УДК 544.034::666.3.015.4 *Оригинальная статья*

Зависимость параметров спекания наноразмерных сложнооксидных порошков от интенсивности генерирования зарядов при синтезе из нитрат-органических прекурсоров

А.А. Остроушко, А.Е. Пермякова, Т.Ю. Жуланова
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620062, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19
alexander.ostroushko@urfu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.102

Аннотация: Изучены параметры процесса спекания компактизированных сложнооксидных порошков на основе манганита лантана-стронция со структурой типа перовскита: температура интенсивного спекания, достигаемая усадка заготовки. Исследованные сложнооксидные образцы были получены в реакциях горения нитрат-органических прекурсоров (так называемый метод горения растворов). В ходе синтеза варьировали состав прекурсоров: природу органического компонента (поливиниловый спирт, поливинилпирролидон, глицин) и его относительное содержание по отношению к стехиометрии реакции горения с образованием в качестве газообразных продуктов паров воды, молекулярного азота и диоксида углерода. При этом в прекурсорах генерировались электрические заряды положительного или отрицательного знака за счет образования и уноса с выделяющимися газами ионизированных молекулярных группировок. Интенсивность данного процесса контролировали при помощи измерителя параметров электростатического поля. Разность потенциалов земля – прекурсор в зависимости от состава исходной композиции составляла от значений, близких к нулевым, до нескольких десятков вольт. При интенсивном генерировании за счет накоплении избыточной поверхностной энергии взаимно отталкивающихся наночастиц сложного оксида температура интенсивного спекания снижалась на 350 градусов по сравнению с таковой (1050°C) для материалов, полученных из прекурсоров с небольшой интенсивностью образования зарядов. Относительная усадка образцов первого типа при этом увеличивалась с 3 до 23%. Установленная корреляция была универсальной и практически не зависела от знака генерируемого заряда.

Ключевые слова: наноразмерные порошки, синтез в реакциях горения нитрат-органических прекурсоров, генерирование зарядов, спекание, сложные оксиды, манганит лантана-стронция.

Остроушко Александр Александрович – д.х.н., профессор, заведующий отделом химического материаловедения, главный научный сотрудник, Институт естественных наук и математики, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Пермякова Анастасия Евгеньевна – аспирант 3 года обучения, кафедра физической и неорганической химии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Жуланова Татьяна Юрьевна – лаборант-исследователь отдела химического материаловедения, Институт естественных наук и математики, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Original paper

Dependence of sintering parameters for nanosized complex oxide powders on intensity of charge generation during synthesis from nitrate-organic precursors

A.A. Ostroushko, A.E. Permyakova, T.Yu. Zhulanova
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.102

Abstract: Parameters of the sintering process for compacted complex oxide powders based on lanthanum strontium manganite with a perovskite-type structure were studied: the temperature of intensive sintering and the achieved shrinkage of the workpiece. The studied complex oxide samples

© А.А. Остроушко, А.Е. Пермякова, Т.Ю. Жуланова, 2026

were obtained in the combustion reactions of nitrate-organic precursors (the so-called solution combustion method). During the synthesis, the composition of the precursors was varied: the nature of the organic component (polyvinyl alcohol, polyvinylpyrrolidone, glycine) and its relative content in relation to the stoichiometry of the combustion reaction with the formation of water vapor, molecular nitrogen and carbon dioxide as gaseous products. At the same time, positive or negative electric charges were generated in the precursors due to the formation and carry-over with the released gases of ionized molecular groups. The intensity of this process was monitored using an electrostatic field meter. The ground-precursor potential difference, depending on the composition of the initial composition, ranged from values close to zero to several tens of volts. With intensive generation due to the accumulation of the excess surface energy of mutually repulsive nanoparticles of the complex oxide, the temperature of intensive sintering decreased by 350 degrees compared to that (1050°C) for materials obtained from precursors with a low intensity of charge formation. The relative shrinkage of samples of the first type increased from 3 to 23%. The established correlation was universal and practically independent of the sign of the generated charge.
Keywords: nanosized powders, synthesis of nitrate-organic precursors in combustion reactions, charge generation, sintering, complex oxides, lanthanum-strontium manganite.

