивания, г/(см<sup>2</sup>·сут), радионуклидов рассчитывали по формуле

$$R_n^i = \frac{a_n^i}{A_0^i \cdot S \cdot t_n},$$

где  $a_n^i$  — активность радионуклидов в контактном растворе, накопленная за промежуток времени  $t_n$ , Бк;

$A_0^i$  — удельная активность радионуклидов в матрице, Бк/г;  $S$  — геометрическая площадь внешней поверхности образца, см<sup>2</sup>;  $t_n$  — продолжительность  $n$ -го периода выщелачивания, сут.

Измерение суммарной  $\beta$ -активности проб контактного раствора проводили на  $\beta$ -радиометре “КРК-1-01А”.

**Влияние содержания природных минералов на физико-механические свойства керамических матриц.** Спекание керамических материалов — заключительная и решающая технологическая стадия, определяющая физико-механические и химические свойства керамики. Чаще всего завершенность процесса спекания оценивают по изменению плотности материала: спекшимися считают материалы, достигшие определенной минимальной пористости [21]. Важными показателями, позволяющими установить степень завершенности процесса спекания керамических матриц и сделать заключение о поведении материала при обжиге, являются пористость, водопоглощение и усадка спеченной керамики. От указанных показателей керамики в значительной степени

зависят ее устойчивость при воздействии агрессивных сред, механическая прочность, а также теплопроводность. Таким образом, при определении оптимальных условий спекания внимание, в первую очередь, уделялось поиску температурного диапазона, отвечающего интервалу достижения спекшегося состояния. Для обеспечения низкотемпературного обжига был выбран диапазон спекания образцов 700...800 °С.

Данные о влиянии содержания природных минералов на физико-механические параметры керамических матриц с имитатом солей кубового остатка приведены в табл. 2.

**Влияние содержания солей кубовых остатков на физико-механические свойства стеклокерамических матриц.** При формовании стеклокерамических матриц использовали стеклопорошок и смесь минералов клиноптилолит-монтмориллонит с содержанием солей кубовых остатков приблизительно 10 масс. %. Для матриц на основе смесей клиноптилолит-монтмориллонит характерны высокие показатели физико-механических свойств (табл. 3).

Таблица 2. Влияние содержания природных минералов на физико-механические свойства керамических матриц с имитатом солей кубового остатка, обожженных при 800 °С

Состав керамических матриц, масс. %				Показатели физико-механических свойств керамических матриц			
Имитат кубового остатка	Цеолитсодержащий туф	Монтмориллонит	Пальгорскит	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Y_{00}$ , %	$\Pi_{00}$ , %	$W$ , %
0	90	10	—	1,67	18,20	29,80	18,10
3	87	10	—	1,86	25,40	20,40	11,00
5	85	10	—	2,00	30,10	14,00	6,90
10	80	10	—	2,09	34,20	0,10	0,04
12	78	10	—	1,77	19,10	1,70	1,00
0	90	—	10	1,64	20,17	30,50	19,01
3	87	—	10	1,84	25,67	23,50	11,85
5	85	—	10	1,97	31,79	18,16	9,14
10	80	—	10	2,25	39,30	1,90	0,83
12	78	—	10	1,97	30,30	1,10	0,48
0	100	—	—	1,72	21,37	27,88	16,02
3	97	—	—	1,91	29,36	21,57	11,39
5	95	—	—	2,01	30,49	16,63	8,43
10	90	—	—	2,13	34,82	0,51	0,24
12	88	—	—	1,85	30,20	5,90	3,10

Таблица 3. Влияние содержания солей имитата кубового остатка на физико-механические свойства стеклокерамических матриц, обожженных при 700 °С

Состав матриц, масс. %				Показатели физико-механических свойств стеклокерамических матриц			
Имитат кубового остатка	Клиноптилолит	Монтмориллонит природный	Стеклопорошок	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Y_{00}$ , %	$\Pi_{00}$ , %	$W$ , %
0	80	10	10	1,98	13,39	30,85	17,83
3	77	10	10	2,05	18,10	25,91	14,19
5	75	10	10	2,02	25,92	0,40	0,20
10	70	10	10	1,98	24,67	0,90	0,42
12	68	10	10	1,83	21,30	12,50	5,87

Стеклопорошок и имитат кубового остатка, имеющие в своем составе соли калия и натрия, способствуют ускорению образования расплавов в алюмосиликатной шихте, поскольку эти соли являются интенсификаторами спекания. Это позволяет снизить энергозатраты и повысить экономичность технологического процесса переработки РАО.

