

**PLASMA DYNAMIC SYNTHESIS OF ULTRADISPERSE ALUMINUM OXIDE
IN CARBON DIOXIDE MEDIUM**

Ivan Igorevich Shanenkov^{1, 2a}, *Dmitry Sergeevich Nikitin*^{1, 2}, *Artur Renatovich Nassyrbayev*²,
*Alexander Igorevich Tsimmerman*², *Alexander Anatolievich Sivkov*^{2, 3}

¹ Tyumen State University, Volodarsky str. 6, 625003, Tyumen, Russia

² National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin pr. 30, 634050, Tomsk, Russia

³ Jilin University, Qianjin str. 2699, 130023, Changchun, China

^a i.i.shanenkov@utmn.ru

ABSTRACT

High stable interest in aluminum oxide as one of the most widespread functional materials and constant expansion of its possible applications cause significant production volumes, as well as the search for new synthesis methods. Potentially, aluminum oxide can be produced by applying carbon dioxide (CO₂) as a cheap and available source of oxygen. However, the use of CO₂ as an oxidizing agent requires breaking the bonds of the CO₂ molecule, which is a very energy-consuming process. This paper presents a fundamentally new approach to the synthesis of aluminum oxide when applying CO₂ as a gaseous precursor and oxidizer, based on the application of pulsed arc discharge plasma of the electric erosion type. The implementation of the proposed method, called plasma dynamic synthesis, results in producing ultradisperse aluminum oxide. The influence of the plasma jet outflow mode on the composition and morphology of the synthesized materials is investigated. The multi-pulse operation mode in the considered system provides obtaining of almost complete oxidation of synthesis products and high productivity (up to 15 g per cycle), as well as allows achieving the CO₂ conversion rate of up to 14.5%. The plasma dynamic synthesis implementation is found to result in almost completely oxidized and highly dispersed product with minimum content of metal phase and particle sizes in the range from 50 nm to 1 μm.

KEYWORDS

Coaxial magnetoplasma accelerator; arc discharge; ultrafine powders; aluminum oxide; CO₂ utilization; ceramics.

**ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ОКСИДА
АЛЮМИНИЯ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**

Иван Игоревич Шаненков^{1, 2a}, *Дмитрий Сергеевич Никитин*^{1, 2}, *Артур Ренатович Насырбаев*²,
*Александр Игоревич Циммерман*², *Александр Анатольевич Сивков*^{2, 3}

¹ Тюменский Государственный Университет, Россия, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6

² Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30

³ Цзилиньский Университет, Китай, 130023, Чанчунь, ул. Цяньцзинь, 2699

^a i.i.shanenkov@utmn.ru

АННОТАЦИЯ

Стабильно высокий интерес к оксиду алюминия как одному из наиболее распространенных функциональных материалов и постоянное расширение областей его возможного применения обуславливает значительные объемы его производства, а также поиск новых методов синтеза. Потенциально оксид алюминия можно получать за счет использования углекислого газа (CO_2), который является дешевым и доступным источником кислорода. Однако применение CO_2 в качестве окислителя требует разрыва связей молекулы CO_2 , что является весьма энергозатратным процессом. В данной работе представлен принципиально новый подход к синтезу оксида алюминия при использовании CO_2 в качестве газообразного прекурсора и окислителя, основанный на применении импульсной электроэрозионной плазмы дугового разряда. Реализация предлагаемого метода, называемого плазмодинамическим синтезом, приводит к получению дисперсного оксида алюминия. Исследовано влияние режима истечения плазменной струи на состав и морфологию синтезируемых материалов. Многоимпульсный режим работы в рассматриваемой системе обеспечивает практически полное окисление продуктов синтеза и высокую производительность (до 15 г за цикл), а также позволяет достичь степени конверсии CO_2 до 14,5%. Установлено, что реализация плазмодинамического синтеза позволяет сформировать практически полностью окисленный высокодисперсный продукт с минимальным содержанием металлической фазы и размерами частиц в диапазоне от 50 нм до 1 мкм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель; дуговой разряд; ультрадисперсные порошки; оксид алюминия; утилизация CO_2 ; керамика.

Введение

Конструкционные материалы занимают важнейшее место в промышленности, а их совершенствование определяет технологическое развитие различных отраслей человеческой деятельности. К числу наиболее распространенных металлических конструкционных материалов относятся алюминий и его сплавы [1–6]. Такие материалы применяются повсеместно, в том числе в электроэнергетике, аэрокосмической промышленности, строительстве и др. [7–11]. Помимо этого, интерес представляют также оксиды на основе алюминия, особенно высокодисперсные порошки, которые также находят применение в самых разных областях [12–16].

Основными способами получения оксидов алюминия являются химические процессы, связанные с применением внешнего термического воздействия в присутствии окислителя, которым в основном является кислород, как атмосферный, так и технический [17]. Тем не менее реакция окисления потенциально может быть реализована при использовании углекислого газа CO_2 , при разложении которого образуются молекулы кислорода O_2 . Однако проблема применения CO_2 заключается в необходимости разрыва связей молекулы CO_2 , что требует больших затрат энергии [18–20]. Это основной ограничивающий фактор для большинства технологий, основанных на применении диоксида углерода.

Известно, что ослабить стабильность молекул CO_2 возможно за счет достижения высоких температур или давлений [21]. В основном это осуществляется применением плазменных технологий, основными преимуществами которых, помимо возможности достижения высоких температур и давлений, являются универсальность, низкие эксплуатационные расходы и др. Так, в работе [22] S. Liu и др. применяется нетермическая плазма для преобразования CO_2 и CH_4 в кислородсодержащие продукты, например метанол или уксусную кислоту. L. Wang и др. [23] синтезировали метанол при атмосферном давлении и комнатной температуре методом плазменно-каталитического гидрирования CO_2 . M. Mikhail и др. в работе [24] показали возможность метанирования CO_2 за счет разрядной плазмы с диэлектрическим барьером. Такие методы в основном обеспечивают условия для переработки CO_2 в жидкости или газы и их дальнейшее применение в различных отраслях промышленности. Однако существующие плазменные методы не предполагают синтез различных функциональных материалов в кристаллической форме, что представляется гипотетически возможным и практически значимым для получения широкого круга оксидов металлов с использованием CO_2 в качестве газообразного прекурсора. Потенциально такие режимы получения дисперсных материалов могут быть реализованы методом высокоэнергетического плазмодинамического синтеза. Этот процесс позволяет синтезировать нано- и ультрадисперсные порошки различного фазового состава [25, 26].

