

УДК 621.039.736
© 2005

СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТРИЦ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (РАО) И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

*Б.Г. Ершов, А.А. Минаев, И.Б. Попов, Т.К. Юрик, Д.Г. Кузнецов, В.В. Иванов
Россия, г. Москва, Институт физической химии и электрохимии РАН
С.И. Ровный, В.И. Гужавин
Россия, г. Озерск, ФГУП “ПО “Маяк”*

Проблема иммобилизации радиоактивных отходов является одной из основных для атомной промышленности и всего человечества. Наиболее надежным методом является включение отходов в стеклообразные или минералоподобные матрицы. Процесс остекловывания радиоактивных отходов является сложным вследствие высоких требований, предъявляемых к самим матрицам и к процессу остекловывания отходов.

Что касается матриц с включенными в них радиоактивными отходами, это должны быть химически, термически и радиационноустойчивые материалы. Сами процессы их синтеза должны быть надежны, технически просты, так как осуществляются при дистанционном управлении. В статье кратко рассмотрены различные стеклообразные и минералоподобные системы и технические возможности осуществления процессов остекловывания радиоактивных отходов. В работе исследовали различные системы: фосфатные, боросиликатные, системы на основе базальтов и некоторые другие.

Была изучена стеклообразная система $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$, имеющая определенные технологические преимущества: низкую температуру плавления, возможность жидкого флюсования фосфорной кислотой и т.д. Образцы готовились смешением порошков фосфатов и оксидов элементов с последующим плавлением в печи сопротивления при различной температуре заданное время и охлаждением образцов вместе с печью. Область остекловывания в этой системе при различной температуре представлена на рис. 1 [1].

Из приведенных данных видно, что содержание Al_2O_3 (который имитирует сумму оксидов многовалентных катионов, содержащихся в отходах – Fe, Cr, Ni и т. д.) в стекле может достигать 20–40 % масс., при изменении температуры от 900 °С до 1400 °С. И если использовать эту систему для натрий-алюмо-

содержащих отходов, то содержание кальцинированных отходов в стекле может достигать 40–55 % масс.

Была исследована скорость выщелачивания стекол этой системы в воде при 20 °С. Данные приведены в табл. 1.

Очевидно, что скорость выщелачивания матрицы в воде, составляющая величину $\sim 10^{-5}-10^{-6}$ г/см²·сут, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для захоронения радиоактивных отходов. Кроме того, было показано, что в эти стекла хорошо включаются многие элементы, входящие в отходы, а именно: хром, железо, никель, кальций и т.д.

Стеклообразные матрицы на основе данной системы внедрены на ПО “Маяк”, где построен цех остекловывания радиоактивных отходов высокого уровня активности, который работает уже много лет [2].

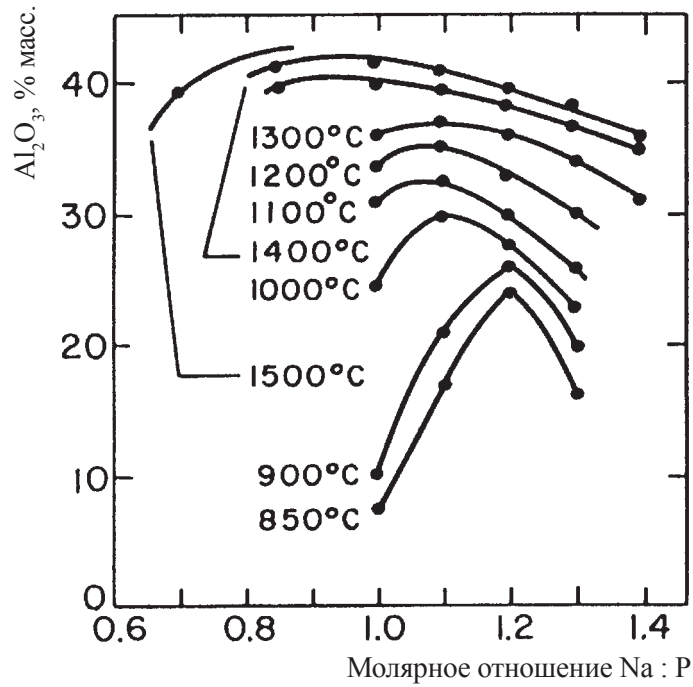


Рис. 1. Включение Al_2O_3 в стекла в системе $Na_2O-Al_2O_3-P_2O_5$ как функция молярного отношения Na : P и температуры плавления