Alexander A. Ostroushko – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Chemical Materials Science, Chief Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, ORCID: 0000-0003-0206-5513
Anastasiya E. Permyakova – 3rd year postgraduate student, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, ORCID: 0009-0004-3194-4626
Tatiana Yu. Zhulanova – Laboratory Research Assistant, Department of Chemical Materials Science, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, ORCID: 0000-0002-8009-4398

Поступила в редакцию/received: 07.04.2026; после рецензирования/revised: 22.04.2026; принята/accepted: 26.04.2026.

1. Введение и объекты исследования

Одним из широко применяемых в настоящее время путей получения полифункциональных сложнооксидных материалов в виде порошков, покрытий является метод, основанный на горении нитрат-органических прекурсоров (Solution Combustion Synthesis – SCS) [1-11]. При этом полученные наноструктурированные порошки часто используются далее в компактизированном виде для формирования керамики с заданными целевыми характеристиками. Существует целый ряд реальных и перспективных областей практического применения подобных материалов. К ним относятся различные аспекты катализа (в том числе, фото-каталитические процессы очистка воды), сенсорная техника, получение магнитных и сегнетоэлектрических сред, компонентов твердоооксидных топливных элементов, биомедицина и т.д. К преимуществам метода SCS относится простота и скорость реализации, возможность синтеза широкого круга материалов и композиций с точки зрения их состава и структурных типов.

Для получения исходных прекурсоров SCS [1-11] чаще всего берут нитраты соответствующих металлических компонентов получаемых сложнооксидных объектов. В качестве органической составляющей прекурсоров выступают как разнообразные низкомолекулярные

соединения, так и полимерные среды в виде растворов или твердых веществ. К первым относятся глицин, глицерин, лимонная кислота, мочевина, сахара; ко второй группе – поливиниловый спирт, поливинилпирролидон, метилцеллюлоза, этиленгликоль, целлюлоза и пр. Иногда в прекурсоры вводят добавки типа нитрата аммония для интенсификации процессов горения. Органические компоненты служат не только как «топливо» в ходе экзотермических окислительно-восстановительных реакций горения с участием нитратов, но и способствуют повышению однородности промежуточных и конечных субстанций за счет процессов комплексообразования, подавляя дробную кристаллизацию солей.

К важным моментам, определяющим свойства получаемых методом SCS наноматериалов, относится обнаруженное явление генерирования в прекурсорах при их нагревании и горении электрических зарядов высокой плотности [12-14]. Заряды формируются за счет удаления с газами в окружающую среду некоторой доли ионизированных молекулярных группировок, имеющих положительный (в частности, NO^+), либо отрицательный (например, H_2O^-, CO_3^-) знак. Разность потенциалов земля – прекурсор, фиксируемая в ходе горения и синтеза оксидных фаз, достигает в некоторых случаях сотен вольт. Указанный эффект оказывает существенное влияние на морфологию получаемых материалов, процессы агрегации возникающих сложнооксидных наночастиц. Наличие значительных по величине зарядов ведет ко взаимному отталкиванию наночастиц и препятствует возникновению их агрегатов, тогда как при отсутствии зарядов частицы могут быть в значительной мере агрегированы [13, 19], что снижает запас избыточной поверхностной энергии. Данный момент находит отражение и в величине удельной поверхности порошков [19]: более развитая поверхность, при близких размерах полученных наночастиц, коррелирует с интенсивностью генерирования зарядов. Интересно, что эта взаимосвязь практически одинакова для сложнооксидных материалов существенно отличающихся по составу и структуре [19].

Ранее мы уже рассматривали [17] аспекты, связанные с формированием керамики в ходе процесса ее спекания, возможности снижения температуры получения керамики, что дает ряд технических и экономических преимуществ. Запасенная поверхностная энергия, как хорошо известно, расходуется в ходе спекания материалов и интенсифицирует его. Важным аспектом формирования керамики в рассматриваемой ситуации является установление связи между наличием и интенсивностью генерирования зарядов (как было сказано выше, мерой ее может служить разность потенциалов земля – прекурсор) и параметрами

спекания: температура интенсивного спекания, достигаемая усадка компактизированного материала. Этим моментам и посвящена настоящая работа.