Таким образом, данное исследование направлено на получение ультрадисперсных порошков оксида алюминия при распылении импульсной электроэрозионной плазмы дугового разряда в среде CO_2 , играющей роль

газообразного прекурсора и источника кислорода.

1. Методика исследований

Возможность получения порошков оксида алюминия в среде CO_2 исследована при использовании метода плазмодинамического синтеза, основной принцип работы которого подробно описан ранее [21]. Конструктивно система плазмодинамического синтеза состоит из трех основных элементов (рис. 1): а) секционированного емкостного накопителя энергии; б) коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) с металлическими электродами; в) рабочей камеры-реактора, в которой непосредственно происходит процесс синтеза.

Особенностью накопителя является его секционированное исполнение, позволяющее осуществлять электропитание КМПУ с возможностью изменения исходных энергетических параметров (максимальное рабочее напряжение $U_{\text{ch}} = 5,0$ кВ, максимальная емкость $C_{\text{ch}} = 28,8$ мФ, максимальная накапливаемая энергия $W_{\text{ch}} = 360$ кДж) и количества последовательных импульсов электропитания. Последнее реализуется путем подачи управляющих сигналов от многоканального генератора задержанных импульсов (DPG) на блоки управления (СУ) управляемых силовых ключей (РК), подключенных к соответствующим секциям конденсаторных батарей. Замыкание этих силовых ключей приводит к разряду конденсаторных батарей на нагрузку, которой является КМПУ, и в цепи начинает протекать ток разряда. Регистрация энергетических параметров процесса, а именно тока разряда и напряжения на электродах, осуществлялась при помощи трансформатора Роговского и омического делителя напряжения соответственно. Сигналы регистрировались при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS 2012.

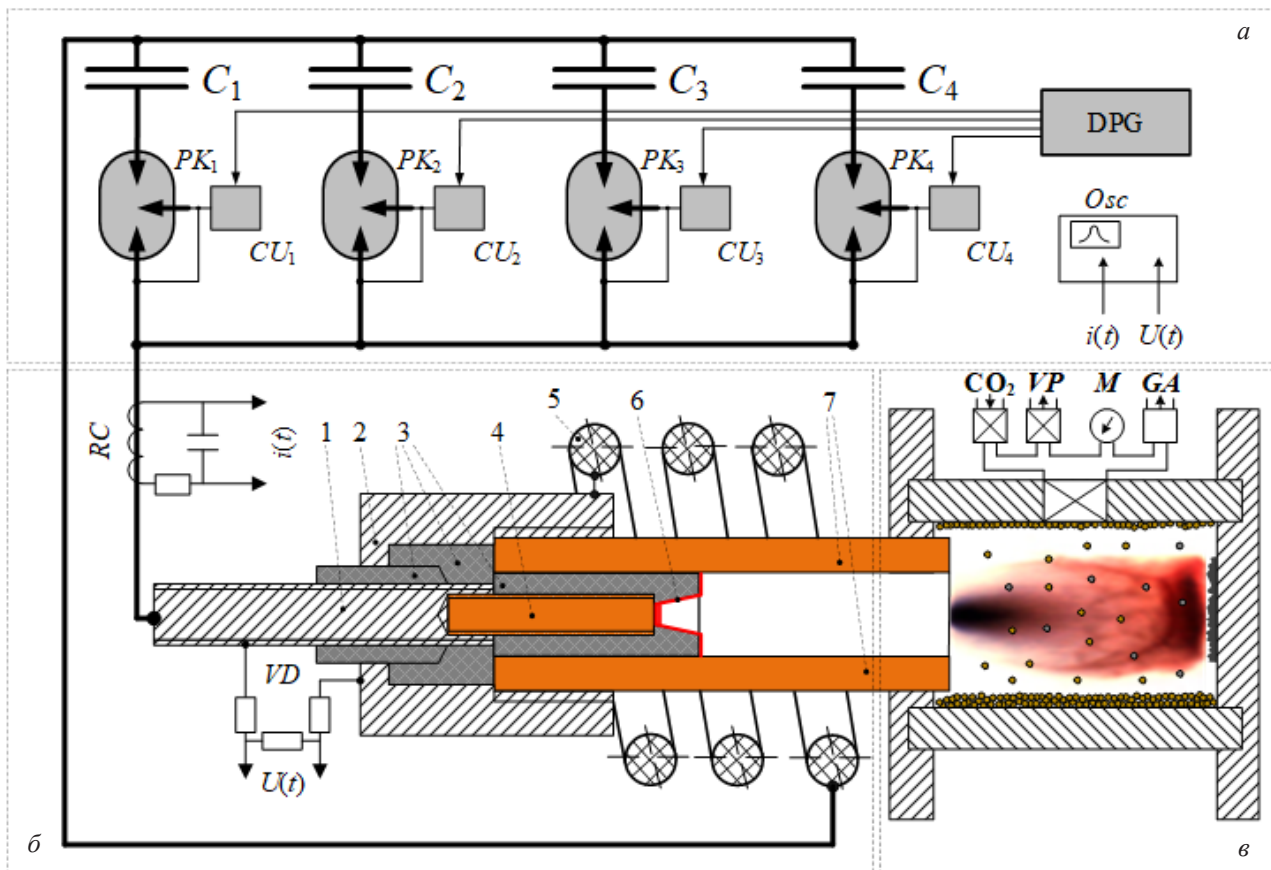


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – центральный электрод; 2 – металлическая обойма; 3 – составной изолятор центрального электрода; 4 – алюминиевая вставка центрального электрода; 5 – внешняя индуктивная система; 6 – плавкая перемычка; 7 – алюминиевый электрод-ствол

Fig. 1. A sketch-map of the experimental setup:

1 – central electrode; 2 – metal holder; 3 – insulator of the central electrode; 4 – aluminum insert of the central electrode; 5 – external inductive system; 6 – fusible jumper; 7 – aluminum barrel electrode

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель представляет собой классический Z-пинч ускоритель, размещенный внутри мощной индуктивной системы, необходимой для выравнивания электроэрозионного износа по длине электрода-ствола и дополнительного ускорения плазмы. Иницирование дугового разряда осуществляется посредством перемычки, выполненной в виде слоя графита, нанесенного на внутреннюю поверхность изолятора центрального электрода. При замыкании контура электропитания от емкостного накопителя начинает

протекать греющий ток разряда, который приводит к пробое межэлектродного промежутка и формированию плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа Z-пинч с круговым плазменным поршнем, которая в последствие ускоряется вдоль внутренней поверхности электрода-ствола.

