

Research of the Process of Plasma Chemical Synthesis of Oxide Compositions for Uranium Dispersion Nuclear Fuel

D. M. Belyakov, A. G. Karengin

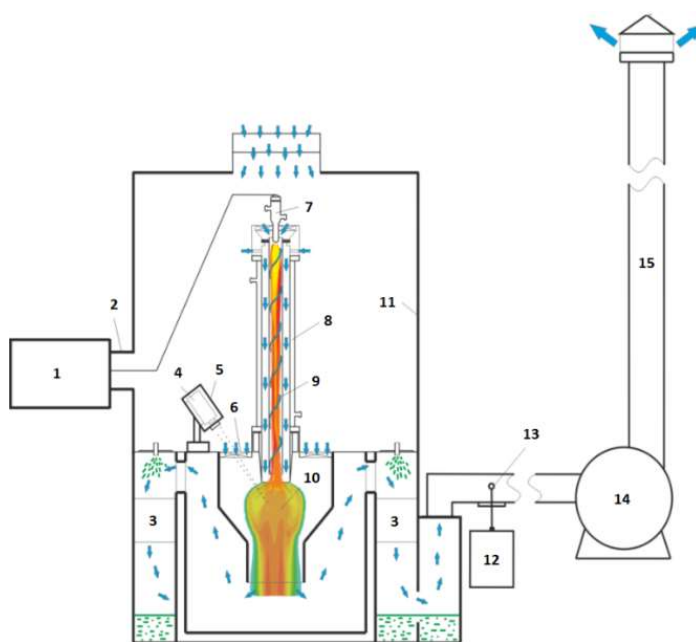
*Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, 634050, Russia
dmb8@tpu.ru*

Abstract

The paper considers the problem of obtaining oxide compositions for dispersed nuclear fuel, associated with the disadvantages of traditional synthesis methods, characterized by high energy consumption, multi-stage and limited reproducibility of the phase composition. As an alternative approach, the plasmochemical processing of water-organic nitrate solutions in an air-plasma stream is investigated. The aim of the study was to establish patterns of influence of the composition of water-organic nitrate solutions and their treatment modes on the physico-chemical properties of the formed oxide compositions. To solve this problem, thermodynamic modeling of the "UO₂-MgO" system was performed using the TERRA software package, and experimental studies were conducted on a laboratory plasma installation with a high-frequency plasma torch. The obtained materials were studied by laser diffraction, X-ray phase analysis, and specific surface area determination. It has been established that the formation of the target composition "UO₂-MgO" is realized in a limited range of parameters of the gaseous medium, and changes in the composition of solutions and cooling modes have a significant effect on particle sizes, specific surface area and crystal structure of the materials obtained. The patterns of formation of nanostructured oxide compositions based on neodymium and magnesium oxides modeling dispersed uranium fuel have been revealed.

Keywords: plasma, reactor, plasmatron, water-organic nitrate solution, fuel oxide composition.

Experimental studies have been carried out on a laboratory plasma installation with a high-frequency plasma torch for the plasma chemical processing of water-organic nitrate solutions. The obtained materials were studied by laser diffraction, X-ray phase analysis, and specific surface area determination. It has been established that the formation of the target composition is realized in a limited range of parameters of the gas medium, and changes in the composition of solutions and cooling modes have a significant effect on particle sizes, specific surface area and crystal structure of the materials obtained. Based on the totality of experimental data, it is concluded that the synthesized oxide compositions belong to the class of nanostructured materials.



