

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-СОЛЕОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

И.Ю. Новоселов, А.Г. Каренгин, И.В. Шаманин, Е.С. Алюков

В статье рассмотрена возможность применения низкотемпературной плазмы для плазмохимического синтеза оксидов иттрия и циркония из водно-солеорганических композиций «нитрат иттрия-вода-ацетон» и «нитрат цирконила-вода-ацетон», обладающих высокой взаимной растворимостью. Проведен расчет составов композиций и определены режимы, обеспечивающие плазмохимический синтез оксидов иттрия и циркония в воздушной плазме. Расчёты проведены при атмосферном давлении, в широком диапазоне температур (300-4000 К), с использованием воздушного плазменного теплоносителя. В ходе экспериментальных исследований на лабораторном плазменном стенде осуществлен плазмохимический синтез порошков оксидов иттрия и циркония из диспергированных водно-солеорганических композиций в воздушно-плазменном потоке. Результаты проведенных анализов полученных порошков (сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, БЭТ-анализ) указывают на получение нанодисперсных порошков оксида иттрия и циркония.

Ключевые слова: плазма, синтез, нанопорошок, оксид иттрия, оксид циркония, плазмотрон, анализ, термодинамическое моделирование, плазменный стенд, раствор.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения являются наноматериалы и нанотехнологии [1]. Интерес к новому классу материалов обусловлен следующими причинами [1-5]:

- стремлением к миниатюризации изделий;
- уникальными свойствами материалов в наноструктурном состоянии;
- необходимостью разработки и внедрения новых материалов с качественно и количественно новыми свойствами;
- развитием новых технологических приемов и методов, базирующихся на принципах самосборки и самоорганизации;
- практическим внедрением современных приборов исследования и контроля наноматериалов (зондовая микроскопия, рентгеновские методы);
- развитием и внедрением новых технологий (ионно-плазменные технологии обработки поверхности и создания тонких слоев и пленок, LIGA-технологии, представляющие собой последовательность процессов литографии, гальваники и формовки, технологий получения и формования нанопорошков и т.п.).

При этом нанодисперсные порошки оксидов иттрия и циркония занимают в современном материаловедении особое место. Оксид иттрия (Y_2O_3) имеет широкий спектр применения [6]. В частности, высокотемпературная керамика из оксида иттрия используется в агрессивных средах (поршни двигателей, детали турбин) благодаря своей химической стойкости. Прозрачная керамика из оксида иттрия обладает высоким светопропусканием в видимой и ИК-области спектра, высокой температурой плавления, высокой термостойкостью, имеет высокие механические и электрофизические свойства. Поликристаллические материалы на основе прозрачного оксида иттрия по интенсивности и количеству поглощения энергии приближаются к монокристаллам.

Диоксид циркония (ZrO_2) – высокотехнологичный материал, использующийся для получения высокоогнеупорных изделий, жаростойких эмалей, тугоплавких стекол, различных видов керамики, пигментов, твердых электролитов, катализаторов, в создании теплозащитных экранов космических аппаратов, в эндопротезировании и стоматологии, в ювелирном деле [7-11], для изготовления режущих инструментов, абразивных материалов и др. В последние годы диоксид циркония начал широко применяться в волоконной оптике и производстве керамики для электроники.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-СОЛЕОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Выбор способа получения нанодисперсного порошка определяется его назначением, производительностью способа, сложностью и стоимостью используемого оборудования. К недостаткам применяемых способов получения нанодисперсных порошков (лазерный, гидротермальный, золь-гель, осаждение из растворов и др.) следует отнести: многостадийность, продолжительность, низкую производительность, необходимость использования химических реагентов, неоднородное распределение фаз, высокую себестоимость.

Для получения нанодисперсных порошков перспективным является применение низкотемпературной плазмы [12-14]. К преимуществам плазмохимического синтеза нанодисперсных порошков из водно-солевых растворов следует отнести [15]: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования, низкую себестоимость. Однако плазменная обработка только водно-солевых растворов требует значительных затрат электрической энергии (до 4 кВт·ч/кг). Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при плазменной обработке водно-солевых растворов в виде оптимальных по составу водно-солеорганических композиций (ВСОК) [16,17].

