

УДК 666.3-127.2:66.074.3:621.039.7

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПАРОВ ИОДИДА ЦЕЗИЯ НА КЕРАМИЧЕСКИХ БЛОЧНО-ЯЧЕИСТЫХ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ В СРЕДЕ АЗОТА

©2024 г. М. Д. Гаспарян^а, *, В. Н. Грунский^а, Ю. С. Мочалов^б, Л. П. Суханов^б, А. В. Титов^а, С. В. Тищенко^а, Е. О. Обухов^а

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

^бАкционерное общество “Прорыв”, Москва, Россия

e-mail: migas56@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023 г.

После доработки 28.05.2024 г.

Принята к публикации 30.06.2024 г.

Исследована эффективность отдельного улавливания оксида цезия и молекулярного иода, образующихся при разложении иодида цезия, в процессе высокотемпературной хемосорбции на керамических высокопористых блочно-ячеистых контактных элементах в среде азота. Определена динамическая сорбционная емкость контактных элементов с нанесенным алюмосиликатным сорбционно-активным слоем и с активным слоем нитрата серебра по цезию и иоду соответственно. Разработанные контактные элементы рекомендуются для использования в системе локальной газоочистки пирохимического передела переработки облученного ядерного топлива реакторов на быстрых нейтронах.

Ключевые слова: керамические высокопористые ячеистые материалы, контактные элементы, сорбционно-активный слой, иодид и оксид цезия, молекулярный иод, высокотемпературная хемосорбция, сорбционная емкость, эффективность улавливания, азот

DOI: 10.31857/S0040357124030125 EDN: BVIEBV

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе [1] рассмотрен процесс отдельного улавливания оксида цезия и молекулярного иода, образовавшихся из иодида цезия в окислительной среде, моделирующей общие условия головных процессов переработки различных видов облученного ядерного топлива (ОЯТ). Настоящее исследование рассматривает эффективность аналогичного процесса локализации CsI в среде азота, как пример применения керамических высокопористых блочно-ячеистых контактных элементов (КЭ) в условиях, приближенных к условиям проведения процесса высокотемпературной обработки (ВТО) ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах (РБН).

В перспективной комбинированной схеме переработки облученного топлива РБН [2] на головной операции пирохимического передела предполагается азотирование фрагментированного ОЯТ в интервале температур 500–800°C. При этом происходит охрупчивание оболочек твэлов и разрыхление топлива в результате протекания реакций [3]:



Далее ОЯТ охлаждается до температуры 100–300°C и нагревается до 1000°C уже в атмосфере аргона. В отличие от окислительной среды, иодид цезия в инертной для него среде азота и в аргоне отгоняется в локальную систему газоочистки в неразложившемся виде.

Предварительные эксперименты по локализации соединений ЛПД, выделяющихся во время проведения пирохимического вскрытия оболочек твэлов с плотным нитридным топливом, проходящего в инертной среде аргона, подтвердили эффективность КЭ нового поколения на основе керамических высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) в процессе селективного улавливания цезия [4]. Заметное его количество, подтвержденное радиометрическим анализом без определения фазового состава, селективно улавливалось контактными элементами с алюмосиликатным активным слоем (АС). Все остальные КЭ в сборке с различными АС также улавливали радиоцезий в меньших на по-

рядок количествах, подтверждая сорбционную способность самой керамической основы из ВПЯМ.

Высокая эффективность локализации соединений иода в среде аргона (до 99.97%), подтвержденная в [5], также представлялась положительным заделом для реализации схемы раздельного улавливания цезия и иода в среде азота.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментов по определению эффективности улавливания и динамической сорбционной емкости по цезию и иоду использовались КЭ, синтезированные классическим методом дублирования структуры полимерной матрицы из ретикулированного пенополиуретана с нанесенным АС (30% γ - Al_2O_3 + 70% SiO_2) и АС AgNO_3 соответственно. Методика их синтеза подробно описана в первой части исследований [1]. В работе [6] приведены характеристики полученных КЭ со специфической сетчато-ячеистой структурой, обеспечивающей высокую внешнюю объемную поверхность (до $2500 \text{ м}^2/\text{м}^3$), доступную для контакта с реакционным газовым потоком. Как следствие, повышается интенсивность массообмена процесса хемосорбции, проходящего, как правило, во внешнедиффузионной области. Такие свойства КЭ позволяют предполагать при их применении повышенную эффективность диссоциации CsI и последующее раздельное улавливание цезия и иода в среде азота.

Размеры синтезированных образцов КЭ составляли 35–50 (d) – 50 (h) мм, плотность пор 30 ppi, средняя плотность $0.4\text{--}0.5 \text{ г}/\text{см}^3$, открытая пористость 75–85%. Содержание алюмосиликатного АС 15–25 мас. %, АС нитрата серебра 10–15 мас. %.