УДК 533.9

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива

Д. М. Беляков, А. Г. Каренгин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск, 634050, ул. Ленина, 30*

dmb8@tpu.ru

Аннотация

В работе рассмотрена проблема получения оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива, связанная с недостатками традиционных методов синтеза, характеризующихся высокой энергоёмкостью, многостадийностью и ограниченной воспроизводимостью фазового состава. В качестве альтернативного подхода исследована плазмохимическая переработка водно-органических нитратных растворов в воздушно-плазменном потоке. Целью исследования являлось установление закономерностей влияния состава водно-органических нитратных растворов и режимов их обработки на физико-химические свойства формируемых оксидных композиций. Для решения поставленной задачи выполнено термодинамическое моделирование системы «UO₂–MgO» с использованием программного комплекса TERRA, а также проведены экспериментальные исследования на лабораторной плазменной установке с высокочастотным плазмотроном. Полученные материалы исследованы методами лазерной дифракции, рентгенофазового анализа и определения удельной поверхности. Установлено, что формирование целевой композиции «UO₂–MgO» реализуется в ограниченном диапазоне параметров газовой среды, а изменение состава растворов и режимов охлаждения оказывает существенное влияние на размеры частиц, удельную поверхность и кристаллическую структуру получаемых материалов. Выявлены закономерности формирования наноструктурированных оксидных композиций на основе оксидов неодима и магния, моделирующих дисперсионное урановое топливо.

Ключевые слова: плазма, реактор, плазмотрон, водно-органический нитратный раствор, топливная оксидная композиция.

1. Введение

Современные требования к безопасности атомной энергетики обуславливают необходимость повышения устойчивости ядерного топлива к аварийным воздействиям. При нарушении теплоотвода от тепловыделяющих элементов происходит интенсивный рост температуры, что инициирует нежелательные химические взаимодействия, включая пароциркониевые реакции, и может приводить к деградации конструкционных материалов [1, 2]. В этой связи особое внимание уделяется разработке топлива с повышенной устойчивостью к таким режимам, известного как Accident Tolerant Fuel (ATF). Таким образом, повышение надёжности топливных систем напрямую связано с поиском новых материалов и структур топлива.

Одним из подходов к решению данной задачи является применение дисперсионных топливных композиций. В таких системах активный компонент в виде диоксида урана распределяется внутри матричной фазы, обладающей более высокой теплопроводностью. В качестве перспективного материала матрицы рассматривается оксид магния, сочетающий хорошие теплофизические характеристики с низким поглощением тепловых нейтронов. Использование подобных матриц позволяет компенсировать недостатки традиционного оксидного топлива.

[3]. Выбор оксидных материалов в качестве матричной основы обусловлен также тем, что традиционные виды ядерного топлива уже реализованы в оксидной форме (например, UO_2 и PuO_2), что упрощает интеграцию новых композиций в существующие технологические цепочки. Это позволяет рассматривать оксидные матрицы как наиболее совместимые с действующими топливными технологиями.

Существующие методы получения оксидных композиций, включая механическое смешение отдельных компонентов и золь-гель технологии, характеризуются значительной продолжительностью, многостадийностью и ограниченной воспроизводимостью фазового состава. Кроме того, они требуют существенных энергетических и материальных затрат [4]. Применение плазмохимических методов для получения таких композиций открывает дополнительные возможности управления процессом синтеза. В отличие от традиционных технологий, данный подход обеспечивает сокращение числа стадий, повышение скорости обработки и более равномерное распределение компонентов в структуре материала [5]. Вместе с тем переработка исключительно водных растворов сопровождается повышенными энергетическими затратами и ограничениями по формированию фазового состава.

Переход к водно-органическим системам, содержащим органические добавки, позволяет существенно изменить энергетический баланс процесса. В частности, растворы с адиабатической температурой горения порядка 1500 К обеспечивают более эффективное протекание плазмохимических реакций и формирование требуемых оксидных фаз [3, 6-11]. Следовательно, состав исходной системы становится ключевым параметром управления процессом синтеза.

В рамках проведённого исследования основное внимание сосредоточено на анализе взаимосвязи между составом водно-органических нитратных систем и условиями их обработки в воздушно-плазменной среде, а также на оценке влияния указанных факторов на формирование свойств оксидных материалов.

2. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР

Низшую теплотворную способность водно-органического нитратного раствора (ВОНР) определяли по уравнению [11]

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = \frac{(100 - W - A)Q_{\text{н}}^{\text{с}}}{100} - \frac{2.5W}{100},$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ – низшая теплотворная способность органического компонента в составе ВОНР, кДж/кг; W и A – массовая доля воды и негорючих компонентов в составе ВОНР соответственно, %; 2.5 – значение скрытой теплоты испарения воды при 273 К, кДж/кг.

Одним из ключевых показателей, характеризующих энергетическое состояние ВОНР, является адиабатическая температура горения ($T_{\text{ад}}$). Данный параметр отражает способность системы поддерживать тепловой режим без внешнего подвода энергии и может быть определён расчётным путём.

Использование $T_{\text{ад}}$ в качестве критерия позволяет сопоставлять различные составы растворов с точки зрения их энергетической эффективности, его можно оценить по формуле [11]

$$T_{\text{ад}} = \frac{(100 - v_{\text{ок}})Q_{\text{н}}^{\text{p}} + v_{\text{ок}}C_{\text{ок}}t_{\text{ок}}}{100C_{\text{уд}}},$$

где $v_{\text{ок}}$ – массовая доля окислителя, %; $C_{\text{ок}}$ – теплоемкость окислителя, кДж/(кг·К); $t_{\text{ок}}$ – температура окислителя, К; $C_{\text{уд}}$ – удельная равновесная теплоемкость продуктов плазменной переработки водно-солеорганического раствора, кДж/(кг·К).

Проведённые математические и программные (с использованием лицензионной программы «TERRA») расчёты показали, что при значениях $T_{\text{ад}}$, близких к 1500 К, создаются

наиболее «благоприятные» условия для протекания процессов испарения, разложения и последующего формирования целевых оксидных фаз, а именно, обеспечивается энергоэффективная переработка и получение оксидных композиций с необходимыми физико-химическими свойствами [2, 11]. Это указывает на целесообразность использования данного параметра в качестве основного критерия при подборе состава исходных растворов. На основании полученных результатов были определены составы ВОНР на основе ацетона, обеспечивающие получение требуемых оксидных композиций (ОК) с содержанием матрицы (MgO) от 5 до 15 %:

- ВОНР-1 «31.2 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 8.7 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 26.1 % H_2O – 34.0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ » для получения ОК-1 «95.0 UO_2 – 5.0 % MgO »;
- ВОНР-2 «23.6 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 14.0 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 28.4 % H_2O – 34.0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ » для получения ОК-2 «90.0 UO_2 – 10.0 % MgO »;
- ВОНР-3 «25.6 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 15.5 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 29.9 % H_2O – 29.0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ » для получения ОК-3 «85.0 UO_2 – 15.0 % MgO ».

Для уточнения влияния температурных и газодинамических условий на процесс синтеза был выполнен термодинамический анализ системы « UO_2 – MgO » с применением программного комплекса «TERRA», который предназначен для расчёта химических и фазовых равновесий произвольных многокомпонентных смесей, а также их термодинамических и транспортных свойств при заданных температуре, давлении и исходном элементном составе. Расчёты проводились при атмосферном давлении в диапазоне температур 300 ÷ 4000 К при варьировании доли воздушного теплоносителя. Полученные данные позволили установить зависимость фазового состава продуктов от совокупности внешних параметров, прежде всего температуры и состава газовой среды.

На рис. 1–3 показано влияние температуры на состав продуктов плазмохимического синтеза ОК в конденсированных фазах из растворов ВОНР-1-3.

Анализ расчётных зависимостей ВОНР-1-3 показывает, что формирование целевой оксидной композиции « UO_2 – MgO » реализуется лишь в ограниченном диапазоне параметров. В частности, при массовой доле воздуха около 67 ÷ 68 % достигается требуемое соотношение фаз, необходимое для полного окисления всех компонентов до оксидов (UO_2 , MgO). При этом даже незначительное отклонение параметров приводит к изменению фазового состава: уменьшение доли воздуха, вследствие неполного окисления раствора, приводит к появлению углеродсодержащих продуктов (сажи), а увеличение доли воздуха, вследствие переокисления раствора, приводит к образованию закиси-окиси урана $\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$ вместо $\text{UO}_2(\text{c})$. Это подчёркивает высокую чувствительность процесса к условиям его протекания, а состав газовой среды оказывает определяющее влияние на фазовый результат синтеза.