В процессе работы КМПУ основной прекурсор синтеза (алюминий) нарабатывается электроэрозионным путем с поверхности электрода-ствола при горении и перемещении в нем сильноточного дугового разряда, температура плазмы которого составляет

порядка 10^4 К [22]. Непосредственно синтез нано- и ультрадисперсных материалов осуществляется в рабочей камере-реакторе, заполненной углекислым газом при нормальном давлении и комнатной температуре, при распылении жидкофазного материала в свободное пространство. Перед закачкой углекислого газа камера-реактор вакуумируется форвакуумным насосом через газовый коллектор, после чего производится напуск углекислого газа (чистота 99,8%). Давление газа в камере-реакторе контролируется посредством манометра. В системе также предусмотрена регистрация состава газовой среды при помощи газоанализатора (Тест-1, Бонер, Россия). В ходе исследования состав газов оценивался непосредственно перед запуском системы, после закачки углекислого газа и сразу после окончания протекания разрядного тока, путем открытия перепускного клапана.

Сбор синтезированных продуктов осуществлялся после их естественного осаждения в атмосфере камеры-реактора в течение 1 часа после запуска системы. Масса дисперсных материалов оценивалась с использованием аналитических весов с точностью до 2 знака после запятой.

Фазовый состав и кристаллическая структура продуктов плазмодинамического синтеза и керамики исследовались методами рентгеноструктурного анализа (XRD) с использованием дифрактометра Shimadzu

XRD 7000S (CuK α -излучение), программы Crystallographica Search-Match 2.1.1.0. и базы структурных данных «PDF4+».

Морфология объектов в составе продуктов синтеза и структура керамики исследовались методами сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа Hitachi TM-3000. Структура и фазовая принадлежность нанодисперсных частиц продуктов синтеза исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопа Jeol JEM 2100F при ускоряющем напряжении 200 кВ.

2. Результаты и обсуждение

Получение оксида алюминия в рассматриваемой системе плазмодинамического синтеза в случае использования CO₂ в качестве рабочего газа возможно только в случае, когда энергии процесса будет достаточно для расщепления молекул CO₂ и высвобождения кислорода. Тогда при распылении металлсодержащей плазмы будет происходить окисление формирующихся частиц с образованием оксидов металлов. Для демонстрации возможностей плазмодинамического синтеза по получению порошкообразных продуктов в среде углекислого газа проведены эксперименты с однократным и последовательными четырехкратными импульсами электропитания ускорителя, основные данные которой приведены в табл. 1. Характерные осциллограммы процесса приведены на рис. 2.

Таблица 1. Основные параметры экспериментов по синтезу оксида алюминия в среде углекислого газа

Table 1. Main parameters of experiments on aluminum oxide synthesis in carbon dioxide environment

Кол-во импульсов	U_{ch}	C_{ch}	U_{arc}	I_{max}	P_{max}	W_s	t_{pul}	P_{av}	Δm_c	m
	kV	mF	kV	kA	MW	kJ	μs	MW	g	g
1	2,5	14,4	1,00	117,0	116,7	26,4	480	55,0	7,52	5,56
4		4×7,2	0,86	86,4	74,2	12,6	308	40,8	20,41	15,64
			0,84	88,2	73,7	12,9	328	39,3		
			0,86	82,8	71,1	12,7	326	38,8		
			0,86	82,8	71,1	12,9	324	39,9		