Эксперименты проводили на специализированном сорбционно-каталитическом испытательном стенде (рис. 1). В блоке подготовки газа-носителя (I) баллонный азот с добавлением при необходимости кислорода из концентратора (КК) через регуляторы-расходомеры (РР) поступает в реактор из коррозионностойкой стали (Р), футерованный в высокотемпературной зоне корундовой трубкой. В блоке II происходит нагрев газа-носителя в электропечи (ЭП) с терморегуляторами (ТР) до температуры эксперимента ($800\text{--}960^\circ\text{C}$) и испарение навески иодистого цезия в корундовом тигле. Далее пары CsI поступают в испытательный блок III, где в реакторе установлены 2 образца КЭ (№ 1 и 2) диаметром 35 мм с алюмосиликатным АС (испытуемый и контрольный) для улавливания цезия. В зоне реактора, расположенной вне электропечей (блок IV) с температурой $150\text{--}250^\circ\text{C}$, установлены также 2 образца КЭ (№ 3 и 4) диаметром 50 мм с нанесенным АС AgNO_3 , предназначенные для улавливания I_2 . Наличие проскока иода качественно наблюдается по изменению цвета раствора крахмала в ловушке (Л), установленной на выходе из реактора. Дифманометр (ДМ) измеряет газодинамическое сопротивление КЭ и всей сборки.

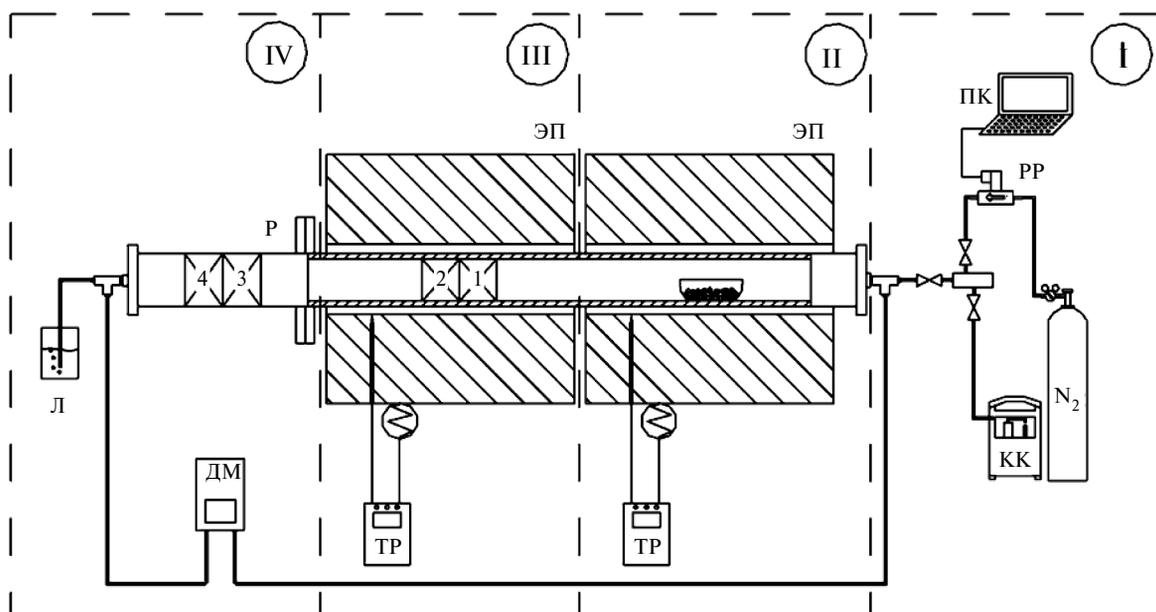
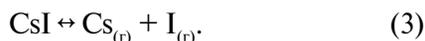


Рис. 1. Схема сорбционно-каталитического стенда.

Условия проведения испытаний и расчетные характеристики для выбранных значимых экспериментов приведены в табл. 1 со следующими принятыми обозначениями: динамическая сорбционная емкость КЭ по цезию – A_{Cs} , A_{CsI} – сорбционная емкость по CsI, A_{I_2} – сорбционная емкость по I_2 , E_{CsI} – суммарная эффективность улавливания CsI всеми образцами сборки. Степень использования AC (η) определяется как отношение фактического прироста массы КЭ к максимально возможному теоретически с учетом количества и состава образовавшихся продуктов хемосорбции Cs и I_2 по данным рентгенофазового анализа (РФА), которые приводятся ниже в мас. %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

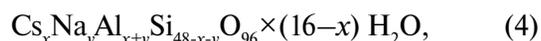
Как показали проведенные эксперименты, в высокотемпературной среде азота CsI разлагается частично со степенью диссоциации 40–85%, растущей с увеличением температуры, по уравнению:



При этом образовавшийся атомарный цезий реагирует с оксидами алюминия и кремния в AC ($\gamma-Al_2O_3 \times 4SiO_2$), внедряясь в структуру тетраэдров

(SiAl)O₄ с подвижным кислородом с образованием поллуцита нестехиометрического состава. Молекулярный иод, как и в окислительной среде, далее поступает в низкотемпературную зону реактора, где улавливается нанесенным на КЭ нитратом серебра. Качественным подтверждением разложения CsI в той или иной степени является изменение цвета раствора крахмала в ловушке до фиолетово-синего во всех экспериментах в результате незначительного проскока иода.