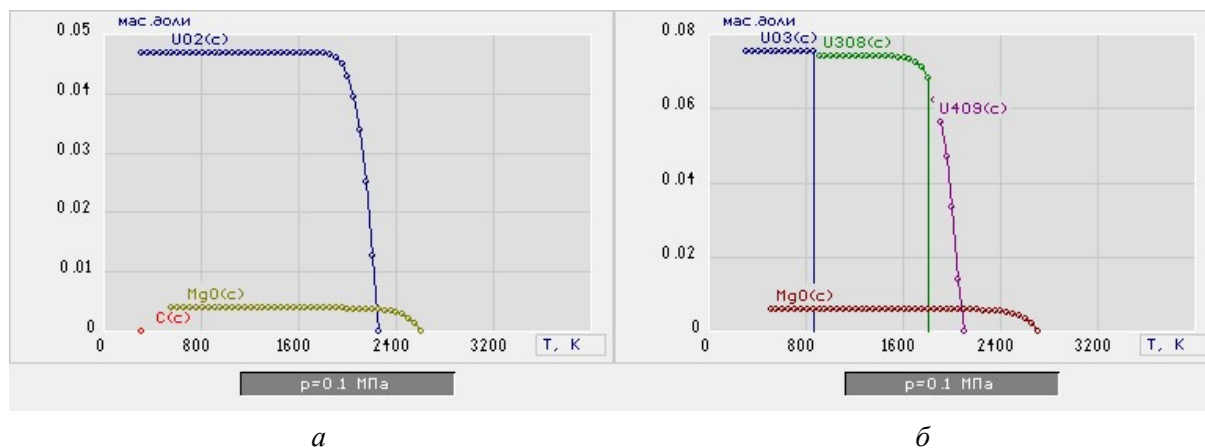


Рис. 1. Графики получаемых составов продуктов плазмохимического синтеза ОК-1 из ВОНР-1 от температуры при массовой доле воздуха 68 % (а) и 70 % (б)

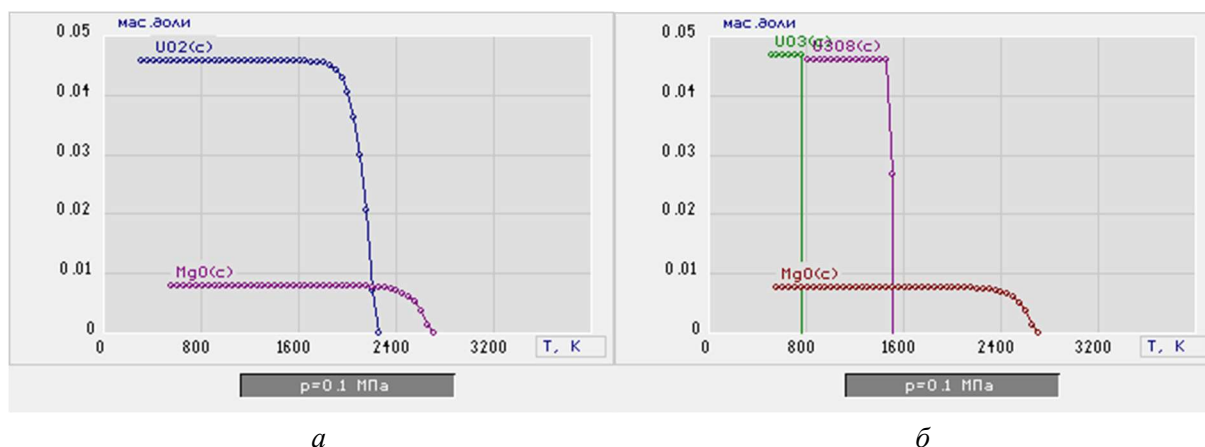


Рис. 2. Графики получаемых составов продуктов плазмохимического синтеза ОК-2 из ВОНР-2 от температуры при массовой доле воздуха 67 % (а) и 69 % (б)