Таблица 1

Скорость выщелачивания в воде Na-Al-фосфатных стекол

Состав композиции, % масс.			Скорость выщелачивания при 20 °С, г/см ² ·сут × 10 ⁻⁵
Na ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	
25,4	26,0	48,6	0,2
30,1	31,0	38,9	0,29
28,2	34,0	37,2	0,26
28,4	35,0	36,6	0,84
27,5	37,0	35,5	0,23
26,6	39,0	34,4	1,18
25,8	41,0	33,2	1,10

Однако фосфатные стекла имеют существенные недостатки:

1. Область оптимальных стекол достаточно узкая и при изменении состава стекла может либо значительно повыситься скорость выщелачивания, либо увеличиться температура варки;

2. Некоторые элементы, содержащиеся в отходах (например, Fe, Cr) увеличивают степень кристаллизации стекломатриц.

Были исследованы борофосфатные и фторфосфатные стеклообразующие системы. Использование борофосфатных стекол несколько улучшает положение, но существенно не меняет дела [3]. Использование фторфосфатной системы $\text{Na}_2\text{O}-(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MeF}_3)$, где $\text{Me} = \text{Al, Fe, Cr}$ и др.)- P_2O_5 дает определенные преимущества: несколько снижается температура выплавки; образуются камневидные кристаллические плавы, содержащие до 45–50 % масс. суммы отходов, обладающие высокой химстойкостью в воде при 20 °С – (10^{-6} – 10^{-7} г/см²·сут). Эти плавы исходно закристаллизованы и не меняют свой фазовый состав и химстойкость в воде при длительных выдержках при температурах 300–500 °С, состав отходов может при этом варьировать в довольно широких пределах. К недостаткам системы можно отнести высокую агрессивность фторфосфатного расплава.

Была исследована система $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, область стеклообразования одного из разрезов которой представлена на рис. 2 [1]. Исходя из приведенных результатов, видно, что в данной системе количество включенных отходов составляет 32–38 % масс. в зависимости от температуры варки стекол, т.е. примерно такое же, как в натрий – алюмо-фосфатной системе. Однако температура варки стекол этой системы несколько выше.

Скорость выщелачивания стекол этой системы, определенная по выщелачиванию натрия, представлена в табл. 2.

Она несколько лучше, чем у фосфатной системы, но главное, что скорость выщелачивания стекол гораздо меньше зависит от состава стекла [4]. Существенным недостатком этих боросиликатных стекол является плохая фиксация некоторых элементов, содержащихся в отходах, таких как Cr или Mo, которые в присутствии Na образуют отдельную растворимую в воде фазу

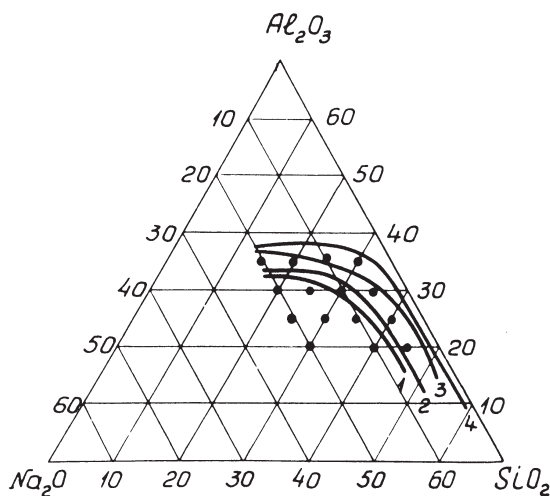


Рис. 2. Область стеклообразования в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, при $\text{CaO} = 15\%$ масс., $\text{B}_2\text{O}_3 = 15\%$ масс. Температура плавки: 1 = 1100 °С, 2 = 1200 °С, 3 = 1300 °С, 4 = 1400 °С [1]

хроматов или молибдатов натрия. Недостатком этих стекол является также повышенная кристаллизруемость при большом содержании некоторых элементов (например, таких как Ca).

И натрий-алюмофосфатные, и натрий-алюмоборосиликатные стекломатрицы вполне годятся для захоронения некоторых видов радиоактивных отходов. Однако для α -активных отходов с большим периодом полураспада высокого уровня активности желательнее иметь матрицы с меньшей скоростью выщелачивания. Для получения материалов с меньшей скоростью выщелачивания были предложены базальтоподобные матрицы и матрицы на основе каменного литья из некоторых горных пород.