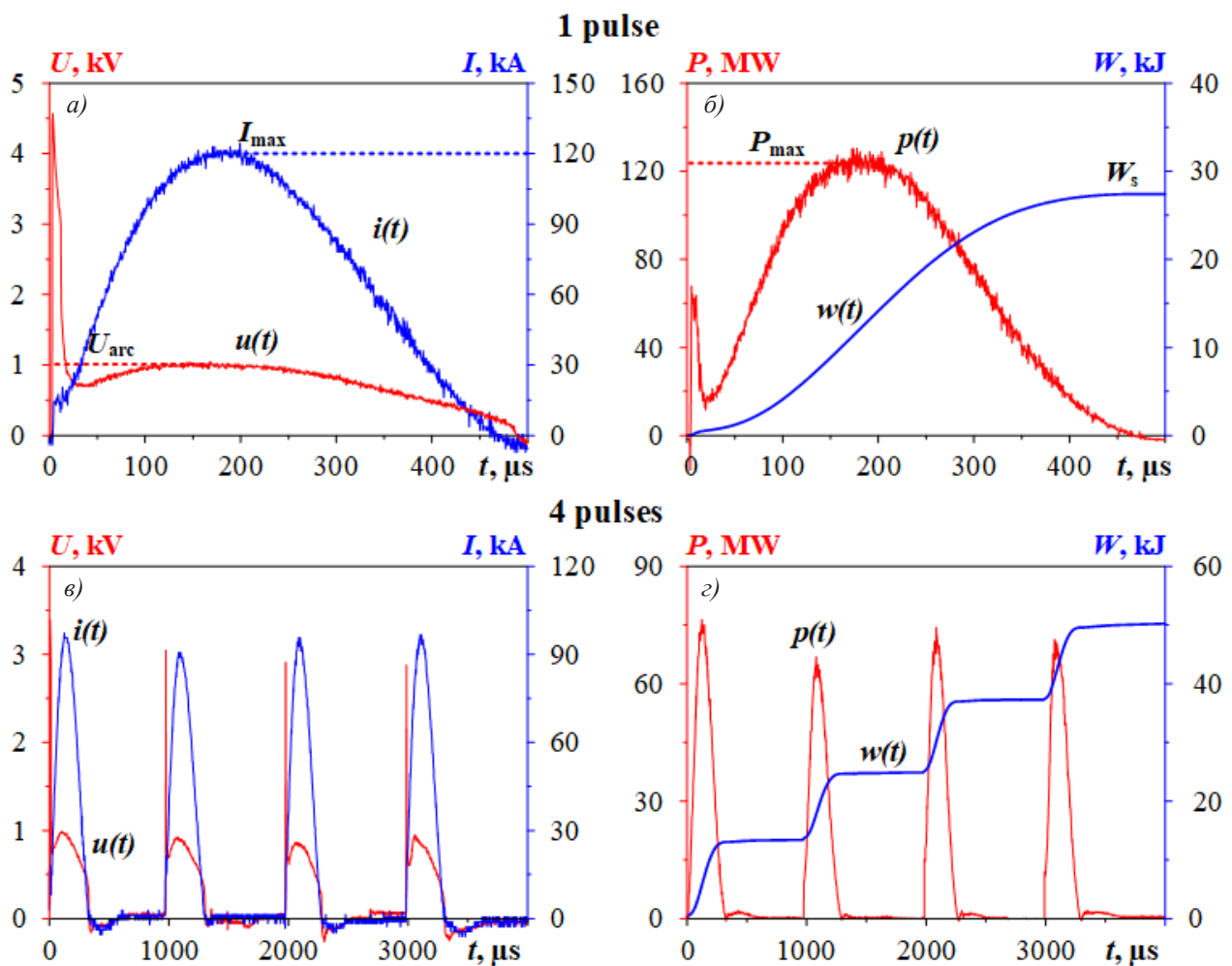


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения $U(t)$, тока $I(t)$, мощности разряда $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$ в одно- и четырехимпульсном режимах работы системы плазодинамического синтеза

Fig. 2. Typical oscillograms of voltage $U(t)$, current $I(t)$, discharge power $P(t)$ and supplied energy $W(t)$ in one- and four-pulse operation modes of the plasma dynamic synthesis system

В ходе одноимпульсного электропитания ускорителя длительностью t_{pul} , происходит формирование дугового плазменного разряда, его ускорение и распыление в газообразной среде CO_2 . Как видно из данных табл. 1, энергетические параметры процесса (напряжение, амплитуда тока, максимальная и средняя мощность разряда), по-видимому, определяют интенсивность высокоэнергетического плазменного воздействия на

молекулы CO_2 , разлагая их на угарный газ CO и кислород O_2 . Наличие высвободившегося кислорода будет приводить к окислению распыленного эродированного металла. Таким образом, логично предположить, что содержание CO_2 по итогу такого процесса должно уменьшаться, а содержание CO возрастать.

Как видно из представленных в табл. 1 данных, основным отличием 4-х импульс-

ного режима является значительное снижение амплитуды разрядного тока и энергии единичного импульса до $\sim 86 \pm 3$ кА и 12 ± 1 кДж соответственно. Это, в свою очередь, сказывается на электроэрозионной наработке материала. Проведенные ранее исследования показали, что реализация процесса плазодинамического синтеза со схожей энергетикой в рамках единичного импульса электропитания не позволяет осуществить эффективную наработку материала, а электроэрозия не превышает 0,1 г [27, 28], поскольку не превышает минимально обоснованной величины подведенной энергии. Последовательное увеличение числа импульсов приводит к росту электроэрозии электрода-ствола и достигает максимальных значений при четырехимпульсном режиме работы системы. Логично предположить, что это обусловлено возрастающим тепловым воздействием от протекания тока дугового разряда по электродной системе

ускорителя в рамках последовательной подачи импульсов. Это же, по всей видимости, должно приводит к большей активации углекислого газа в объеме камеры-реактора в ходе первых импульсов электропитания, достигая максимального значения к четвертому импульсу.

Результаты анализа состава газовой среды до и после проведения экспериментов плазодинамического синтеза в одно- и четырехимпульсном режимах работы приведены на рис. 3 и подтверждают высказанное предположение. Как видно из представленных зависимостей, наиболее активно происходит разложение CO_2 в режиме с четырьмя импульсами. Результаты измерений подтверждают справедливость высказанных суждений, что заметно по величине конверсии CO_2 и приросту CO в камере-реакторе. Так, величина конверсии CO_2 в случае использования многоимпульсного режима составила 15%.

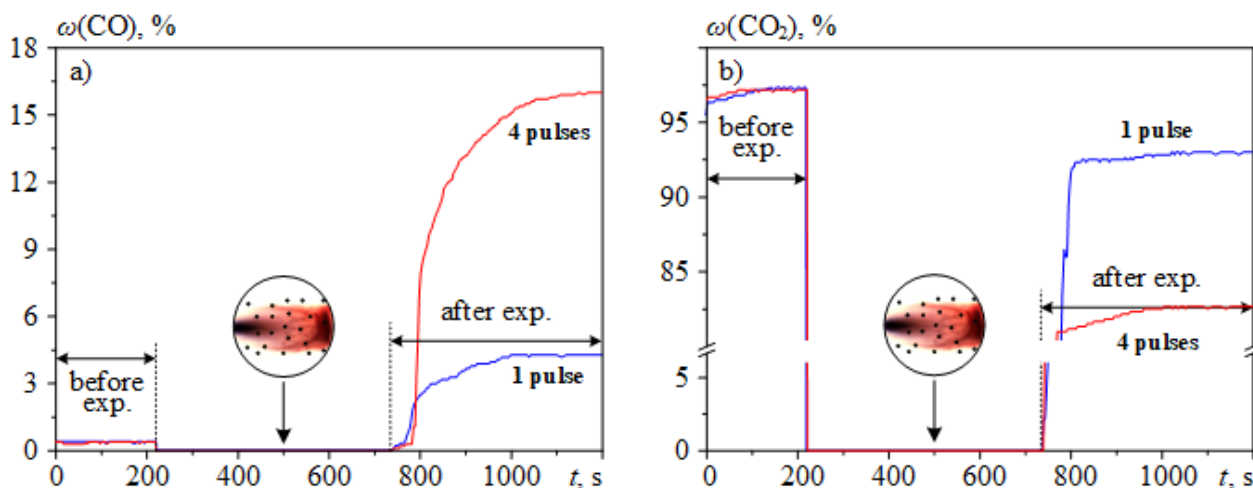


Рис. 3. Кривые изменения содержания газов в объеме камеры-реактора до и после проведения экспериментов в одно- и четырехимпульсном режимах работы системы плазодинамического синтеза