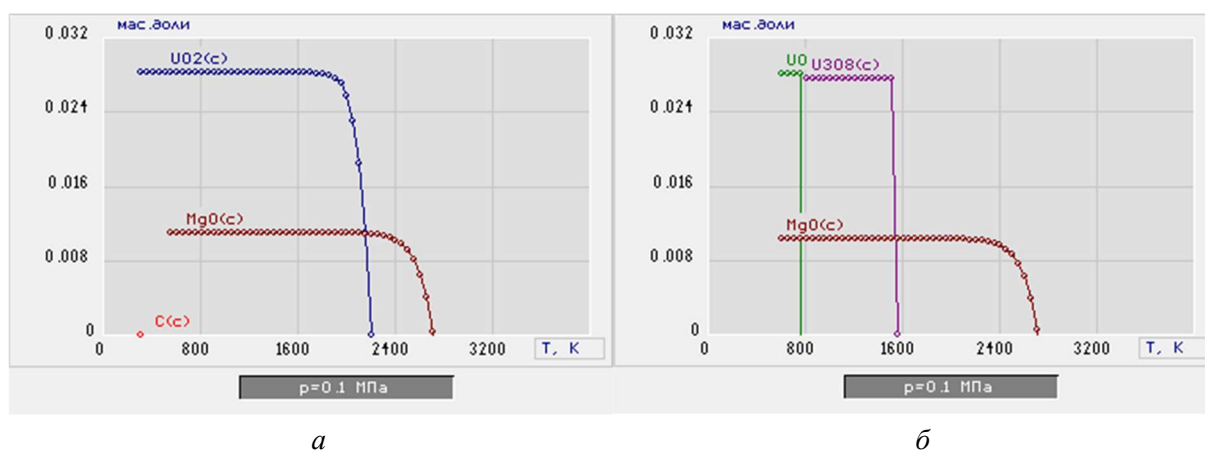


Рис. 3. Графики получаемых составов продуктов плазмохимического синтеза ОК-3 из ВОНР-3 от температуры при массовой доле воздуха 67 % (а) и 69 % (б)

3. Методика проведения экспериментов

Экспериментальная проверка полученных закономерностей проводилась на лабораторной установке с использованием высокочастотного плазмотрона (рис. 4). В качестве модельных систем применялись растворы на основе ацетона и нитратов металлов Nd и Mg, что позволило имитировать процессы, характерные для урансодержащих систем. В ходе работы были определены режимы функционирования оборудования, обеспечивающие стабильное протекание процесса синтеза.

Формирование исходных растворов осуществлялось путём последовательного приготовления водной и органической составляющих с последующим их объединением. Полученная смесь подвергалась диспергированию и вводилась в реакционную зону, где под действием плазменного потока происходили испарение, термическое разложение и образование твёрдой фазы. Комплексное протекание этих процессов определяет конечные характеристики получаемых материалов.

Образующиеся продукты подвергались быстрому охлаждению, что позволяло зафиксировать их структуру, после чего проводился их сбор и последующая обработка. Применение методов анализа, включая лазерную дифракцию и рентгенофазовый анализ, обеспечило получение информации о размере частиц, фазовом составе и кристаллической структуре материалов.