Проведенный комплекс исследований по включению различных компонентов твердых радиоактивных отходов (ТРО) и жидких высокоактивных отходов (ВАО), главным образом актинидов, в состав ряда горных пород, привел к выводу, что наиболее перспективной системой для этих целей является базальтоподобная матрица на основе каменного литья. Она представ-

Таблица 2

Скорость выщелачивания в воду при 20 °С стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Состав композиции, масс. %					Скорость выщелачивания, $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{сут} \times 10^{-6}$
Na_2O	Al_2O_3	CaO	B_2O_3	SiO_2	
20	20	0	10	50	9,3
25	20	0	10	45	11,7
20	15	0	10	55	5,7
20	15	0	20	45	0,9
30	15	0	20	35	7,1
40	20	0	5	35	47,0
20	30	10	15	25	1,7
20	20	10	15	35	5,0
10	30	15	15	30	0,2
10	20	15	15	40	0,1
20	30	15	15	20	13,0
20	20	15	15	30	18,0

ляет собой переплавленную шихту, состоящую из порфирита, модифицированного 1,5 % масс. хромита железа – $\text{Fe}^{+2} \text{Cr}_2\text{O}_4$, с добавкой 10–20 % масс. борного ангидрида. Преимущества применения каменного литья связаны с тем, что, в отличие от исходных горных пород, оно более однородно и практически отгазовано. Применение в качестве добавки борного ангидрида эффективно для всех исследованных составов, содержащих уран, торий, стронций, цезий, РЗЭ, плутоний. Таким образом, предлагаемая система достаточно универсальна и позволяет получать однородные плавы (стекла) при температурах, не превышающих 1250 °С.

Указанная матрица на основе каменного литья способна включать в свой состав достаточно большие для целей иммобилизации количества оксидов радиоактивных элементов (десятки % масс.) – основных радионуклидов ТРО и ВАО, образующихся при переработке отработанного ядерного

топлива. Особо следует отметить, что эта матрица может включать в себя не менее 15–20 % масс. диоксида плутония. Экспериментально определенная скорость выщелачивания суммы компонентов матрицы в ультрачистой деионизованной воде при 20 °С составляет $0,5-3 \cdot 10^{-7} \text{ г}/\text{см}^2 \cdot \text{сут}$ в зависимости от природы включаемого элемента и его содержания в матрице (табл. 3) [5].

Что касается базальтовых безборных систем (табл. 3), то их технологическим недостатком является более высокая температура выплавки, необходимая для плавления компонентов шихты, приводящего к получению однородного камневидного плава или стекла. Она составляет ~1400 °С, что предусматривает применение в технологии иммобилизации специального оборудования, например, индукционного плавителя с холодным тиглем (ИПХТ) [6, 7]. Проведенные исследования показали, что скорости выщелачивания при 20 °С безборных

Таблица 3

 Состав и скорость выщелачивания плагов в деионизованной воде при 20 °С ($\times 10^{-7}$ г/см²·сут)

Компо- нент	Состав, % масс.			Скорость выщела- чивания	Состав, % масс.		Скорость выщела- чивания
	КЛ*	B ₂ O ₃	Оксид		КЛ*	Оксид	
U ₃ O ₈	75	8	17	0,5	81	19	2,5
	71	7	22	2,0	77	23	2,0
	72	11	17	1,0	–	–	–
	69	10	21	2,0	–	–	–
ThO ₂	75	8	17	0,5	81	19	0,5
	71	7	22	0,5	77	23	0,5
	72	11	17	0,5	–	–	–
	69	10	21	0,5	–	–	–
SrO	77	8	15	2,5	–	–	–
	74	11	15	1,5	–	–	–
Cs ₂ O	77	8	15	0,5	–	–	–
	71	7	22	0,5	–	–	–
CeO ₂	77	8	15	2,0	91	9	0,5
	78	10	12	2,0	87	13	1,0
	76	9	15	2,0	83	17	0,5
Nd ₂ O ₃	82	10	8	2,0	91	9	1,5
	78	10	12	2,0	87	13	1,5
	76	9	15	2,0	83	17	2,0
PuO ₂	74	7	19	0,2	80	20	0,5
	71	11	18	0,2	–	–	–
	90	10	–	3,0	100	–	2,0

* Каменное литье.