2. Методы исследования

В ходе исследований в качестве их объекта был взят манганит лантана-стронция (LSM) $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_{3\pm y}$ со структурой перовскита. Данный материал может быть использован в качестве катода твердооксидных топливных элементов [18], он обладает ценными каталитическими и магнитными свойствами [14, 15, 16, 19], в частности, магниторезистивными. Для синтеза LSM в условиях, обеспечивающих получение однофазного продукта [14, 15, 16, 19], готовили прекурсоры на основе водных растворов нитратов лантана $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, стронция $Sr(NO_3)_2$ и марганца $Mn(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ квалификации «ч.д.а.». Помимо этого, прекурсоры содержали органические компоненты: поливиниловый спирт – ПВС (марка 11/2 по ГОСТ 10779-78 с остаточным количеством ацетатных групп не более 2% мас.) и поливинипирролидон – ПВП (молекулярная масса 40000, Sigma Aldrich, PVP40), а также глицин NH_2CH_2COOH и лимонная кислота $C_5H_8O_7 \cdot H_2O$ ЛК (оба «ч.д.а.»). Соотношение количества органического компонента и нитратов, соответствовавшее стехиометрии реакции горения с образованием в качестве газообразных продуктов паров воды, молекулярного азота и диоксида углерода принимали за $\varphi = 1$ (при избытке органического вещества коэффициент $\varphi > 1$).

Прекурсоры высушивали в тонком слое при комнатной температуре на воздухе до получения пленок, которые помещали в фарфоровые чашки и подвергали нагреву до начала самопроизвольного горения на электрической плитке с металлической поверхностью, экранирующей нагревательный элемент. Другим вариантом подвода тепла к прекурсору было использование электрической плитки со спиральным нагревателем и кварцевой поверхностью, что приводило к реализации процессов синтеза под воздействием переменного электромагнитного поля. Генерируемую разность потенциалов земля – прекурсор регистрировали при помощи специального прибора: измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1 (Республика Беларусь). При этом в реакционную среду вводили проволочный электрод из инертного материала и замыкали его на металлический экран, с которого снимали показания прибором с использованием бесконтактного метода. Состав выделяющихся в процессе синтеза газов определяли, используя электронный газоанализатор Testo 350 XL (Германия).

Окончательную термообработку порошков проводили в течение 48

часов при температуре 650°С. Далее порошки компактизировали в прессформах под давлением 1000 кГ/см^2. Для изучения процессов спекания использовали высокотемпературный дилатометр DIL 402 C (NETZSCH, Германия). Детали морфологии полученных образцов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа AURIGA CrossBeam (Уральский центр коллективного пользования «Современные нанотехнологии» УрФУ).

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты по синтезу манганита лантана-стронция $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_{3\pm y}$ в ходе реакций горения нитрат-органических прекурсоров с одновременным измерением разности потенциалов земля – прекурсор позволили установить следующие моменты. В исходных композициях, включающих поливиниловый спирт, генерирование зарядов протекало наиболее интенсивно (см. рис. 1), в частности, по сравнению с прекурсорами, содержащими поливинилпирролидон. В опытах с композициями на основе глицина в изученных условиях возникали лишь минимальные (близкие к нулевым) заряды. Указанные факты связаны с тем, что при использовании в прекурсорах ПВС образуется значительно меньшее количество оксида азота (не более 200 м.д.), способного образовывать положительно заряженные частицы. Азотосодержащие компоненты, такие как ПВП, напротив способствуют выделению в процессе горения большего количества NO: экспериментальные значения в тех же условиях – порядка 2000 м.д. Снижение концентрации оксида азота таким образом смещает процесс генерирования зарядов прекурсоров в данном случае в более положительную область.