Природный поллуцит имеет алюмосиликатный каркас из связанных тетраэдров SiO₄ и AlO₄, в крупных цеолитных полостях которого размещены катионы Cs⁺, Na⁺ и молекулы воды. Как утверждается в работе [7], его состав всегда нестехиометрический, а развернутая кристаллохимическая формула в расчете на элементарную ячейку с 48 (Si, Al) имеет следующий вид:



где $2y \geq 16-x \geq y$. В структурной формуле поллуцита $x + y$ всегда < 16 и, соответственно, число атомов кремния превышает 32 (обычно на 1–2 единицы), а число атомов алюминия настолько же менее 16. Разделив приведенную формулу на 16, получаем упрощенное выражение:

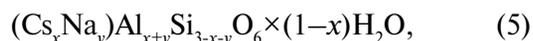


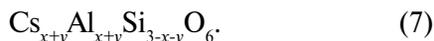
Таблица 1. Условия проведения и результаты экспериментов по улавливанию паров CsI: газ-носитель – N₂ или (N₂ + O₂)*, $\tau_{exp} = 10$ ч

№ эксп.	№ обр.	W_G , л/ч	t_{exp} , °C	m_{CsI} , г	C_{CsI} , г/л	A_{Cs} , г/г КЭ (г/г AC)	A_{CsI} , г/г КЭ	A_{I_2} , г/г КЭ (г/г AC)	η , %	E_{CsI} , %
1	1	70	800	4.90	0.0070	0.06 (0.18)	0.12	–	39.0	94.8
	2					0.01 (0.03)	0.01	–	9.5	
	3					–	–	0.03 (0.13)	35.2	
	4					–	0.01	0.01 (0.04)	12.1	
2	1	100	900	6.58	0.0066	0.11 (0.52)	0.04	–	65.0	97.5
	2					–	0.01	–	–	
	3					–	–	0.05 (0.22)	52.5	
	4					–	–	0.01 (0.05)	10.7	
3	1	100	960	7.28	0.0073	0.14 (0.60)	0.02	–	75.8	99.9
	2					–	0.01	–	–	
	3					–	0.01	0.07 (0.48)	69.2	
	4					–	–	0.01 (0.05)	10.7	
4*	1	150	900	8.75	0.0058	0.16 (0.68)	0.02	–	85.2	99.5
	2					0.02 (0.07)	–	–	10.8	
	3					–	0.01	0.10 (0.65)	95.9	
	4					–	–	–	–	
5	1	150	800/400	6.05	0.0040	–	0.30	–	–	98.7
	2					–	0.02	–	–	

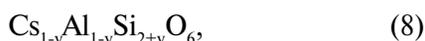
где $2y \geq 1-x \geq y$. Используя принятую в [7] схему структурного замещения:



где ($2 \geq m \geq 1$), при $m = 1$ получаем формулу синтетического безводного поллуцита:



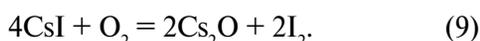
Если принять $x + y = 1$, получаем классическую формулу поллуцита стехиометрического состава – $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$. При другом крайнем значении последнего неравенства ($x + 2y = 1$) получаем поллуцит с формулой:



где $y \sim 0,06-0,12$ ($1/16-2/16$). Структуру активного слоя исследуемых в настоящей работе КЭ можно представить в форме $(1-y)\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2(2+y)\text{SiO}_2$.

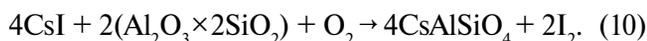
Таким образом, можно предположить, что в процессе хемосорбции атомарного цезия заполняются вакантные места в полостях структурных тетраэдров и образуется поллуцит близкого к стехиометрическому состава, что подтверждается данными РФА. Механизм этого процесса, безусловно, требует дальнейшего изучения.

Теоретически кислород для окисления иодида цезия может поступать из применяемого газа-носителя – азота высокой чистоты с содержанием O_2 , измеряемым в ходе испытаний газоанализатором OMD-501X AC, равным 140–150 ppmv. В пересчете на условия всех серий экспериментов такое количество кислорода соответствует окислению 60–80% от общего количества цезия, поступающего в реактор с CsI, в соответствии с уравнением:



Полученный оксид цезия реагирует с алюмосиликатным AC по схеме, предложенной в [1], с образованием поллуцита. При суммарной эффективности улавливания более 99% оставшиеся 20–40% цезия адсорбируются в AC КЭ как в форме $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ по предложенному выше механизму (до 90%), так и в виде неразложившегося CsI, что подтверждено рентгенографически.

Аналогичный подход предложен в работе исследовательского института атомной энергии KAERI (Южная Корея) [8]. С целью получения в результате хемосорбции цезия, генерированного его иодидом в окислительной среде, преимущественно цезиевого нефелина (CsAlSiO_4), используют зольные фильтры на основе каолинита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$). Процесс идет по реакции:



В восстановительной среде ($4\%\text{H}_2 + \text{Ar}$) состав сорбента представляется как $(\text{Al}_2\text{O}_3 \times 12\text{SiO}_2)_{x+y}$, где $x + 2y = 1$, с получением в результате реакции того же стехиометрического нефелина. При этом полагается, что для окисления CsI используется кислород из материала фильтра, но степень его диссоциации и дальнейшего участия цезия в процессе хемосорбции незначительна (менее 1%).

В наших экспериментах, как следует из данных табл. 1, суммарная эффективность улавливания иодида цезия при различных температурах, расходах азота и концентрациях в нем CsI, определяемая соотношением прироста массы всех КЭ по Cs, I и CsI к массе испарившегося иодида цезия, равно как и эффективность раздельного улавливания цезия и иода, составила 94.8–99.9%.