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДНО-СОЛЕОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Низшая теплотворная способность водно-солеорганических [18]

$$Q_H^p = \frac{(100 - W - A) \cdot Q_H^c}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (1)$$

где Q_H^c – низшая теплотворная способность горючего компонента водно-солеорганической композиции, МДж/кг; W и A – содержание воды и негорючих компонентов, %; 2,5 – значение скрытой теплоты испарения воды при 0 °С, МДж/кг.

Композиции относятся к горючим при значениях низшей теплотворной способности более 8,4 МДж/кг [18].

В таблицах 1 и 2 показано влияние состава на низшую теплотворную способность водно-солеорганических композиций «нитрат иттрия-вода-ацетон» и «нитрат цирконила-вода-ацетон».

Таблица 1– Влияние состава на низшую теплотворную способность водно-солеорганических композиций «нитрат иттрия-вода-ацетон»

C_3H_6O , %	H_2O , %	$Y(NO_3)_3$, %	Q_H^p , МДж/кг
10	45,8	44,2	1,5
30	35,6	34,4	7,1
35	33,0	32,0	8,4
50	25,4	24,6	12,7
70	15,2	14,8	18,4
90	5,1	4,9	24,0

Таблица 2– Определение оптимального состава ВСОК-2

C_3H_6O , %	H_2O , %	$ZrO(NO_3)_2$, %	Q_H^p , МДж/кг
10	57,4	32,6	1,2
30	44,7	25,3	6,9
36	40,8	23,2	8,4
50	31,9	18,1	12,6
70	19,1	10,9	18,3
90	6,4	3,6	24,0

С учетом полученных результатов определены следующие составы ВСОК, имеющие $Q_H^p = 8,4$ МДж/кг:

- для водно-солеорганической композиции «нитрат иттрия-вода-ацетон» (ВСОК-1): 35 % C_3H_6O : 33,0 % H_2O : 32,0 % $Y(NO_3)_3$;
- для водно-солеорганической композиции «нитрат цирконила-вода-ацетон» (ВСОК-2): 36 % C_3H_6O : 40,8 % H_2O : 32,0 % $ZrO(NO_3)_2$.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ

Для определения оптимальных режимов исследуемого процесса проведены расчёты равновесных составов газообразных и конденсированных продуктов плазменной обработки композиций ВСОК-1 и ВСОК-2 в воздушной плазме. Для расчётов использовалась лицензионная программа «TERRA». Расчёты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), для широкого интервала температур: (300–4000) К и массовых долей воздушного плазменного теплоносителя (0,1–0,95).

Для выбора оптимального режима процесса необходимо учитывать несколько факторов. Первый – адиабатическая температура плазменной обработки ВСОК должна быть не

менее 1200 °С, что необходимо для полного дожигания горючей компоненты ВСОК до CO₂ и H₂O. Второй – минимальная доля воздушного теплоносителя, обеспечивающая максимальный выход целевого продукта без образования углерода (сажи) в продуктах плазменной обработки.

Для расчета адиабатической температуры плазменной обработки ВСОК использовалась формула:

$$T_{ад} = \frac{Q_H^p + C_{отх} \cdot t_{отх} + \alpha \cdot U_{ок}^0 \cdot C_{ок} \cdot t_{ок}}{V \cdot C}, \quad (2)$$

где Q_H^p – низшая теплотворная способность ВСОК, кДж/кг; $C_{отх}$ – средняя массовая теплоемкость ВСОК, кДж/(кг·град); $t_{отх}$ – температура ВСОК, °С; α – коэффициент расхода окислителя (воздуха); $U_{ок}^0$ – теоретический расход окислителя, м³/м³; $C_{ок}$ – средняя теплоемкость окислителя (воздуха), (кДж/м³·град); $t_{ок}$ – температура окислителя, °С; V – удельный объем газообразных и конденсированных продуктов, м³/кг; C – удельная равновесная теплоемкость газообразных и конденсированных продуктов, (кДж/м³·град).

В таблице 3 показано влияние массовой доли воздуха на адиабатическую температуру плазменной обработки композиции ВСОК-1.