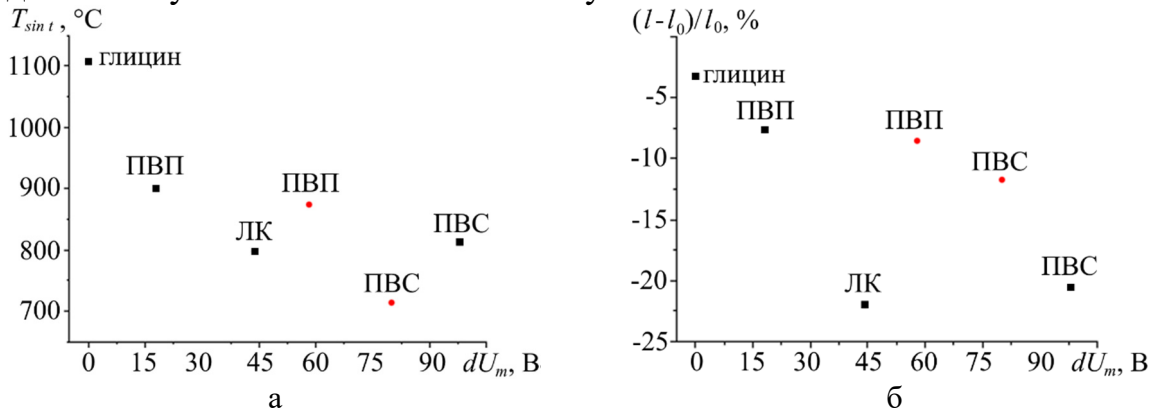


Рис. 1. Зависимость от разности потенциалов земля – прекурсор параметров спекания образцов, синтезированных из прекурсоров с органическими компонентами разной природы: температуры начала интенсивного спекания (а) и максимально достигнутой усадки (б). Черные квадратики – соотношение компонентов соответствует $\varphi = 1$; красные кружочки – $\varphi = 2$.

Полученные результаты, показали, что прекурсоры могут быть

проранжированы по интенсивности генерирования зарядов. Это является достаточно удобным с точки зрения возможности дальнейшего сравнения параметров спекания полученных порошков в компактизированном состоянии. Процесс спекания протекал наиболее интенсивно при различной температуре в зависимости от величины генерируемой разности потенциалов в процессе синтеза сложнооксидных образцов (см. рис. 1, 2). Образцы, имевшие в своей предыстории генерирование значительных по величине зарядов, закономерно обладали существенно более низкой температурой спекания, причем они демонстрировали более существенную усадку. Температура интенсивного спекания различалась при этом на 350 градусов, а усадка (см. рис. 1, 2) имела разницу порядка 20%. Судя по полученным данным экспериментов (см. рис. 1), лишь влияние в процессе синтеза лимонной кислоты на усадку образцов в меньшей мере понятно, что может быть дополнительно исследовано в дальнейшем.

Важно видеть здесь, что полученные относительно параметров спекания результаты практически не зависят от знака генерируемых в прекурсоре зарядов, а связаны главным образом с величиной измеренной разности потенциалов (см. рис. 2). Отрицательный знак зарядов прекурсоров был получен в отсутствие электромагнитного поля, а положительный – при воздействии электромагнитного поля нагревателя электроплитки, что способствовало более интенсивному формированию молекулярных групп, ионизированных дополнительным электроном. В первом случае ответственными за формирование зарядов могли быть, как сказано выше, молекулярные группировки типа NO^+, образующиеся, по-видимому, за счет несинхронного горения прекурсора по его объему с частичной термической деструкцией нитратов. Во втором случае заряд мог формироваться в процессе так называемого «прилипания» эмитируемых наночастицами электронов к молекулам воды или возникновения группировок типа CO_3^-.

Помимо прочего, необходимо указать, что полученная при спекании агрегированных порошков (см. рис. 3) керамика на основе манганита лантана-стронция имела пористость не менее 50% (соответственно, плотность не более 50% относительно рентгенографической). Этот момент важен с точки зрения возможности практического применения такого материала в качестве катодного для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Указанная пористость является близкой к оптимальной и обеспечивает материалу наряду с требуемой электрической проводимостью за счет плотных контактных перешейков между частицами также хороший газообмен [18]. Подобного рода керамика обладает вместе с тем необходимой прочностью. Образовавшиеся относительно более

тонкие контактные перешейки между частицами выдерживают механической воздействие, например, ультразвуковое, по-видимому, за счет способности к пластической деформации, тогда как собственно некоторые частицы могут разрушиться. Так под воздействием поля ультразвукового генератора (Sonics Material, Cole-Parmer, 750 Вт) в течение 3 минут наблюдали указанный эффект (см. рис. 3).