Сорбционная емкость по цезию, уловленному в процессе хемосорбции с образованием поллуцита, растет с увеличением температуры и составляет 0.06–0.14 г Cs/г КЭ, в то же время емкость по уловленному за счет физической адсорбции CsI снижается в пределах 0.12–0.02 г/г. Рост поллуцитовой составляющей емкости соответствует увеличению степени диссоциации иодида цезия. В большинстве экспериментов первый КЭ с AC из смеси $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ улавливал по двум механизмам практически весь цезий, не набирая максимальной сорбционной емкости при степени использования AC 39.0–85.2%. Установленный за ним контрольный образец практически ничего не поглощал. Отметим, что скорость испарения CsI в среде азота примерно в 1.5 раза меньше по сравнению с экспериментами в окислительной среде [1].

Характерная дифрактограмма образца КЭ, испытанного в среде азота при температуре 800°C, приведена на рис. 2. Кроме материалов ВПЯМ (корунд – 61.3%, муллит – 8.6% и следы кварца – 0.4%) в фазовом составе присутствуют поллуцит (12.9%) и 16.8% неразложившегося CsI. В данном случае степень диссоциации иодида цезия составляет 39.3%.

На следующем рис. 3 приведена дифрактограмма образца КЭ, испытанного при температуре 900°C. При ее расшифровке идентифицированы корунд (61.6%), муллит (11.2%), поллуцит (17.7%) и новая фаза CsI_3 (9.5%).

Комплексное соединение трииодид цезия (CsI_3), образование которого в газовых потоках отмечается также в работе [9], вероятно, является результатом протекания на поверхности КЭ побочной реакции образовавшегося иода с непрерывно поступающим в реактор иодидом цезия:

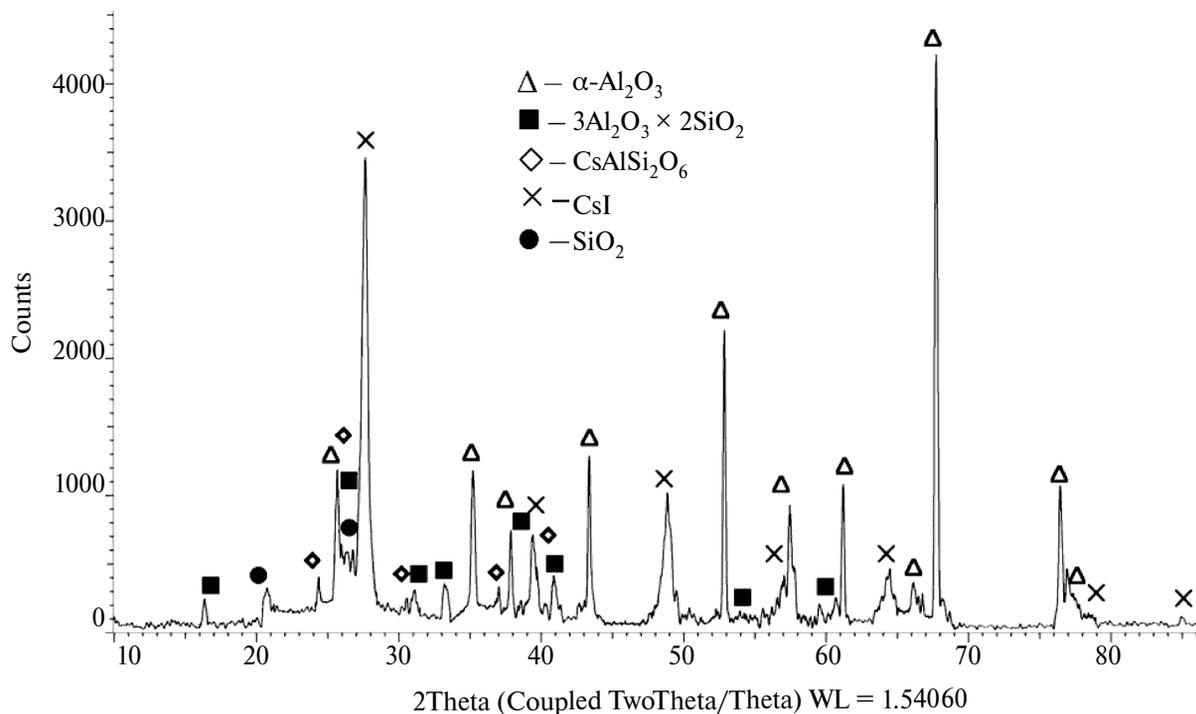


Рис. 2. Фазовый состав образца КЭ после улавливания Cs при $t_{\text{exp}} = 800^\circ\text{C}$, газ-носитель – N_2 .