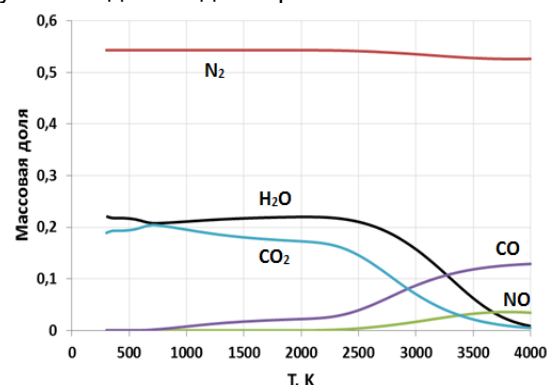
Таблица 3 – Влияние массовой доли воздуха на адиабатическую температуру плазменной обработки ВСОК-1

Воздух, %	H ₂ O, %	Y(NO ₃) ₃ , %	C ₃ H ₆ O, %	T _{ад} , °С
50	16,5	16,0	17,5	892
60	13,3	12,7	14,0	1029
68	10,6	10,2	11,2	1181
69	10,2	9,9	10,9	1212
70	9,9	9,6	10,5	1222

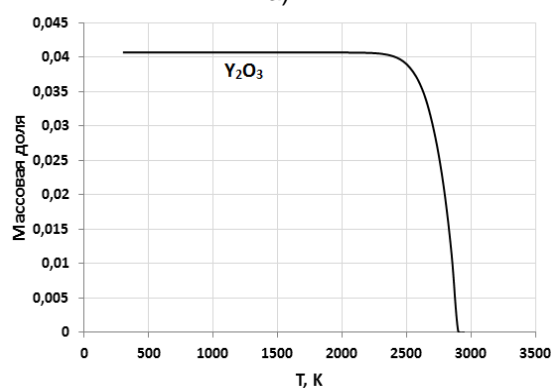
На рисунке 1 представлены равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов обработки ВСОК-1 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 69 %.

Из анализа полученных данных, приведенных в таблице 3 и на рисунке 1, следует, что массовая доля воздуха 69 % обеспечивает получение в конденсированной фазе целевого продукта Y₂O₃ в широком диапазоне температур без образования углерода. Снижение массовой доли воздуха ниже 69 % приводит к образованию углерода в составе продуктов. Повышение массовой доли воздуха выше 69 % не изменяет состав продуктов в конденсированной фазе, а приводит лишь к уменьшению

массовой доли получаемого целевого продукта в виде оксида иттрия.



а)



б)

Рисунок 1 – Равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов обработки ВСОК-1 в воздушной плазме (69 % воздух : 31 % ВСОК-1)

В таблице 4 показано влияние массовой доли воздуха на адиабатическую температуру плазменной обработки ВСОК-2.

Таблица 4 – Влияние массовой доли воздуха на адиабатическую температуру плазменной обработки ВСОК-2

Воздух, %	H ₂ O, %	ZrO(NO ₃) ₂ , %	C ₃ H ₆ O, %	T _{ад} , °С
50	20,4	11,6	18,0	750
60	16,3	9,3	14,4	885
70	12,3	6,9	10,8	1075
76	9,8	5,6	8,6	1204
80	8,2	4,6	7,2	1260

На рисунке 2 представлены равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов обработки ВСОК-2 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 76 %.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-СОЛЕОРНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