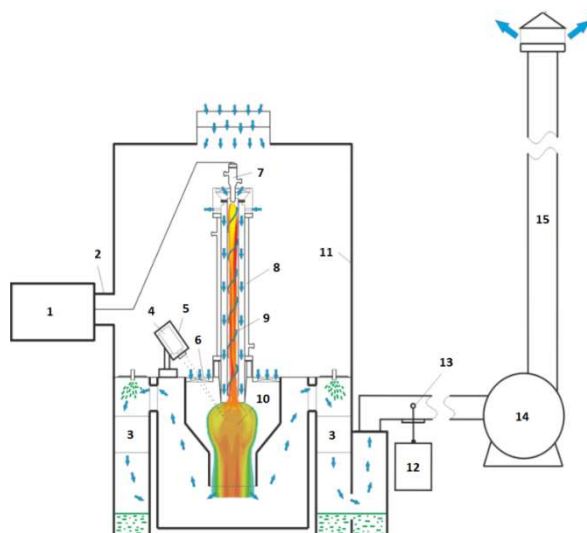


Рис. 4. Схема лабораторной установки: 1 – ВЧ генератор; 2 – коаксиальный вывод; 3 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 4 – пирометр IPE 140/45; 5 – защитный кожух пирометра; 6 – плазмохимический реактор с импеллером; 7 – медный электрод; 8 – ВЧФ-плазмотрон; 9 – ВЧФ-разряд; 10 – диспергатор; 11 – корпус; 12 – газоанализатор; 13 – пробоотборник; 14 – вытяжной вентилятор; 15 – воздуховод

4. Анализ полученных оксидных композиций

Экспериментальная часть работы включала исследование морфологических и структурных характеристик полученных материалов с использованием аналитического оборудования Центра коллективного пользования «Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Применение современного оборудования позволило получить комплексную информацию о свойствах сформированных материалов. Это обеспечило достоверность и сопоставимость экспериментальных данных. [11].

Оценка гранулометрических характеристик водных суспензий синтезированных оксидных композиций осуществлялась с применением метода лазерной дифракции на приборе SALD-7101. В качестве репрезентативного параметра использовалось медианное значение распределения частиц (D_{50}), широко применяемое при анализе дисперсных систем. Данный подход позволяет учитывать вклад всех фракций распределения и корректно характеризовать систему в целом. Важной особенностью метода является его применимость к частицам с различной внутренней структурой, включая агломерированные образования. В связи с этим параметр D_{50} использовался не только как характеристика размера, но и как косвенный индикатор степени агрегации частиц.

Определение удельной поверхности ($S_{уд}$) проводилось методом Брунауэра–Эммета–Теллера с использованием прибора Сорби-М. Полученные значения пересчитывались в эквивалентный диаметр частиц при допущении их сферической формы, что позволило сопоставить результаты с данными гранулометрического анализа. Такое сопоставление обеспечивает более полное представление о структуре порошков и взаимосвязи их характеристик.

Фазовый состав и кристаллическая структура исследовались методом рентгенофазового анализа с применением дифрактометра XRD-7000. В процессе обработки экспериментальных данных выполнялось определение фазового состава образцов, параметров их кристаллической структуры, а также размеров областей когерентного рассеяния ($D_{крист}$). Это позволило получить представление о степени упорядоченности и особенностях формирования кристаллитов

в исследуемых материалах. Совокупность указанных характеристик даёт возможность комплексно оценить структурное состояние синтезированных композиций.

Информация о составах исходных растворов и соответствующих им физико-химических параметрах полученных оксидных систем приведена в таблице 1. В рамках экспериментальной программы варьировались частота вращения диспергирующего устройства (f_d) и расход оборотной воды на стадии охлаждения ($Q_{ов}$). Изменение данных параметров позволило выявить вклад гидродинамических и теплообменных условий в формирование свойств конечного продукта.

Сравнительный анализ данных, представленных в таблице 1, показал, что изменение технологических параметров оказывает существенное влияние на характеристики формируемых оксидных композиций. При фиксированных условиях ($f_d = 50$ Гц, $Q_{ов} = 2.3$ кг/с) увеличение концентрации нитрата неодима сопровождается ростом размеров частиц и кристаллитов при одновременном снижении удельной поверхности. Подобная тенденция может быть связана с усилением процессов конгломерации и роста частиц при повышенной концентрации вещества.