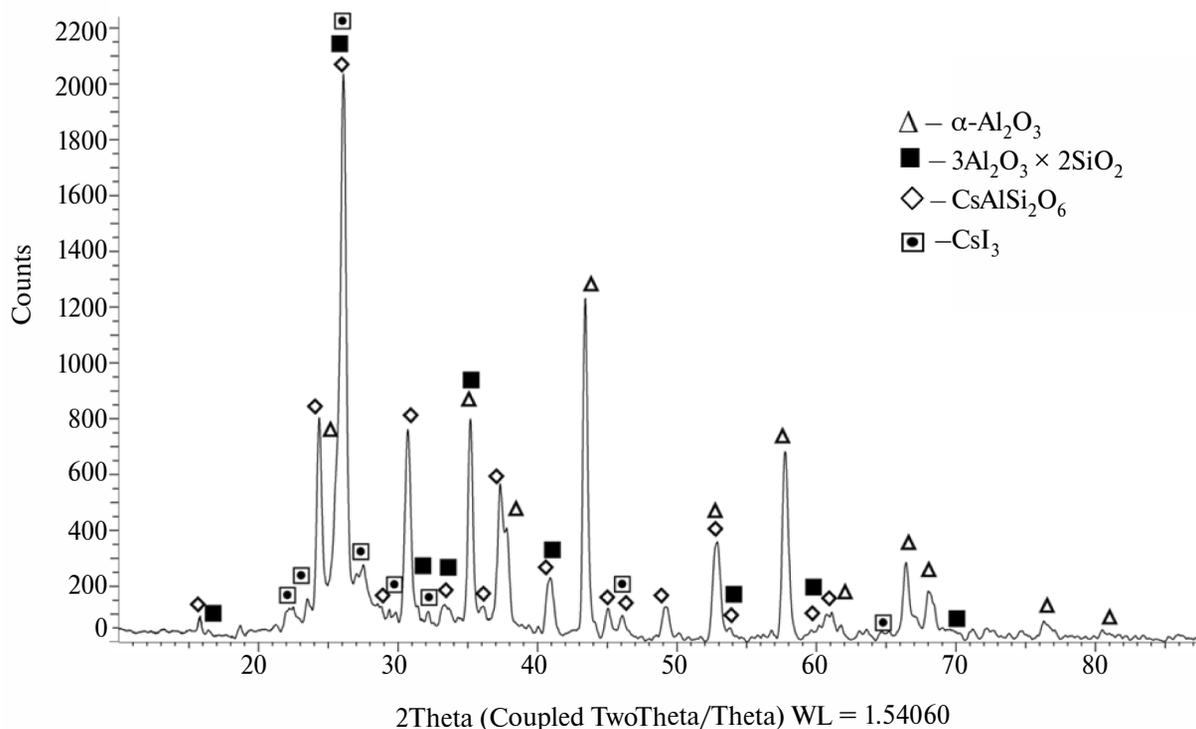
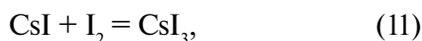


Рис. 3. Фазовый состав образца КЭ после улавливания Cs при $t_{\text{exp}} = 900^\circ\text{C}$, газ-носитель – N_2 .



а степень диссоциации иодида цезия возрастает до 75.0%.

На рис. 4 представлена дифрактограмма образца КЭ, испытанного при повышенной темпе-

ратуре 960°C . Кроме корунда (60.6%) и муллита (10.2%) в его фазовом составе наблюдается изменение соотношения $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ и CsI_3 в сторону первого соединения (22.7% : 6.5%), а образование второго, видимо, затруднено вследствие по-

вышения эффективности основного процесса хемосорбции при степени диссоциации иодида цезия 85.2%.

На рис. 5 приведен фазовый состав образца КЭ с AgNO_3 , установленного в холодной зоне

реактора (200°C) после улавливания цезия при 900°C и уловившего практически весь образовавшийся I_2 .

Кроме материала керамической основы (корунд – 55.7% и муллит – 9.5%) в нем присутствует