систем, содержащих такие компоненты, как оксиды U, Th, Cs, Nd, Pu в количествах ~20 % масс., находятся в пределах $0,5\text{--}2 \cdot 10^{-7}$ г/см²·сут, т.е. не уступают по этому параметру системам с добавками оксида бора и, тем самым, имеют вполне приемлемые эксплуатационные характеристики. Сами скорости выщелачивания материалов в воде мало зависят от природы включаемого

оксида, от содержания оксида в матрице, и соответствуют значению, определенному для каменного литья. Эти обстоятельства создают определенные технологические преимущества, поскольку реальное содержание указанных компонентов в отходах различного происхождения может заметно различаться, и это будет мало влиять на исследуемую безборную систему.

В реальных условиях поглощенные дозы самооблучения α -радиоактивных материалов могут быть весьма значительны. В настоящей работе при введении в матрицу 20 % масс. плутония они составляли 0,5 МГр/сут, в силу чего исследование влияния этого фактора на основные свойства боратных и безборных систем, содержащих плутоний, представляется весьма важным.

На основании ряда исследований и по опыту эксплуатации высокорadioактивных материалов в таких изделиях, как источники излучения и радиоактивные источники тепла, известно, что эффектом самооблучения может являться как аморфизация вещества, если его начальная форма была кристаллической, так и кристаллизация стекла. Наиболее явно эти процессы происходят в α -радиоактивных материалах. В меньшей степени они также имеют место и в матрицах, содержащих, например, радиоактивный прометий, цезий, стронций. Во всяком случае, в настоящей работе кристаллизация боробазальтовых систем, содержащих порядка 20 % масс. PuO_2 , и полученных в виде стекла, отчетливо проявляется при поглощенных дозах порядка 100–200 МГр, т.е. при их выдержке с момента изготовления в течение 200–400 сут. Об этом свидетельствуют данные проведенных

рентгенографических исследований. Сказанное обуславливает необходимость исследований влияния кристаллизации на свойства материалов, включающих различные радиоактивные отходы.

Зависимость скорости выщелачивания плутония от времени выдержки образцов в ультрачистой деионизованной воде приведена на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что радиационная кристаллизация оказывает влияние на величины скоростей выщелачивания в течение времени до ~1 года с момента изготовления материала, т.е. до величин экспозиционных доз порядка 150 МГр. При этом процесс фазовых превращений влечет за собой незначительное снижение химической стойкости. В дальнейшем, по завершению процесса радиационной кристаллизации, устойчивость материалов к растворению в воде практически восстанавливается и в дальнейшем не меняется во времени. Тем самым самооблучение оказывает влияние на данное свойство главным образом в процессе трансформации стеклообразной матрицы в кристаллическую. Влияние самооблучения на химические свойства закристаллизованных образцов, в дальнейшем, т.е. по прошествии примерно года с момента их изготовления, не отмечается.

Сказанное согласуется с результатами, полученными при исследовании влияния самооблучения на безборные кристаллические матрицы. Для этих материалов самооблучение не оказывает заметного влияния как на скорость выщелачивания суммы элементов, так и на скорость выщелачивания плутония из них, и составляет, соответственно, $5\text{--}8 \cdot 10^{-8}$ и $2\text{--}4 \cdot 10^{-8}$ г/см²·сут.

Установлено также, что по своей химической стойкости (скорость выщелачивания материалов в ультрачистой деионизованной воде $0,5\text{--}5 \cdot 10^{-7}$ г/см²·сут (по сумме компонентов)) боробазальтовые композиции, включающие реальные отходы ПО «Маяк» (ТРО без графита; ВАО – рафинат 1 цикла; ВАО – фракция Sr–Cs; ВАО – фракция ТПЭ–РЗЭ; ВАО – рафинат 6 цикла) в количестве до 40 % масс., вполне приемлемы для их иммобилизации.