Fig. 3. Curves of changes in gas content in the reactor chamber volume before and after experiments in one- and four-pulse operation modes of the plasma dynamic synthesis system

Незначительные объемы преобразованного CO_2 в рамках электропитания ускорителя единичным импульсом, по всей видимости, обусловлены тем, что значительное количество энергии тратится на разрыв связей CO_2 и расплав приповерхностного слоя электрода ствола и электроэрозионнуюработку материала. В тоже время быстрота протекающих реакций (длительность импульса менее 500 мкс) не позволяет осуществить эффективное взаимодействие ионизированного газа с уже распыленным материалом. Но даже несмотря на этот факт обнаружена перспективность использования такой газовой среды для получения оксида алюминия. Логично предположить, что повышение энергетики в этом случае не будет положительно сказываться на результатах конверсии CO_2 , поскольку длительность импульса электропитания существенно не изменится. В связи с этим наиболее оптимальным кажется реализация многоимпульсного режима работы системы при пониженной энергетике одиночного импульса. В таком

режиме энергия первых импульсов электропитания затрачивается на ионизацию газа и разогрев электрода-ствола, в то время как наработка основного материала в достаточных объемах и его распыление в ионизированное пространство происходит при последующих импульсах электропитания.

Исследование фазового состава методом рентгеновской дифрактометрии (рис. 4) косвенно подтвердило результаты исследования конверсии газов. Как видно по дифрактограммам порошков, полученных при одно- и четырехимпульсном режимах работы системы плазодинамического синтеза, практически весь эродированный материал, за исключением небольшого количества чистого металла, перешел в оксидные фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\delta\text{-MgAl}_2\text{O}_4$, которые могут образовываться в условиях недостатка кислорода. Образование магниевой шпинели обусловлено наличием чистого металлического магния в составе исходного алюминиевого сплава, использованного при изготовлении труб и послуживших основой для электродов КМПУ.

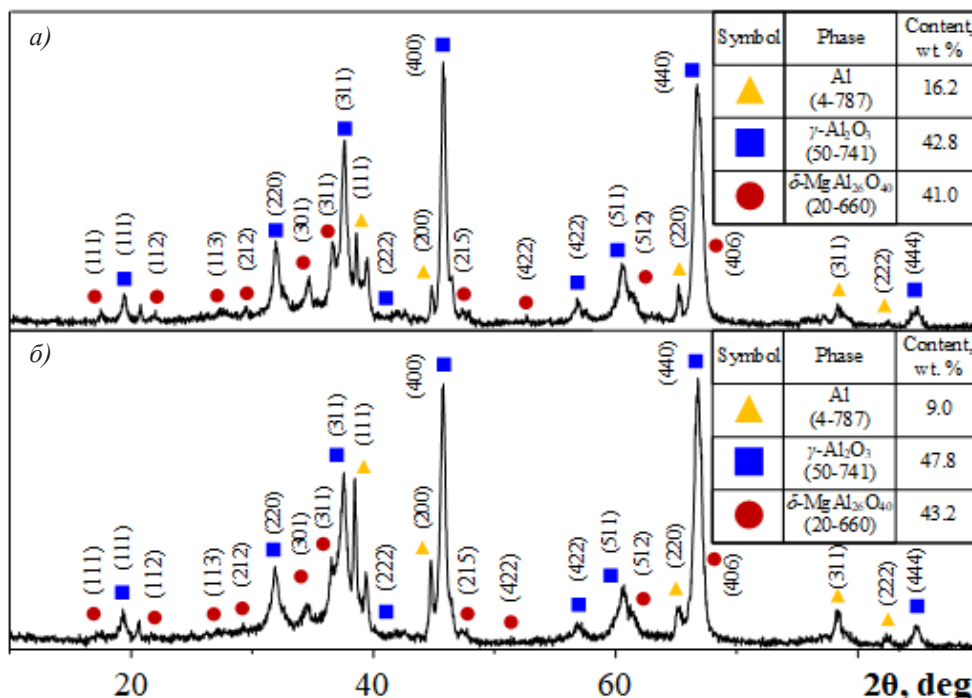


Рис. 4. Результаты XRD анализа продуктов, полученных в одно- (а) и четырехимпульсном (б) режимах работы системы плазодинамического синтеза

Fig. 4. XRD analysis results for products obtained in one-pulse (a) and four-pulse (b) operation modes of the plasma dynamic synthesis system