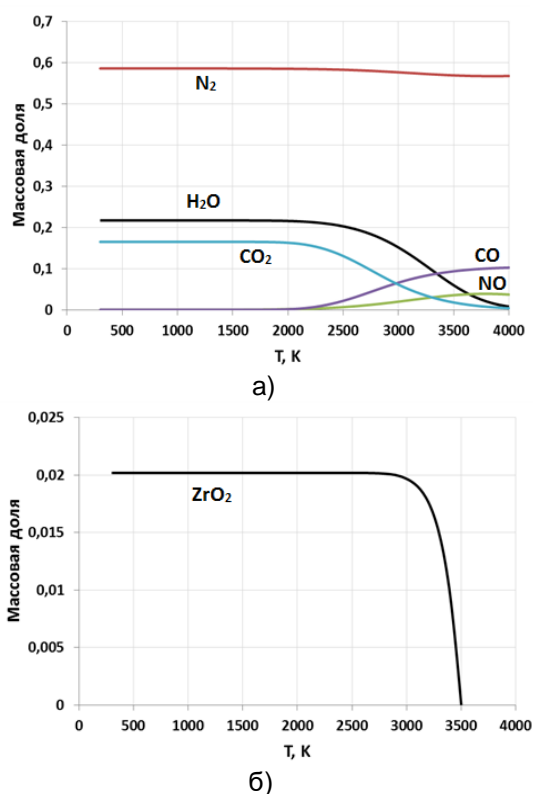
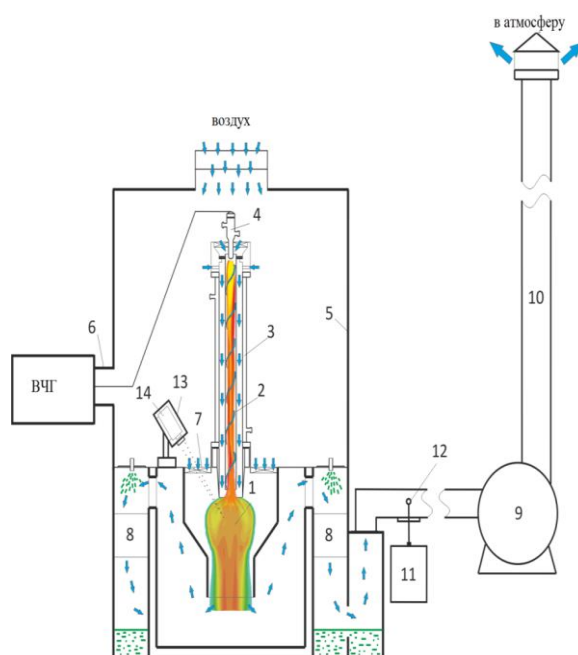


Рисунок 2 – Равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов обработки ВСОК-2 в воздушной плазме: (76 % воздух: 24 % ВСОК-2)

Из анализа полученных данных, приведенных в таблице 4 и на рисунке 2, следует, что массовая доля воздуха 76 % обеспечивает получение в конденсированной фазе целевого продукта ZrO_2 в широком диапазоне температур без образования углерода. Снижение массовой доли воздуха ниже 76 % приводит к образованию углерода в составе продуктов. Повышение массовой доли воздуха выше 76 % не изменяет состав продуктов в конденсированной фазе, а приводит лишь к уменьшению массовой доли получаемого целевого продукта в виде диоксида циркония.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования процесса плазмохимического синтеза нанодисперсных порошков оксидов иттрия и циркония из диспергированных водно-солеорганических композиций проводились на лабораторном плазменном стенде «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», схема которого представлена на рис. 3.



1 – диспергатор; 2 – ВЧФ-разряд; 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод; 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – реактор; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор; 10 – воздуховод; 11 – газоанализатор; 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра; 14 – пирометр; ВЧГ – высокочастотный генератор

Рисунок 3 – Схема лабораторного плазменного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01»

Для подготовки водно-солевых растворов использовались соли нитрата иттрия ($Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$) и нитрата циркония ($ZrO(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$), которые растворялись в воде согласно значениям их растворимостей (96,7 г/100 мл воды и 56,67 г/100 мл воды соответственно). Далее эти растворы смешивались с ацетоном в необходимой пропорции (таблицы 3, 4) для получения композиций ВСОК-1 и ВСОК-2.