Кроме того, для исследования радиационной стойкости стекол на основе базальтов были выплавлены образцы с высоким содержанием

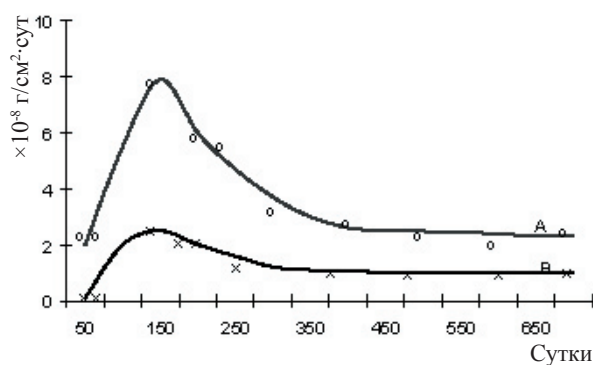


Рис. 3. Скорость выщелачивания суммы компонентов боробазальтовых матриц (А) и приведенная скорость выщелачивания плутония (В), в зависимости от времени (мощность дозы – 0,5 МГр/сут)

америция. Состав образцов, выплавленных для исследования радиационно-физических свойств и химической стойкости, дан в табл. 4 [8].

Образцы изготавливались смешением порошков компонентов с последующим плавлением и медленным охлаждением вместе с печью. Данные предварительных исследований показали, что время плавления при данной температуре достаточно для получения гомогенного плава.

В данной работе использовали оксид америция с удельной активностью $2,5 \cdot 10^{10}$ Бк/г. Рассчитанная мощность поглощенной образцом дозы α -излучения была 0,5 МГр/день, при этом принятая энергия α -частиц была 5,5 МэВ. Вес каждого образца был $\sim 2,5$ г, величина поверхности ~ 5 см². Скорость выщелачивания образцов приведена в табл. 5.

Скорость выщелачивания образцов, определенная: А (кондуктометрически) и В (радиометрически), $\sim 10 \cdot 10^{-7}$ г/см²·сут. Состав и условия синтеза приведены в табл. 4.

Проведенные исследования показали, что радиационное воздействие (даже α -частиц) не оказывает заметного влияния на свойства базальтовых и боробазальтовых матриц и прежде всего – на скорость выщелачивания.

Все приведенные и некоторые другие данные сведены в общую табл. 6, в которой представлены и сопоставлены основные свойства матриц: степень включения отходов, температуры варки или спекания (в случае керамики), интервал скоростей выщелачивания, применимость матриц для различных фракций РАО от переработки ОЯТ и конверсии оружейного плутония, применимость для процесса иммобилизации различных аппаратов, достоинства и недостатки матриц и технологических схем, степень изученности матриц, проработанности и готовности процессов. Из приведенных данных можно сделать несколько выводов:

1. Исследованы различные стеклоподобные и минералоподобные системы в качестве матриц для иммобилизации РАО.

Таблица 4

Состав и условия синтеза Am-содержащих образцов

№№ образцов	Состав смеси, масс.%			Температура синтеза, °С	Время плавления, час	Состояние образца
	Каменное литье	B ₂ O ₃	AmO ₂			
1	65	15	20	1250	2	Стекло
2	80	–	20	1350	2	Кристаллический плав

Таблица 5

Скорость выщелачивания образцов с учетом содержания Am (А – кондуктометрически, В – радиометрически), 10^{-7} г/(см²·сут). Состав и условия синтеза приведены в табл. 4.

Образцы, №		Сутки						
		2	15	35	55	75	95	120
1	А		2,0	2,0	1,0	2,5	3,0	2,0
	В	5,5	2,5	2,0	1,5	3,0	4,0	4,0
2	А			1,0	0,5	1,5	2,0	1,5
	В	1,5	0,5			0,4		0,3