Таблица 1

Состав ВОНР и характеристики полученных оксидных композиций, имитирующих урановое дисперсионное ядерное топливо

№	ВОНР			Оксидная композиция				
	Водный нитратный раствор, г/л		Ацетон, %	Состав, %		Характеристики		
	$Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	C_3H_6O	Nd_2O_3	MgO	D_{50} , мкм	$S_{уд}$, м ² /г	$D_{крст}$, нм
$Q_{ов} = 2.3$ кг/с								
1	300	–	65	100	–	9	7	109
2	500	–	62	100	–	10	6,5	115
3	1000	–	55	100	–	10.2	6.1	118
$Q_{ов} = 2.8$ кг/с								
4	300	–	65	100	–	8	9	94
5	500	–	62	100	–	8.3	8.1	99
6	1000	–	55	100	–	9	7.9	107
7	–	300	65	–	100	9.7	9.2	95
8	–	500	62	–	100	11	9	97
9	–	700	55	–	100	12.9	8	101
10	309	80	63	95	5	13	8	96
11	293	160	62	90	10	9.7	9	90
12	277	240	61	85	15	7.2	11	77
13	261	320	60	80	20	7	14	65
14	228	481	58	70	30	5	15.9	59

При переходе к режимам ВОНР–4–6, характеризующимся увеличенным расходом охлаждающей среды, наблюдается изменение дисперсных характеристик системы. Рост размеров частиц и кристаллитов сочетается с изменением условий тепломассообмена, что влияет на кинетику формирования твёрдой фазы. Одновременно наблюдается снижение удельной поверх-

ности материалов с 9 до 7.9 м²/г. Подобное сочетание изменений может быть связано с усилением процессов укрупнения частиц при более интенсивном тепломассообмене в условиях увеличенного расхода охлаждающей среды.

Сходный характер поведения системы выявлен и при варьировании содержания нитрата магния (режимы ВОНР–7–9). Повышение его концентрации с 300 до 700 г/л сопровождается увеличением размеров частиц оксида магния (с 9.7 до 12.9 мкм) и ростом размеров кристаллитов (с 95 до 101 нм), тогда как удельная поверхность уменьшается с 9.2 до 8 м²/г. Это позволяет предположить, что увеличение доли матричного компонента способствует развитию процессов агломерации и роста твёрдой фазы.

В противоположность рассмотренным случаям, для режимов ВОНР–10–14 наблюдается иная тенденция изменения характеристик. В этих условиях происходит уменьшение среднего размера частиц оксидных композиций с 13 до 5 мкм, что сопровождается значительным увеличением удельной поверхности (с 8 до 15.9 м²/г) и уменьшением размеров кристаллитов (с 96 до 59 нм). Полученные результаты свидетельствуют о возможности перехода к более дисперсному состоянию материала при соответствующем подборе параметров процесса, что открывает перспективы формирования наноструктурных систем с заданными свойствами.

5. Заключение

В целом полученные результаты согласуются между собой и не противоречат физическим представлениям о протекающих процессах. На основании совокупности экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что синтезированные оксидные композиции относятся к классу наноструктурных материалов. Это подтверждает перспективность рассматриваемого метода для получения материалов с заданными свойствами.

Практическая значимость полученных результатов связана с возможностью их использования при разработке технологических решений в области плазмохимического синтеза оксидных материалов. Установленные зависимости могут быть положены в основу создания дисперсионных топливных композиций нового поколения, отличающихся улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Литература