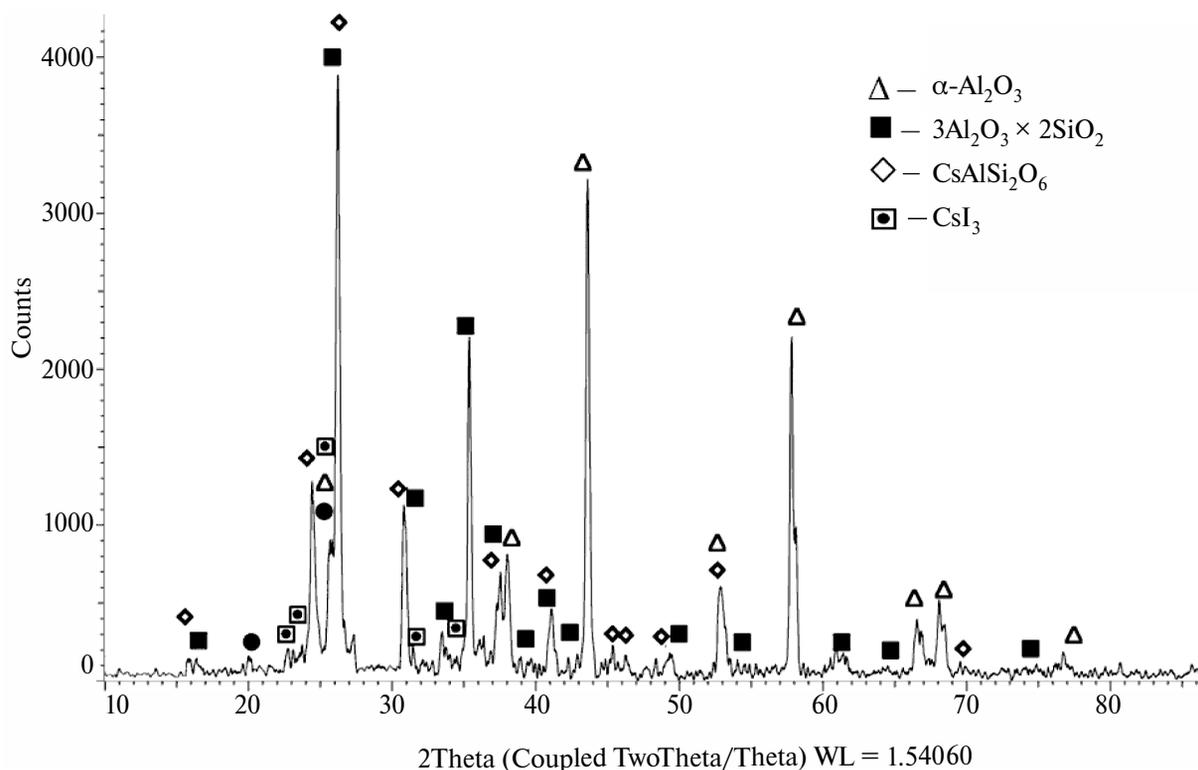


Рис. 4. Фазовый состав образца КЭ после улавливания Cs при $t_{\text{exp}} = 960^\circ\text{C}$, газ-носитель – N_2 .

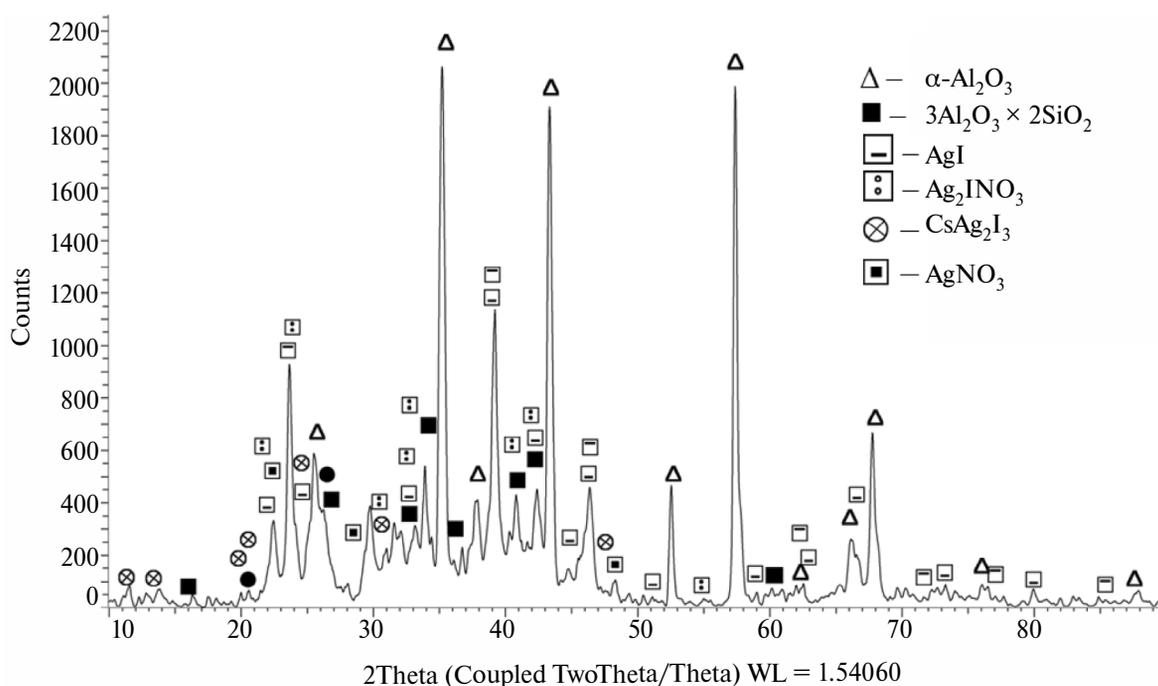


Рис. 5. Фазовый состав образца КЭ после улавливания I_2 при $t_{\text{exp}} = 200^\circ\text{C}$, газ-носитель – N_2 .

основной продукт хемосорбции — иодид серебра (16.8%), непрореагировавший остаток нанесенного на ВПЯМ нитрата серебра (4.5%) и незначительные количества новых фаз: дисереброиода нитрата (Ag_2INO_3 — 6.4%), образование которого наблюдалось и в окислительной среде [1], а также сложного галогенида CsAg_2I_3 (7.1%), в состав которого, вероятно, входит прошедший через высокотемпературную зону реактора в результате проскока иодид цезия. В разных экспериментах сорбционная емкость первых по ходу газа КЭ с нанесенным AgNO_3 по молекулярному иоду, не учитывающая иод, уловленный в составе CsI , находится в пределах значений 0.03–0.07 г/г.

Для более глубокого окисления CsI и исключения протекания реакции (11) необходимо добавлять в газовый поток небольшое количество кислорода или воздуха. Как показано в эксперименте № 4, для практически полного перехода цезия в форму оксида и последующего его улавливания КЭ с алюмосиликатным АС достаточно добавления минимального количества O_2 (6 мл/мин). Эффективность улавливания CsI составила 99.5%; сорбционная емкость по цезию — 0.16 г/г; по иоду — 0.10 г/г для КЭ с активным AgNO_3 . Дифрактограмма образца КЭ после улавливания иодида цезия в среде ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) при температуре 900°C приведена на рис. 6, из которого следует, что почти весь цезий уловлен в форме поллуцита при следующем массовом содержании фаз: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ — 57.8%; $3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$ — 12.5%;

$\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ — 27.8%; CsI — 1.9%. Таким образом, достигается общая цель по разработке основ химической технологии отдельной локализации изотопов цезия и иода, поставленная в работе [1].