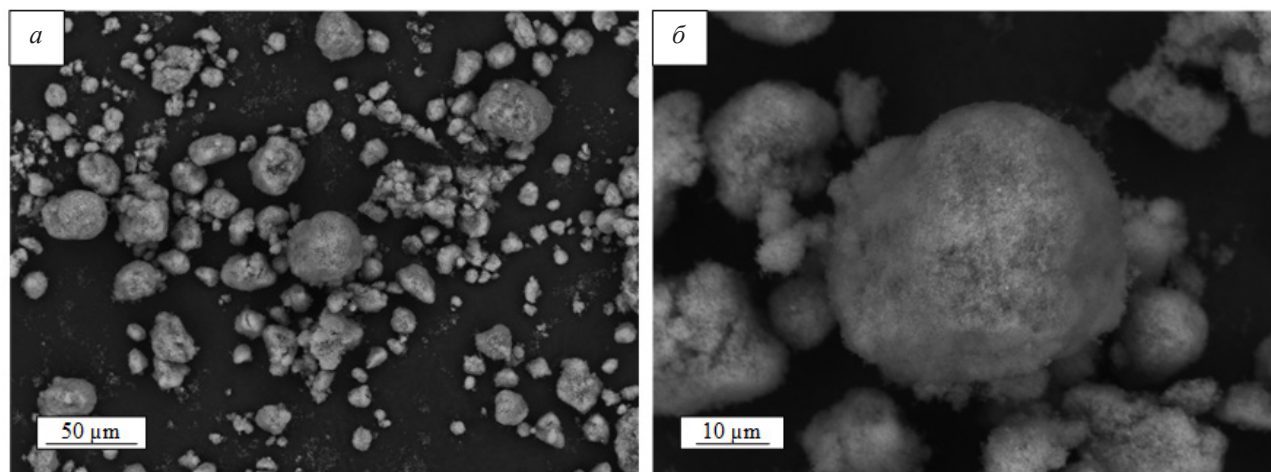


Рис. 5. Результаты растровой электронной микроскопии продуктов плазодинамического синтеза, полученных в четырехимпульсном режиме работы

Fig. 5. Results of scanning electron microscopy for plasma dynamic synthesis products obtained in four-pulse operation mode

Исследование гранулометрического состава полученных дисперсных материалов позволило отметить ряд особенностей (рис. 5). Анализ обзорного снимка скопления частиц не позволил выявить каких-либо отчетливых морфологических особенностей у присутствующих объектов. Более того, при ближайшем рассмотрении обнаружилось, что присутствующие объекты представляют собой агломераты, состоящие из высокодисперсных частиц, размерами менее 100–200 нм. Это затрудняет их идентификацию на используемом разрешении.

В этой связи для более подробного исследования структуры частиц синтезированного оксида алюминия были проведены исследования методами просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 6, *a* приведен обзорный светлопольный микроснимок характерного скопления нано- и субмикронных частиц синтезированного продукта. Микроснимок показывает, что мелкая фракция продукта, принципиально учитываемая при анализе методами ТЕМ, включает несколько типов кристаллических объектов. Наиболее

выделяются относительно крупные (более 400 нм) субмикронные частицы, имеющие выраженную кристаллическую огранку, а значит, являющиеся монокристаллическими. В настоящем скоплении они представлены частицами в виде правильного многоугольника и квадрата в плане, причем последний объект светится в темном поле при сдвиге апертурной диафрагмы в область рефлексов $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (400) и $\delta\text{-MgAl}_{26}\text{O}_{40}$ (400). Помимо подтверждения посредством темного поля фазовая принадлежность объектов указанного типа может быть установлена кристаллографическим анализом. Многоугольная в плане частица соотносится с простой формой гексоэдра, а частица в виде квадрата в плане – с простой формой гексаэдра (куба). Обе простые формы соответствуют кубической сингонии и, в частности, кристаллографическому классу [29], который удовлетворяет пространственной группе (по 227) для гамма-фазы оксида алюминия Al_2O_3 . В случае более мелких частиц наблюдается существенное изменение габитуса кристаллов. Известно, что морфология на-

нокристаллов может меняться вместе с изменением размера, поскольку при уменьшении размера частиц до нанометрового масштаба поверхностный эффект становится доминирующим. Так, при малом размере (менее 100 нм) формируются частицы приблизительно сферической формы, при размере частиц более 100 нм частицы с четкой многогранной монокристаллической структурой более стабильны [30]. Указанная тенденция очевидна при сравнении частиц средней фракции (70–120 нм, например, II и III), где присутствует некоторая огранка, и мелкой (менее 70 нм, например, IV), где форма

становится сферической. Кроме того, мелкие частицы преимущественно сцеплены в плотные агломераты из-за высокой поверхностной энергии. Фазовая идентификация указанных частиц несколько затруднена в силу наличия в системе магния, поэтому мелкую и часть средней фракции допустимо рассматривать как принадлежащую $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (400) и $\delta\text{-MgAl}_2\text{O}_4$, что видно из темнопольных ТЕМ-снимков соответствующих объектов (II, III, IV), снятых при сдвиге апертурной диафрагмы в область сдвоенных рефлексов указанных фаз.