Таблица 6

Сравнительные характеристики матриц

Матрицы (стекло- и минералоподобные)	Свойства матриц			Технологии			
	Т изготовления, °С	Содержание включенных отходов, % масс.	* $V_{\text{вкл}}$ Исходная закристаллизов. матрица	Возможное аппаратурное оформление	Степень проработанности технологии	Достоинства матриц и технологий	Недостатки матриц и технологий
1 Натрий-алюмофосфатная (стекло)	900–1100	30–45 (ИПХТ – до 50 % ТРО)	$\frac{10^{-5}-10^{-6}}{10^{-4}-10^{-3}}$	Керамическая плавильная электропечь ЭП-500/1р	Внедрена на ПО «МАЯК»	Низкая Т варки, возможность мокрого флюсования	Высокая $V_{\text{вкл}}$, сильная зависимость ее от состава, повышенная кристаллизуемость при наличии некоторых элементов
2 Натрий-алюмоборофосфатная (стекло)	850–1050	30–45 (ИПХТ – до 50 % ТРО)	$\frac{10^{-5}-10^{-6}}{10^{-4}-10^{-3}}$	Электропечь ЭП-500/1р	Внедрена на ПО «МАЯК»	—, меньшая кристаллизуемость по сравнению с фосфатными стеклами	—
3 Натрий-алюмофторофосфатная (апатитоподобные)	850–1000	40–50	$\frac{10^{-6}-10^{-7}}{10^{-6}-10^{-7}}$	Электропечь ЭП-500/1р	Особых трудностей при внедрении не ожидается	Камневидные плавы исходно закристаллизованы, $V_{\text{вкл}}$ низкая и не меняется, мало зависит от состава	Повышенная агрессивность расплава
4 Боросиликатная (стекло)	1100–1200	30–45 (ИПХТ – до 50 % ТРО)	$\frac{10^{-6}-10^{-7}}{n \cdot 10^{-6}}$	Электропечь ЭП-500/1р	Особых трудностей при внедрении не ожидается	Более низкая $V_{\text{вкл}}$, меньшая зависимость от состава и от кристаллизации	Повышенная Т работки, осложнена отмывка нарастающего газа
5 Базальтоподобная [5]	1400	~30	$\frac{10^{-7}-10^{-8}}{n \cdot 10^{-7}}$	ИПХТ	Недостаточная аппаратурная и технологическая проработанность	Низкая $V_{\text{вкл}}$, отсутствует зависимость от кристаллизации	Высокая Т синтеза, сложное аппаратурное оформление
6 Базальтоподобная + B_2O_3 [5]	1200–1300	~30	$\frac{10^{-7}-10^{-8}}{n \cdot 10^{-7}}$	ЭП-500/1р, ИПХТ, (горпресс, холпресс)	Недостаточная аппаратурная и технологическая проработанность	Низкая $V_{\text{вкл}}$, отсутствует зависимость от кристаллизации	Недостаточная аппаратурная и технологическая проработанность

Продолжение таблицы 6

Матрицы (стекло- и минералоподобные)	Свойства матриц			Технологии			
	Т изготовления, °С	Содержание включенных отходов, % масс.	* $V_{\text{вылц}}$ Исходная закритическая матрица	Возможное аппаратное оформление	Степень проработанности технологий	Достоинства матриц и технологий	Недостатки матриц и технологий
7 Хромитно-ниобатная (минерало-подобная) [9]	1350–1450	30–40	$\frac{10^{-7}-10^{-9}}{n \cdot 10^{-8}}$	Холодное прессование и спекание в высокотемпературных печах	Проработана в лабораторном масштабе	Низкая $V_{\text{вылц}}$, отсутствует зависимость от кристаллизации	Малая разработанность технологий
8 Хромитно-ниобатная + базальт (минералоподобные) [9]	1000–1100	30–40	$\frac{10^{-7}-10^{-9}}{n \cdot 10^{-7}}$	Холодное прессование и спекание, гор-пресс (возможно снижение Т до 700–800 °С)	Проработана в лабораторном масштабе	Низкие $V_{\text{вылц}}$ и $T_{\text{спек}}$ матрица исходно кристаллическая	Малая разработанность технологий
9 Хромитно-ниобатная + базальт + V_2O_3 (минер) [9]	1000–1100	30–40	$\frac{10^{-7}-10^{-9}}{n \cdot 10^{-7}}$	Холодное прессование и спекание, гор-пресс (возможно снижение Т до 700–800 °С)	Проработана в лабораторном масштабе	Низкая $V_{\text{вылц}}$ и $T_{\text{спек}}$ матрица исходно кристаллическая	Малая разработанность технологий
10 Ферросиликатная (стекло-плав) [9]	1500	~65 (ТРО)	$6 \cdot 10^{-7}$	ИПХТ	Проработана в лабораторном масштабе	Высокое содержание ТРО, низкая $V_{\text{вылц}}$	Малая разработанность технологий, высокая $T_{\text{спек}}$
11 Натрий-силикатная (стекло-плав) [9]	1230	~30 (ТРО)	10^{-6}	ИПХТ, ЭП-500/1р	Проработана в лабораторном масштабе		Малая разработанность технологий

Примечание. * Скорость выщелачивания, г/см²·сут, – ($V_{\text{вылц}}$).