Наличие в фазовом составе различных образцов КЭ, независимо от типа нанесенного АС и температурной зоны реактора иодида и трииодида цезия, подтверждает заключение, сделанное в работах [1, 10], о способности керамических ВПЯМ удерживать радиоактивные и токсичные аэрозоли по сорбционно-фильтрационному механизму.

Для проверки эффективности данного процесса в среде азота проведен эксперимент № 5 по улавливанию испарившегося при температуре 800°C иодида цезия КЭ с плотностью пор 30 ррi без нанесенного АС, установленными в блоке IV при температуре в электропечи 400°C. После охлаждения до этой температуры пары иодида цезия должны кристаллизоваться и переходить в аэрозольную форму. Сорбционная емкость по уловленному веществу, которым по данным РФА является исключительно CsI , составила ~ 0.30 г/г КЭ. При этом разложения иодида цезия с выделением молекулярного иода не наблюдалось.

Газодинамическое сопротивление сборки реактора с 4 КЭ при расходе газа-носителя 180 л/ч (линейная скорость 5 см/с) в начале и после окончания экспериментов по улавливанию CsI находится на уровне незагруженного реактора и составляет < 10 Па.

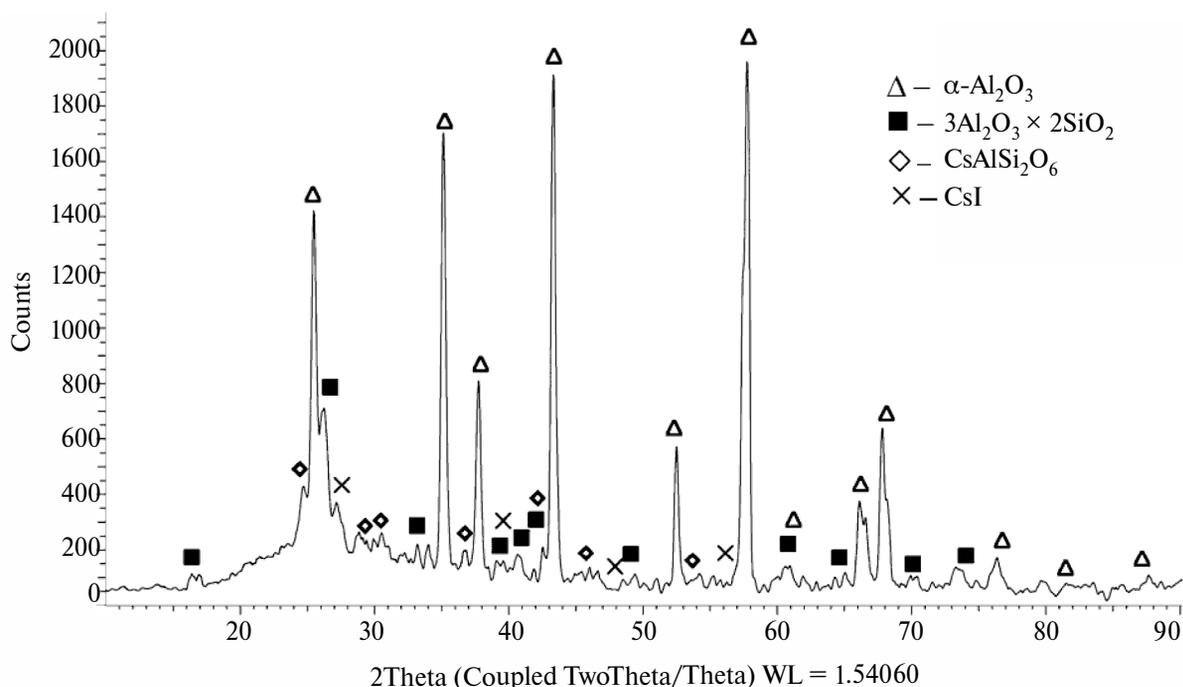


Рис. 6. Фазовый состав образца КЭ после улавливания Cs при $t_{\text{exp}} = 900^\circ\text{C}$, газ-носитель — ($\text{N}_2 + \text{O}_2$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В среде азота происходит частичное разложение CsI со степенью диссоциации 40–85%, в результате которого, аналогично процессам высокотемпературной хемосорбции в окислительной среде, образовавшийся атомарный цезий может улавливаться активным алюмосиликатным слоем КЭ с образованием $CsAlSi_2O_6$, неразложившийся CsI удерживается за счет физической адсорбции, а молекулярный иод улавливается КЭ с активным $AgNO_3$. Сорбционная емкость КЭ по цезию достигает 0.14 г/г, по молекулярному иоду – 0.07 г/г, по CsI – 0.12 г/г КЭ.

Добавление минимального количества кислорода к азоту решает вопрос практически полного окисления цезия в CsI до оксида. В отличие от процесса ВТО, проводящегося в окислительной среде ($Ar + O_2$), в технологической цепочке процесса азотирования ОЯТ для гарантированного раздельного улавливания цезия в форме поллукита и образовавшегося иода необходимо предусмотреть подачу кислорода или воздуха на линии отходящих газов.

На примере иодида цезия подтверждена способность КЭ с блочно-ячеистой структурой удерживать радиоактивные и токсичные аэрозоли по сорбционно-фильтрационному механизму с динамической емкостью ~ 0.30 г/г КЭ.