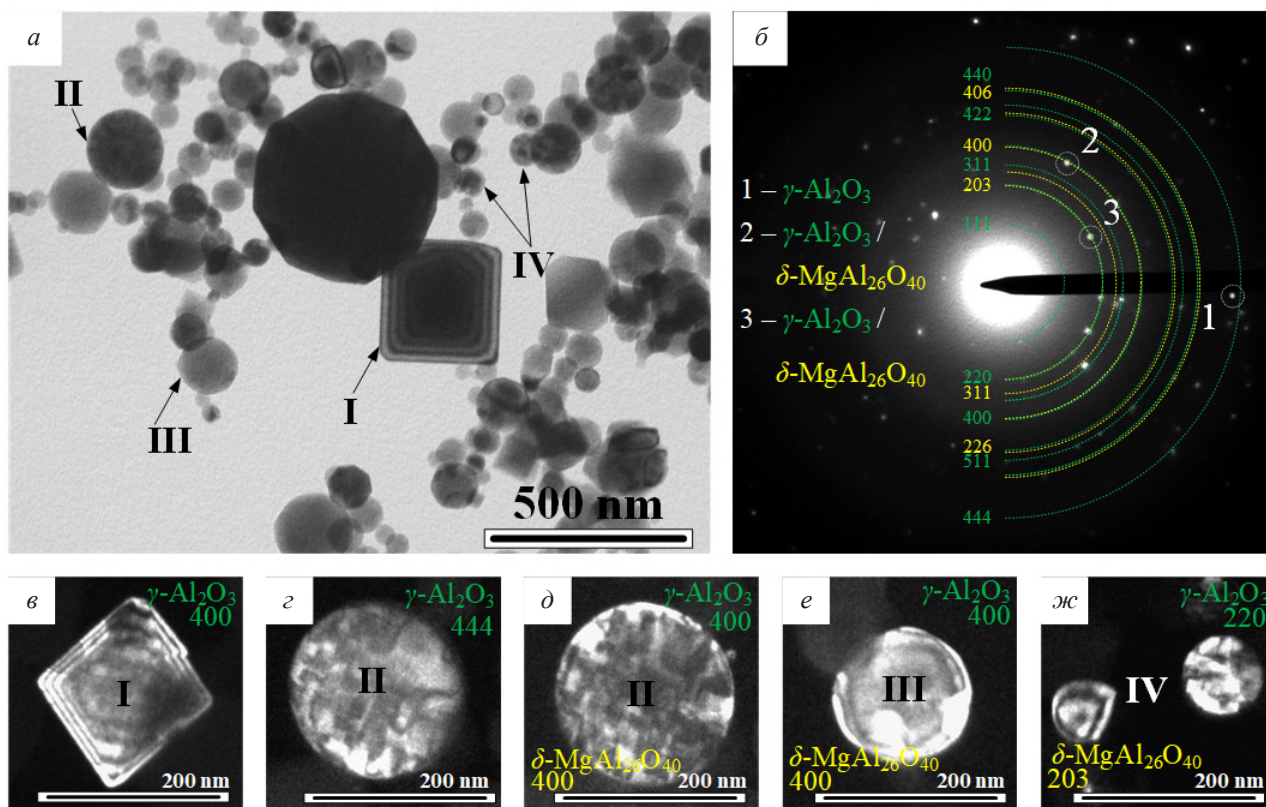


Рис. 6. Результаты просвечивающей электронной микроскопии порошков оксида алюминия: а – обзорный светлопольный ТЕМ-снимок; б – SAED; в–ж – темнопольные изображения отмеченных частиц (I, II, II, IV) в свете указанных рефлексов 1 (в), 2 (г, д, е), 3 (ж)

Fig. 6. Results of transmission electron microscopy of aluminum oxide powders: а – overview bright-field TEM image; б – SAED; в–ж – dark-field images of marked particles (I, II, II, IV) in the light of the indicated reflexes 1 (в), 2 (г, д, е), 3 (ж)

Таким образом, в результате реализации процесса плазмодинамического синтеза в газообразной среде углекислого газа с использованием коаксиального магнитоплазменного ускорителя с алюминиевыми электродами удалось синтезировать высокодисперсный материал в среде CO_2 .

Выводы

В рамках проведенных исследований по синтезу дисперсного оксида алюминия в импульсной плазме дугового разряда, распыляемой в среду диоксида углерода, установлено следующее:

1. Метод плазмодинамического синтеза позволяет получать дисперсные материалы оксида алюминия при использовании CO_2 в качестве газообразного прекурсора в ходе единого рабочего процесса генерации и распыления импульсной плазмы дугового разряда.

2. В многоимпульсном режиме работы системы (последовательная генерация до 4-х плазменных струй во временном интервале менее 3 мс) степень конверсии CO_2 и масса синтезируемого продукта достигают максимальных значений (14,5% и ~15 г соответственно), Это объясняется увеличенным значением электроэрозии, вызванным повышенным разогревом электрода-ствола под действием последовательно протекающих импульсов тока и образованием большего количества кислорода за счет более высокой степени конверсии CO_2 , что создает благоприятные условия для синтеза оксида алюминия.

3. В результате реализации процесса удается синтезировать оксидные материалы с минимальным содержанием металлического алюминия, характеризующиеся высокодисперсным состоянием и средним размером частиц в диапазоне 50 нм – 1 мкм.

Таким образом, показана возможность применения диоксида углерода в качестве газообразного прекурсора при распылении металлосодержащей плазмы импульсного

дугового разряда. Данная технология может быть использована в дальнейшем для одностадийной переработки диоксида углерода и получения продуктов с добавленной стоимостью в виде высокодисперсных порошков оксида алюминия.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии).

The study was supported by the State assignment No. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technical foundations and applied solutions for integrated energy and thermal processing of biomass to ensure environmentally friendly technologies in energy industry and metallurgy).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao Z., To S., Wang J., Zhang G., Weng Z. A review of micro/nanostructure effects on the machining of metallic materials // Mater Des. 2022. V. 224. Article number 111315. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111315.
2. Wan J., Zhu Y., Zhang Y., Zhao H. Strain rate effect and dynamic constitutive model of 7A04-T6 high-strength aluminium alloy // Struct. 2023. V. 53. P. 1250–1266. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.05.013.
3. Han Q., Li M., Wang Z., Yun X., Ouyang Y. Local buckling behaviour and design of aluminium alloy plates in fire // Thin-Walled Struct. 2023. V. 189. Article number 110886. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110886.
4. Chen Z., Song X., Luo Y. Ion bombardment induced surface microstructural modification of aluminum alloy // Vacuum. 2023. V. 215. Article number 112266. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112266.
5. Yang H., Sha J., Zhao D., He F., Ma Z., He C., Shi C., Zhao N. Defects Control of Aluminum Alloys and Their Composites Fabricated via Laser Powder Bed Fusion: A Review // J. Mater. Process. Technol. 2023. V. 319. Article number 118064. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118064.
6. Zhu Z., Hu Z., Seet H. L., Liu T., Liao W., Ramamurty U., Nai S. M. L. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications // Int. J. Machine Tools