Исследование влияния различного содержания солей кубового остатка на физико-механические свойства обожженных при 700 °С стеклокерамических матриц состава «клиноптилолит — монтмориллонит (10 масс. %) — стеклопорошок (10 масс. %)» показало, что при концентрации солей кубового остатка 5...10 масс. % у этих матриц наблюдаются минимальные значения водопоглощения и открытой пористости (табл. 3). Образующийся при температуре обжига 700 °С стекловидный микрорасплав покрывает частицы минералов, заполняя пустоты и задерживая проникновение воды во внутренние слои стеклокерамики, что позволяет прочно фиксировать радионуклиды.

Повышенные количества солей КО приводят к ухудшению физико-механических свойств стеклокерамики. В частности, при содержании солей КО 12 масс. % наблюдается снижение объемной усадки, повышение открытой пористости и водопоглощения, а при содержании 15...50 масс. % — значительное вспучивание образцов и их полное расплавление.

Таким образом, содержание 10 масс. % стеклопорошка позволяет получить качественный образец (с минимальной пористостью и водопоглощением) и иммобилизовать 10 масс. % солей имитата кубового остатка уже при температуре обжига 700 °С.

**Химическая устойчивость стеклокерамических матриц с иммобилизованными солями кубового остатка.** Исследования выщелачивания радионуклидов водными растворами различных химических реагентов проводили на образцах монолитных стеклокерамических матриц (температура обжига 700 °С) состава «стеклопорошок (10 масс. %) — клиноптилолит (70 масс. %) — монтмориллонит (10 масс. %) — соли кубового остатка (10 масс. %)».

Влияние pH и состава выщелачивающего раствора может выражаться в образовании плёнок малорастворимых соединений на поверхности керамического образца, снижающих скорость выщелачивания радионуклидов. Большинство грунтовых вод имеют pH=5,5...8. В месте захоронения РАО водородный показатель грунтовой воды может уменьшаться (вследствие накопления продуктов радиолиза) или увеличиваться (из-за выноса из отверждённых отходов щелочных компонентов). Падение pH до некоторого уровня приводит обычно к ускорению растворения матрицы и увеличению скорости выщелачивания. Повышение pH или

солесодержания раствора действует, как правило, в обратном направлении из-за образования малорастворимых плёнок на поверхности материала матрицы, за исключением случаев, когда матричные элементы способны образовывать прочные гидроксо- или иные комплексы.

Как видно из табл. 4, полученные низкотемпературные стеклокерамические матрицы с радиоактивными солями кубовых остатков характеризуются высокой химической устойчивостью по отношению к водным растворам химических реагентов.

Таблица 4. Скорость выщелачивания радионуклидов различными химическими реагентами из стеклокерамических матриц

Химический реагент	Концентрация, моль/дм <sup>3</sup>	Длительность выщелачивания, сут	Скорость выщелачивания радионуклидов, 10 <sup>-6</sup> г/(см <sup>2</sup> ·сут)
HCl	0,01	0,25	1,41
		1	0,52
		3	0,19
		7	0,06
NH <sub>4</sub> OH	0,01	0,25	0,80
		1	0,45
		3	0,16
		7	0,08
ЭДТА	0,05	0,25	1,60
		1	0,80
		3	0,29
		7	0,14
H <sub>2</sub> O	—	0,25	0,10
		1	0,08
		3	0,04
		7	0,03

Наибольшая скорость выщелачивания радионуклидов из стеклокерамических матриц раствором соляной кислоты наблюдается в начальный период времени контакта. Это свидетельствует, по-видимому, лишь о частичном растворении поверхностных участков матриц. Таким образом, при длительном хранении иммобилизованных КО в естественных условиях радионуклиды практически не будут вымываться из стеклокерамических матриц. «Стационарная» скорость выщелачивания из стеклокерамических матриц радионуклидов составляла не более 1·10<sup>-6</sup> г/(см<sup>2</sup>·сут), что значительно ниже по сравнению с керамическими матрицами (до 1·10<sup>-5</sup> г/(см<sup>2</sup>·сут)) [22].

## Выводы

Использование природных алюмосиликатов — дешевых и эффективных сорбентов радионуклидов, а также стеклопорошка как интенсификатора спекания позволяет получить стеклокерамические матрицы для иммобилизации радионуклидов кубовых остатков. При этом стеклокерамические

матрицы, обожженные при относительно низкой температуре (700 °С), обладают более высокими физико-механическими свойствами и химической устойчивостью по сравнению с керамическими матрицами (температура обжига 800 °С). Это

гарантирует отсутствие вторичного загрязнения окружающей среды при хранении иммобилизованных ЖРО и указывает на перспективность и целесообразность применения стеклокерамических матриц с экономической точки зрения.