В предлагаемых на сегодняшний день локальных системах газоочистки [2, 11] не предусматривается применение процесса хемосорбции – наиболее надежного способа фиксации соединений ЛПД, особенно это касается изотопов цезия, содержание которого в ОЯТ является наибольшим из всех продуктов деления. Поэтому считаем актуальным и целесообразным после масштабирования и оптимизации характеристик КЭ нового поколения на основе керамических ВПЯМ, представленных в настоящей работе и в работе [1], в сторону увеличения сорбционной емкости рекомендовать их для применения в составе опытно-промышленных ЛСГО высокотемпературных переделов переработки ОЯТ РБН как в окислительной среде, так и в среде азота, в условиях эксплуатации модулей переработки Опытного-демонстрационного энергокомплекса, разрабатываемого в рамках проектного направления (ПН) “Прорыв”.

Разработанные алюмосиликатные КЭ с нанесенным АС аналогичного состава также могут применяться для локализации соединений радионуклидов цезия в отходящих газах высокотемпературных операций переработки ОЯТ различного типа в условиях радиохимических производств ведущих предприятий Госкорпо-

рации “Росатом”, процессов иммобилизации жидких высокоактивных отходов и производства цезиевых источников ионизирующего излучения.

Работа выполнена при поддержке ПН “Прорыв”.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

<i>A</i>	динамическая сорбционная емкость, г/г КЭ (г/г АС)
<i>C</i>	концентрация CsI в газовом потоке, г/л
<i>E</i>	суммарная эффективность улавливания CsI всеми образцами сборки, %
<i>W</i>	объемный расход газа-носителя, л/ч
<i>d</i>	диаметр образца КЭ
<i>h</i>	высота образца КЭ
<i>m</i>	масса испарившегося CsI, г
<i>ppi</i>	количество пор на линейный дюйм
<i>ppmv</i>	единица измерения концентрации в миллионных объемных долях
<i>t</i>	температура эксперимента, °С
<i>τ</i>	время проведения эксперимента, ч
<i>η</i>	степень использования активного слоя, %

ИНДЕКСЫ

exp	эксперимент
G	газ-носитель
CsI	иодид цезия
Cs	цезий
I_2	иод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Мочалов Ю.С., Суханов Л.П., Титов А.В., Тищенко С.В., Обухов Е.О.* Локализация паров иодида цезия на керамических блочно-ячеистых контактных элементах в окислительной среде // Теорет. основы хим. технологии. 2023. Т. 57. № 6. С. 1.
2. *Шадрин А.Ю., Двоеглазов К.Н., Масленников А.Г., Кащеев В.А., Третьякова С.Г., Шмидт О.В., Виданов В.Л., Устинов О.А., Волк В.И., Веселов С.Н., Ишунин В.С.* РН-процесс – технология переработки смешанного уран-плутониевого топлива реактора БРЕСТ-ОД-300 // Радиохимия. 2016. Т. 58. № 3. С. 234.
3. *Мазанников М.В., Потапов А.М., Вилков А.И., Дедюхин А.Е., Суздальцев А.В., Зайков Ю.П.* Способ высокотемпературной обработки отработавшего нитридного ядерного топлива. Пат. 2775564 РФ. 2022.

4. *Гаспарян М.Д., Осипенко А.Г.* Комплексная очистка газообразных сред от летучих продуктов деления в процессе переработки облученного ядерного топлива // Экология промышленного производства. 2015. № 2. С. 40.
5. *Гаспарян М.Д., Магомедбеков Э.П., Обручиков А.В., Меркушкин А.О., Грунский В.Н., Беспалов А.В., Попова Н.А., Ваграмян Т.А., Григорян Н.С., Осипенко А.Г.* Улавливание метилйодида на керамических высокопористых блочно-ячеистых сорбентах в инертной среде // Химическая промышленность сегодня. 2015. № 4. С. 34.
6. *Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Беспалов А.В., Давидханова М.Г., Попова Н.А., Харитонов Н.И.* Структурно-механические характеристики полифункциональных высокопористых блочно-ячеистых материалов на основе оксидной керамики // Химическая промышленность сегодня. 2016. № 6. С. 9.
7. *Фельдман Л.Г., Плескова М.А.* К вопросу о химизме поллуцита // Труды минералогического музея. 1977. № 26. С. 146.
8. *Yang J.H., Yoon J.Y., Hong S.-M., Lee J.H., Cho Yu.-Z.* An efficient capture of cesium from cesium iodide (CsI) off-gas by aluminosilicate sorbents in the presence of oxygen // J. Indust. Eng. Chem. 2019. V. 77. P. 146.
9. *Кулемин В.В., Михеев Н.Б., Лавриков В.А., Румер И.А., Мелихов И.В., Кулюхин С.А.* Извлечение летучих соединений ^{137}Cs и ^{131}I из воздушного потока // Радиохимия. 2014. Т. 56. № 1. С. 41.
10. *Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Давидханова М.Г., Григоренко Р.И., Титов А.В.* Керамические высокопористые блочно-ячеистые фильтры для очистки газовых сред от аэрозолей // Химические волокна. 2021. № 6. С. 21.
11. *Устинов О.А., Двоеглазов К.Н., Тучкова А.И., Шадрин А.Ю.* Локальная система газоочистки при окислении отработавшего нитридного топлива // Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 4. С. 2.