- and Manufacture. 2023. V. 190. Article number 104047. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104047.
7. Shen W., Hu A., Liu S., Hu H., Al-Mn alloys for electrical applications: A review // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2023. V. 2. Article number 100008. DOI: 10.1016/j.jalmes.2023.100008.
8. Nguyen H. D., Pramanik A., Basak A. K., Dong Y., Prakash C., Debnath S., Shankar S., Jawahir I. S., Dixit S., Buddhi D. A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. V. 18. P. 4641–4661. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.055.
9. Xu W., Yang T., Liu S., Du L., Chen Q., Li X., Dong J., Zhang Z., Lu S., Gong Y., Zhou L., Liu Y., Tan X. Insights into the Synthesis, types and application of iron Nanoparticles: The overlooked significance of environmental effects // *Environ Int*. 2022. V. 158. Article number 106980. DOI: 10.1016/j.envint.2021.1069800.
10. Mahmoudi P., Akbarpour M. R., Lakeh H. B., Jing F., Hadidi M. R., Akhavan B. Antibacterial Ti-Cu implants: A critical review on mechanisms of action // *Mater Today Bio*. 2022. V. 17. Article number 100447. DOI: 10.1016/j.mtmbio.2022.100447.
11. Jia Y., Li F., Fan K., Sun L. Cu-based bimetallic electrocatalysts for CO₂ reduction // *Advanced Powder Materials*. 2022. V. 1, Iss. 1. Article number 100012. DOI: 10.1016/j.apmate.2021.10.003.
12. Attia N. F., El-Monaem E. M. A., El-Aqapa H. G., Elashery S. E. A., Eltaweil A. S., El Kady M., Khalifa S. A. M., Hawash H. B., El-Seedi H. R. Iron oxide nanoparticles and their pharmaceutical applications // *Applied Surface Science Advances*. 2022. V. 11. Article number 100284. DOI: 10.1016/j.apsadv.2022.100284.
13. Revathy R., Sajini T., Augustine C., Joseph N. Iron-based magnetic nanomaterials: Sustainable approaches of synthesis and applications // *Results in Engineering*. 2023. V. 18. Article number 101114. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101114.
14. Akinribide O. J., Mekgwe G. N., Akinwamide S. O., Gamaoun F., Abeykoon C., Johnson O. T., Olubambi P. A. A review on optical properties and application of transparent ceramics // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. V. 21. P. 712–738. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.027.
15. Al-Fauri A. M., Lafi O. A., Abu-Safe H. H., Abu-Kharma M. Investigation of optical and electrical properties of copper oxide – polyvinyl alcohol nanocomposites for solar cell applications // *Arabian Journal of Chemistry*. 2023. V. 16, Iss. 4. Article number 104535. DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.104535.
16. Negi G. S., Anirbid S., Sivakumar P. Applications of silica and titanium dioxide nanoparticles in enhanced oil recovery: Promises and challenges // *Petroleum Research*. 2021. V. 6, Iss. 3. P. 224–246. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2021.03.001.
17. Zhong G., Xu S., Chen C., Kline D. J., Giroux M., Pei Y., Jiao M., Liu D., Mi R., Xie H., Yang B., Wang C., Zachariah M. R., Hu L. Synthesis of Metal Oxide Nanoparticles by Rapid, High-Temperature 3D Microwave Heating // *Adv Funct Mater*. 2019. V. 29, Iss. 48. Article number 1904282. DOI: 10.1002/adfm.201904282.
18. Aresta M., Dibenedetto A., Angelini A. Catalysis for the valorization of exhaust carbon: From CO₂ to chemicals, materials, and fuels. Technological use of CO₂ // *Chem Rev*. 2014. V. 114, Iss. 3. P. 1709–1742. DOI: 10.1021/CR4002758.
19. Ashford B., Tu X. Non-thermal plasma technology for the conversion of CO₂ // *Curr Opin Green Sustain Chem*. 2017. V. 3. P. 45–49. DOI: 10.1016/J.COAGSC.2016.12.001.
20. Qin Y., Niu G., Wang X., Luo D., Duan Y. Status of CO₂ conversion using microwave plasma // *Journal of CO₂ Utilization*. 2018. V. 28. P. 283–291. DOI: 10.1016/J.JCOU.2018.10.003.
21. Alper E., Orhan O. Y. CO₂ utilization: Developments in conversion processes // *Petroleum*. 2017. V. 3, Iss. 1. P. 109–126. DOI: 10.1016/J.PETLM.2016.11.003.
22. Liu S., Winter L. R., Chen J. G. Review of Plasma-Assisted Catalysis for Selective Generation of Oxygenates from CO₂ and CH₄ // *ACS Catal*. 2020. V. 10, Iss. 4. P. 2855–2871. DOI: 10.1021/ACSCATAL.9B04811.
23. Wang L., Yi Y., Guo H., Tu X. Atmospheric Pressure and Room Temperature Synthesis of Methanol through Plasma-Catalytic Hydrogenation of CO₂ // *ACS Catal*. 2018. V. 8, Iss. 1. P. 90–100. DOI: 10.1021/ACSCATAL.7B02733.
24. Mikhail M., Wang B., Jalain R., Cavadias S., Tatoulian M., Ognier S., Gálvez M. E., da Costa P. Plasma-catalytic hybrid process for CO₂ methanation: optimization of operation parameters, reaction kinetics // *Mechanisms and Catalysis*. 2019. V. 126, Iss. 1. P. 629–643. DOI: 10.1007/S11144-018-1508-8.
25. Sivkov A., Saygash A., Kolganova J., Shanenkov I. Phase analysis study of the copper–aluminum contact pair obtained by plasma dynamic method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014. V. 66, Iss. 1. Article number 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012048.
26. Sivkov A. A., Pak A. Y., Nikitin D. S., Rakhmatullin I. A., Shanenkov I. I. Plasmodynamic synthesis of nanocrystalline structures in the CN system // *Nanotechnologies in Russia*. 2013. V. 8. P. 489–494. DOI: 10.1134/S1995078013040174.
27. Puric J., Dojcinovic I. P., Astashynski V. M., Kuraica M. M., Obradovic B. M. Electric and thermodynamic properties of plasma flows created by

a magnetoplasma compressor // *Plasma Sources Sci Technol.* 2003. V. 13, No. 1. P. 74–84. DOI: 10.1088/0963-0252/13/1/010.

28. Sivkov A., Pak A. Y., Shanenkov I., Shanenkova Y., Prosvirin I. P. Effect of energy on plasmodynamic synthesis product in the carbon-nitrogen system // *Adv. Mater. Res.* 2014. V. 880. P. 36–41. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.36.

29. Koch D., Manzhos S. On the Charge State of Titanium in Titanium Dioxide // *Journal of Physical Chemistry Letters.* 2017. V. 8, Iss. 7. P. 1593–1598. DOI: 10.1021/ACS.JPCLETT.7B00313.

30. Bard A. J., Parsons R., Jordan J. *Standard Potentials in Aqueous Solution // Standard Potentials in Aqueous Solution.* New York, 2017. P. 834. DOI: 10.1201/9780203738764.