2. Технологически удобные процессы иммобилизации РАО с использованием жидкого флюсования и относительно низкой температуры варки дают фосфатные матрицы с недостаточной низкой скоростью выщелачивания – 10^{-5} – 10^{-6} г/см²·сут.

3. Технология изготовления материалов с достаточно низкой скоростью выщелачивания – 10^{-7} – 10^{-8} г/см²·сут значительно сложнее и предполагает использование довольно высоких температур (1400–1800 °С) и сложных, недостаточно надежных и отработанных аппаратов (напр., типа ИПХТ) или высокотемпературных печей с нагревателями из MoSi₂, LaCrO₃.

4. На наш взгляд, следует продолжить работу в направлении:

- уменьшение скорости выщелачивания относительно легкоплавких матриц;
- увеличение степени надежности и производительности высокотемпературных плавителей;
- разработки одноразовых плавильных тиглей;
- разработки более стойких конструкционных материалов для тиглей-плавителей (одно- или многоцветных).

5. Необходимо разработать надежные методы контроля качества матриц ввиду сложности соблюдения точного состава получаемых материалов в радиохимическом производстве.

6. В настоящее время в России для иммобилизации ВАО в радиохимических производствах используются натрий-алюмо-фосфатные стекломатрицы, однако они должны быть заменены либо на модифицированные алюмо-фосфатные, либо на алюмо-боро-силикатные или минералоподобные матрицы. Применение борофосфатных стекол несколько улучшает ситуацию, однако необходимо подробное исследование зависимости кристаллизационной способности от состава стекла. Также необходимо углубленное исследование новых стеклообразующих добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брежнева Н.Е., Минаев А.А., Озиранер С.Н. "Vitrification of high sodium-aluminum wastes: composition ranges and properties", ИФХ АН,

Moscow. McCarthy, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Т. 1., Plenum Press, N-Y and London, Proceedings of the Symposium, Boston, Massachusetts, November 28 – December 1, 1978. – С. 43–50.

2. Поляков А.С., Борисов Г.Б., Моисеенко Н.И. и др. Опыт эксплуатации керамического плавителя ЭП-500/1Р по остекловыванию ЖРО // Атомная энергия. – 1994. – Т. 76, вып. 3. – С. 183–188.

3. Патент на изобретение RU №2203513 С2 класс 7 G 21 F 9/16, "Стеклообразный фосфатный состав для иммобилизации алюминийсодержащих жидких высокоактивных отходов" по заявке №2001106894, дата поступления: 13.03.2001, авторы изобретения: Машкин А.Н., Медведев Г.М., Ремизов М.Б., Минаев А.А., Борисов Г.Б. и др. Патентодержатель – ПО "Маяк".

4. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Крылова Н.В. и др. Thermal, chemical and radiation stability of vitreous radioactive waste. – Там же. – P. 117–121.

5. Пикаев А.К., Минаев А.А., Кузнецов Д.Г. и др. Physicochemical Studies of Basalt-Like Materials Intended for Use as Radioactive Waste Immobilization Matrices / Доклад на конференции WM-99 в Туссоне, США.

6. Ровный С.И., Гужавин В.И., Музгин В.Н. Физико-химические, механические и минералогические характеристики ферро-силикатных матриц, содержащих ТРО / Доклад на IV Российской конференции по радиохимии. г. Озерск, октябрь 2003 г.

7. Ровный С.И., Гужавин В.И., Музгин В.Н. Комплексное исследование минералоподобных матриц для иммобилизации РАО / Доклад на Всероссийской конференции по аналитической химии. Москва, апрель 2004 г.

8. Минаев А.А., Кузнецов Д.Г., Попов И.Б. и др. Development of Methods of an immobilisation of Am-inclusive waste which are obtained at conversation of metallic plutonium / Доклад на Международной Конференции ICSEM-03 в Оксфорде, УК. Сентябрь 2003. – 9 с.

9. Минаев А.А., Кузнецов Д.Г., Пикаев А.К. ИФХ РАН, Москва. "Physicochemical Studies of Uranium and REE Chromites and Niobates for Use as Radioactive Waste Immobilization Matrices". Доклад на Международной Конференции WM-99 в Туссоне, США. 28 февраля–3 марта 1999.