После запуска вытяжного вентилятора 9 плазменного стенда путем подбора входной площади импеллера реактора 7 устанавливался расход воздуха через реактор на уровне 1,2 кг/с. Далее производился запуск ВЧФ-плазмотрона 3 и вывод его на заданный режим работы (мощность воздушной плазменной струи – 11,2 кВт, расход плазмообразующего газа – 0,05 кг/с). Предварительно подготовленные композиции подавались отдельно с постоянным расходом 0,55 кг/с (ВСОК-1) и 0,40 кг/с

(ВСОК-2) на диспергатор 1 и далее в диспергированном виде поступали в реактор, где в процессе обработки в воздушно-плазменном потоке при температуре около 1200 °С осуществлялся плазмохимический синтез оксидов иттрия и циркония. Контроль температуры в реакторе осуществлялся высокоточным цифровым пирометром 14 (IPE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора горячая пыле-парогазовая смесь поступала в узел «мокрой» очистки отходящих газов 8, где происходило ее резкое охлаждение (закалка) и отделение полученных порошков. После предварительной подготовки эти порошки направлялись на исследования: сканирующую электронную микроскопию для изучения морфологии и размера частиц, БЭТ-анализ для определения величины удельной поверхности порошка и рентгенофазовый анализ для изучения фазового состава проб.

АНАЛИЗ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ

Рентгенограммы полученных порошков снимались на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. На рис. 4 представлены результаты исследования фазового состава образцов порошков, полученных из композиций ВСОК-1 (а) и ВСОК-2 (б).

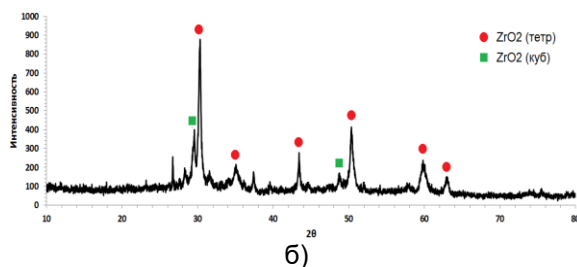
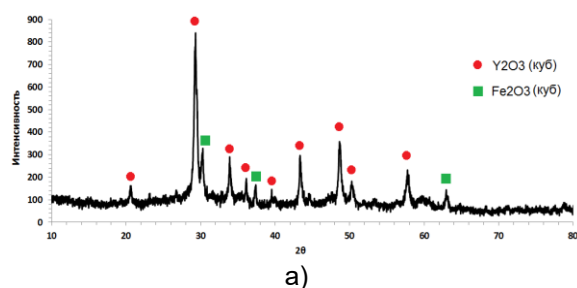


Рисунок 4 – Рентгенограммы образцов порошков, полученных из композиций ВСОК-1 (а) и ВСОК-2 (б)

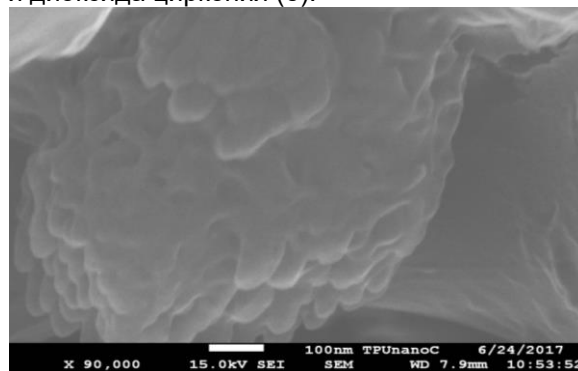
Анализ рентгенограммы образца порошка, полученного из композиции ВСОК-1 (рис. 4а), показывает, что основным продуктом пробы порошка является оксид иттрия

(Y₂O₃), находящийся в кубической фазе. Также проба содержит микропримесь в виде оксида железа (Fe₂O₃) в кубической фазе.

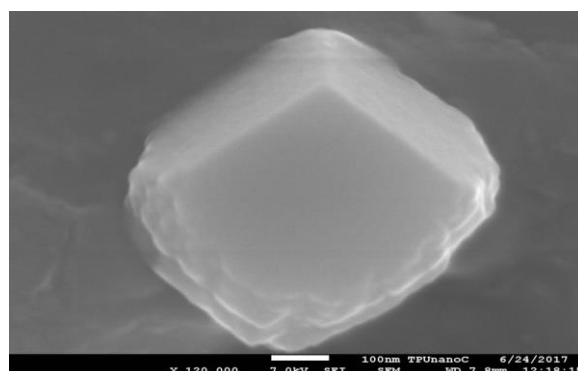
Анализ рентгенограммы образца порошка, полученного из композиции ВСОК-2 (рис. 4б), показывает, что основным продуктом пробы порошка является диоксид циркония (ZrO₂), находящийся в тетрагональной фазе, также в пробе присутствует диоксид циркония в кубической фазе.