1. Самойлов А. Г., Каштанов А. И., Волков В. С. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. М.: Атомиздат. 1965. 343 с.
2. Скоров Д. М., Бычков Ю. Ф., Дашковский А. М. Реакторное материаловедение. М.: Атомиздат. 1979. 344 с.
3. Каренгин А. Г., Каренгин А. А., Новоселов И. Ю., Мендоса О., Алюков Е. С., Бабаев Р. Г. Плазмохимический синтез и оценка теплопроводности сложных оксидных композиций для перспективных типов ядерного топлива // Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 12-2. С. 36–44.
4. Алексеев С. В., Зайцев В. А., Толстоухов С. С. Дисперсионное ядерное топливо. М.: Техносфера. 2015. 248 с.
5. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. М.: Физматлит. 2003. 759 с.
6. Degueldre C., Paratte J. M., Concepts for an inert matrix fuel: An overview // Journal of Nuclear Materials. 1999. Vol. 274. Pp. 1–6.
7. Kushtym A. V., Belash M. M., Zigunov V. V., Slabospitska O. O., Zuyok V. A., Dispersion fuel for nuclear research facilities // Problems of Atomic Science and Technology. 2017. Vol. 108. No. 2. Pp. 124–130.
8. Shelke A. V., Gera, B., Maheshwari N. K., Singh R. K., Theoretical studies on fuel dispersion and fire-ball formation associated with aircraft crash // Combustion Science and Technology. 2018. Vol. 19. No. 12. Pp. 2134–2163.

9. Song T., Wang Y., Chang Z., Guo L., In-situ fabrication of dispersion nuclear fuel pellets with a core-shell structure // *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 134. Pp. 258–262.
10. Myshkin V. F., Khan V. A., Tichy M., et all. // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2101. Pp. 1–7.
11. Karengin A. G., Karengin A. A., Novoselov I. Yu. and Tikhonov A. E. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1989. Pp. 1–5.

References

1. Samoilov A. G., Kashtanov A. I., Volkov V. S., *Dispersion fuel elements of nuclear reactors*, Moscow: Atomizdat, 1965, 343 p. [in Russian].
2. Skorov D. M., Bychkov Yu. F., Dashkovsky A. M., *Reactor Materials Science*, Moscow: Atomizdat, 1979, 344 p. [in Russian].
3. Karengin A. G., Karengin A. A., Novoselov I. Yu., Mendoza O., Alyukov E. S., Babaev R. G., Plasma chemical synthesis and thermal conductivity assessment of complex oxide compositions for promising types of nuclear fuel, *Izvestiya vuzov. Physics*, 2018, vol. 61, no. 12-2, pp. 36–44 [in Russian].
4. Alekseev S. V., Zaitsev V. A., Tolstoukhov S. S., *Dispersion nuclear fuel*, Moscow: Technosfera, 2015, 248 p. [in Russian].
5. Tumanov Yu. N., *Plasma and high-frequency processes for the production and processing of materials in the nuclear fuel cycle: present and future*. Moscow: Fizmatlit, 2003, 759 p. [in Russian].
6. Degueldre C., Paratte J. M., Concepts for an inert matrix fuel: An overview, *Journal of Nuclear Materials*, 1999, vol. 274, pp. 1–6.
7. Kushtym A. V., Belash M. M., Zigunov V. V., Slabospitska O. O., Zuyok V. A., Dispersion fuel for nuclear research facilities, *Problems of Atomic Science and Technology*, 2017, vol. 108, no. 2, pp. 124–130.
8. Shelke A. V., Gera, B., Maheshwari N. K., Singh R. K., Theoretical studies on fuel dispersion and fireball formation associated with aircraft crash, *Combustion Science and Technology*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 2134–2163.
9. Song T., Wang Y., Chang Z., Guo L., In-situ fabrication of dispersion nuclear fuel pellets with a core-shell structure, *Annals of Nuclear Energy*, 2019, vol. 134, pp. 258–262.
10. Myshkin V. F., Khan V. A., Tichy M., et all., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2101, pp. 1–7.
11. Karengin A. G., Karengin A. A., Novoselov I. Yu. and Tikhonov A. E., Investigation of plasmachemical synthesis of oxide compositions for plutonium-thorium dispersion nuclear fuel, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1989, pp. 1–5.

Статья поступила в редакцию 3 июня 2026 г.