### Список использованной литературы

1. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: Монография / Б. С. Пристер, А. А. Ключников, В. М. Шестопалов, В. П. Кухарь. — Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2013. — 200 с.
2. Гончарук В. В. Водно-химическая технология ядерных энергетических установок и экология / В. В. Гончарук, Э. Б. Страхов, А. М. Волошинова. — К.: Наук. думка, 1993. — 447 с.
3. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Основное руководство. — Вена: МАГАТЭ, 1981. — 56 с.
4. Никифоров А. С. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов / А. С. Никифоров, В. В. Куличенко, М. И. Жихарев. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 183 с.
5. Установки отверждения жидких отходов низкого и среднего уровня активности / В. И. Давыдов, В. В. Костин, Л. Н. Савин и др. // Атомная энергия. — 1995. — Т. 79, № 6. — С. 429—433.
6. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС / В. И. Землянухин, В. И. Ильенко, А. Н. Кондратьев и др. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
7. Опыт эксплуатации керамического плавителя ЭП-500/1Р по остекловыванию жидких высокоактивных отходов / А. С. Поляков, Н. И. Машенко, В. И. Основин и др. // Атомная энергия. — 1994. — Т. 76, № 3. — С. 183—188.
8. Матюнин Ю. И. Исследование поведения плутония и америция при остекловывании модельных ВАО с получением фосфатных стеклоподобных композиций различного макросостава / Ю. И. Матюнин // Радиохимия. — 1995. — Т. 37, № 6. — С. 557—568.
9. Результаты 16-летних испытаний остеклованных среднеактивных отходов Курской АЭС / С. А. Дмитриев, А. С. Баринов, Н. В. Ожован и др. // Атомная энергия. — 2005. — Т. 98, № 3. — С. 206—211.
10. Карлина О. К. Иммобилизация сульфатсодержащих отходов в боросиликатном стекле с применением фторидных добавок / О. К. Карлина, А. В. Овчинников, М. И. Ожован // Атомная энергия. — 1994. — Т. 76, № 3. — С. 234—237.
11. Богданов Р. В. Исследование алюмосиликофосфатных геокерамик как матриц для иммобилизации фракционированных отходов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  / Р. В. Богданов, Р. А. Кузнецов // Радиохимия. — 2006. — Т. 48, № 2. — С. 185—192.
12. Изучение материала СИНРОК / С. В. Стефановский, С. В. Юдинцев, Б. С. Никонов и др. // Геоэкология. — 1996. — № 4. — С. 58—74.
13. Алой А. С. Кондиционирование радиоактивных отходов путем включения в керамические материалы матрицы на основе глины / А. С. Алой, Б. С. Кузнецов, Ю. В. Кузнецов // Атомная энергия. — 1995. — Т. 78, № 5. — С. 305—311.
14. Лащенко Т. Н. Отверждение жидких концентрированных отходов среднего уровня активности в керамической матрице / Т. Н. Лащенко, Ф. А. Лифанов, В. А. Соловьев // Радиохимия. — 1999. — Т. 41, № 2. — С. 167—171.
15. Пузырная Л. Н. Матрицы для утилизации токсических шламов при очистке загрязненных вод / Л. Н. Пузырная, А. П. Криворучко, Е. В. Терликовский // Химия и технология воды. — 2008. — Т. 30, № 6. — С. 654—674.
16. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды / Ю. И. Тарасевич. — К.: Наук. Думка, 1981. — 208 с.
17. ГОСТ 473.4—81. Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кажущейся плотности и кажущейся пористости. — М.: Госстандарт СССР, 1981. — 8 с.
18. ГОСТ 473.3—81. Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения водопоглощения. — М.: Госстандарт СССР, 1981. — 8 с.
19. Крылова Н. А. Свойства отвержденных форм высокоактивных отходов как одного из барьеров системы захоронения / Н. А. Крылова, П. П. Полуэктов // Атомная энергия. — 1995. — Т. 78, № 2. — С. 93—98.
20. ГОСТ Р 52126—2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. — 8 с.
21. Лукин Е. С. Технический анализ и контроль производства керамики / Е. С. Лукин, Н. Т. Андрианов. — М.: Стройиздат, 1986. — 272 с.
22. Puzyrnaya L. N. Immobilization of radioactive salts in stillage residues using ceramic matrices / L. N. Puzyrnaya, G. N. Pshinko // J. Water Chem. And Technol. — 2012. — Vol. 34, N 1. — P. 53—60.

Получено 15.05.2014