Для исследования размера и морфологии частиц полученных порошков использовался сканирующий (растровый) электронный микроскоп JSM-7500FA фирмы JEOL, Япония. Предельное пространственное разрешение микроскопа – 1 нм, максимальное увеличение – 1000000 крат.

На рисунке 5 изображена микрофотография (СЭМ) частиц порошка оксида иттрия (а) и диоксида циркония (б).



а)



б)

Рисунок 5 – СЭМ-изображение частиц порошка оксида иттрия (а) и диоксида циркония (б)

Анализ морфологии частиц оксида иттрия по СЭМ-изображению (рис. 5а) показывает, что порошок состоит из агломератов, включающих зерна размером 40-60 нм. Это подтверждает принадлежность порошка оксида иттрия, полученного в процессе плазмо-

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-СОЛЕОРНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

химического синтеза, к классу наноразмерных.

Анализ морфологии частиц оксида циркония по СЭМ-изображению (рис. 5б) показывает, что порошок состоит из агломератов, включающих зерна размером 60-110 нм, что также подтверждает принадлежность порошка диоксида циркония, полученного в процессе плазмохимического синтеза, к классу наноразмерных.

В данной работе для анализа удельной поверхности нанопорошков оксидов иттрия и циркония использовался сорбтометр Сорби-М. Результаты измерения величины удельной поверхности нанопорошков оксидов иттрия и циркония представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерения величины удельной поверхности нанопорошков оксидов иттрия и циркония на сорбтометре Сорби-М

Измерение	Удельная поверхность порошка, м ² /г	
	Y ₂ O ₃	ZrO ₂
1	30,11	11,64
2	34,16	12,69
3	28,77	13,62
Среднее значение	31,01	12,65

Величина удельной поверхности $S_{уд}$ нанопорошка позволяет косвенно определить средний размер его частиц d . Для реальных порошков, составленных из частиц различных размеров и неправильной формы, средний размер частиц d определяется по формуле:

$$d = \frac{6}{S_{уд}\rho},$$

где ρ – плотность материала нанопорошка.

В таблице 6 представлены результаты расчета размеров частиц нанопорошков оксидов иттрия и циркония по величине удельной поверхности. При расчете использовались табличные значения плотности оксидов иттрия и циркония, равных 5,7 и 5,03 г/см³ соответственно.

Таблица 6 – Результаты расчета размеров частиц нанопорошков ZrO₂ и Y₂O₃ по величине удельной поверхности

Расчет	Размер частиц порошка, нм	
	Y ₂ O ₃	ZrO ₂
1	39,62	90,43
2	34,92	82,95
3	41,46	77,29
Среднее значение	38,47	83,21

Результаты расчетов размеров частиц по величине удельной поверхности нанопорошков оксидов иттрия и циркония удовлетворительно согласуются с результатами, полученными после сканирующей электронной микроскопии образцов данных порошков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов определены оптимальные по составу водно-солеорганические композиции «нитрат иттрия-вода-ацетон» и «нитрат циркония-вода-ацетон», имеющие низшую теплотворную способность $\approx 8,4$ МДж/кг и адиабатическую температуру горения не менее 1200 °С, а также условия (массовое отношение фаз, температура), обеспечивающие плазмохимический синтез оксида иттрия (Y₂O₃) и диоксида циркония (ZrO₂) в воздушной плазме.

В ходе экспериментальных исследований при рекомендованных условиях проведена плазменная обработка диспергированных композиций в воздушно-плазменном потоке и осуществлен плазмохимический синтез порошков оксидов иттрия и циркония.

Результаты анализов полученных порошков (сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, БЭТ-анализ) подтверждают получение нанодисперсных порошков оксидов иттрия и циркония.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии и оборудования для плазмохимического синтеза в воздушно-плазменном потоке нанодисперсных порошков оксидов иттрия, циркония, а также других простых и сложных оксидов металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балоян, Б. М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учебное пособие. / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов, А. М. Кротов. – М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 2007. – 125 с.
2. Алымов, М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
3. Алымов, М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. / М. И. Алымов, В. А. Зеленский. – М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
4. Новые материалы. Под ред. Ю.С. Карбасова – М.: МИСИС, 2002 – 736 с.
5. Алферов, Ж. И. Наноматериалы и нанотехнологии / Ж. И. Алферов, А. Л. Асеев, С. В. Гапонов, П. С. Копьев, В. И. Панов, Э. А. Полторацкий,

Н. Н. Сибельдин, Р. А. Сурис // Нано- и микросистемная техника. – 2003. – № 8. – С. 3-13.

6. Lupei, V. Single crystal and transparent ceramic Nd-oxide laser materials: a comparative spectroscopic investigation / V. Lupei, A. Lupei, A. Ikesue // Journal of Alloys and Compounds. 2004. – V. 380. – P. 61–70.

7. Manicone, P. F. An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications / P. F. Manicone, P. R. Iommetti, L. Raffaelli // Journal of Dentistry. – 2007. – V. 35. – P. 819–826.

8. Patra, A. Upconversion in Er³⁺: ZrO₂ nanocrystals / A. Patra, C. S. Friend, R. Kapoor, P. N. Prasad // Journal of Physical Chemistry B. – 2002. – V. 106. – P. 1909-1912.

9. Vagkopoulou, T. Zirconia in dentistry: Part 1. Discovering the nature of an upcoming bioceramics / T. Vagkopoulou, S. O. Koutayas, P. Koidis // The European Journal of Esthetic Dentistry. – 2009. – V. 4. – P. 130-151.

10. Davies, L. E. Characterization and catalytic activity of zirconium dioxide prepared by sol-gel / L. E. Davies, N. A. Bonini, S. Locatelli, E. E. Gonzo // Latin American Applied Research. – 2005. – V. 35. – P. 23-28.

11. Tuller, H. L.: in: Ceramic Materials for Electronics, 3rd edn., ed. by R. C. Buchanan (Marcel Dekker, New York 2004), p. 87.

12. Sivkov, A. A. Direct dynamic synthesis of nanodispersed phases of titanium oxides upon sputtering of electrodischarge titanium plasma into an air atmosphere/ A. A. Sivkov, D. Y. Gerasimov, D. S. Nikitin // Technical Physics Letters. 2017. V. 43. P. 16-19.

13. Shanenkov, I. I. Effect of gaseous medium pressure on plasmadynamic synthesis product in the C-N system with melamine / I. I. Shanenkov, A. A. Sivkov, A. Y. Pak, Y. L. Kolganova // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 813-818.

14. Sivkov, A. Plasma dynamic synthesis and obtaining ultradispersed zinc oxide with single-crystalline particle structure/ A. Sivkov, A. Ivashutenko, Y. Shanenkova, I. Shanenkov // Advanced Powder Technology. – 2016. – V. 27. – P. 1506-1513.

15. Туманов, Ю. Н. Плазменные и высокоча-

стотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее / Ю. Н. Туманов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, – 2003. – 760 с.

16. Karengin, A. G. Calculation and optimization of plasma utilization process of inflammable wastes after spent nuclear fuel recycling / A. G. Karengin, A. A. Karengin, I. Y. Novoselov, N. V. Tundeshev // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 433-436.

17. Каренгин, А. А. Модель кинетики испарения капель диспергированных водно-органических композиций в воздушно-плазменном потоке / А. А. Каренгин, А. Г. Каренгин, В. А. Власов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 130-135.

18. Бернадинер, М. Н. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов / М. Н. Бернадинер, А. П. Шурыгин. – М.: Химия, 1990. – 304 с.

Новоселов Иван Юрьевич – ассистент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра технической физики, e-mail: inovoselov@tpu.ru.

Каренгин Александр Григорьевич – к.ф.-м.н., доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра технической физики, e-mail: karengin@tpu.ru.

Шаманин Игорь Владимирович – д.ф.-м.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра технической физики, e-mail: shiva@tpu.ru.

Алюков Евгений Сергеевич – студент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра технической физики, e-mail: john.judo@mail.ru.