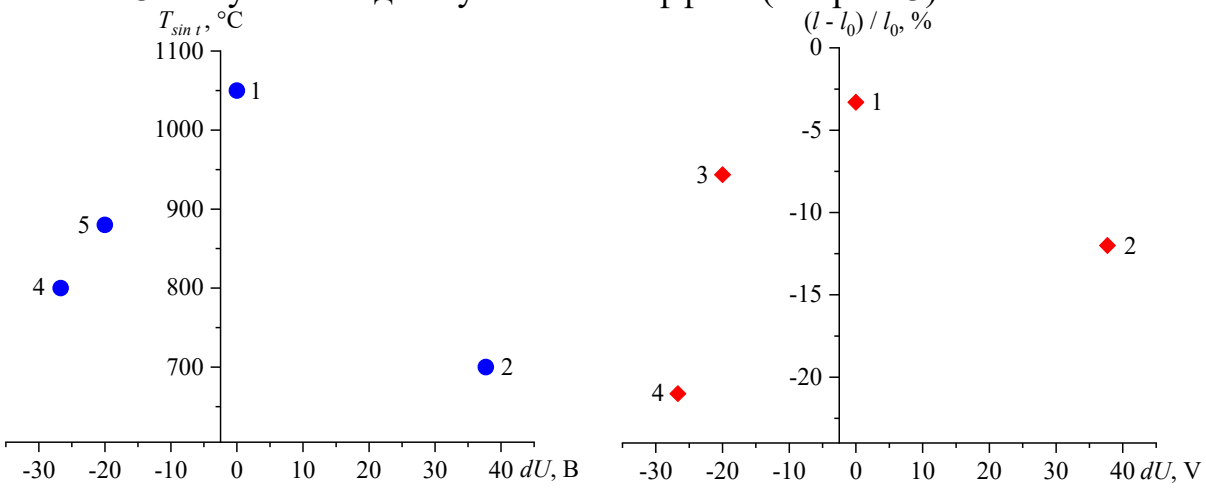
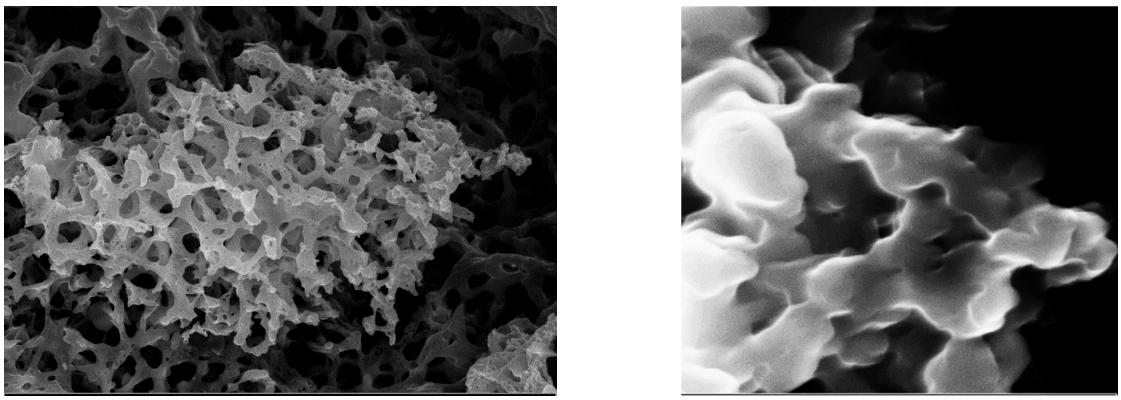


Рис. 2. Температура интенсивного спекания порошков манганита лантана-стронция (а) и достигаемая усадка образцов (б) в зависимости от интенсивности генерирования зарядов в прекурсорах (разности потенциалов земля – прекурсор). Органический компонент: 1 — глицин; 2 – ПВП ($\varphi = 2$); 3 – ПВП ($\varphi = 1$); 4 – ПВС ($\varphi = 2$).



а б

Рис. 3. Агрегированные наночастицы манганита лантана-стронция (а) – увеличение 30000^x, в том числе после механического воздействия (б) – увеличение 43000^x.

Достаточно простой метод регулирования параметров спекания сложнооксидных материалов с учетом генерируемых при синтезе зарядов способен обеспечить ряд позитивных технологических моментов, в частности, при изготовлении рабочих сборок ТОТЭ. С одной стороны, это возможность снижения температуры спекания с экономией энергетических ресурсов. С другой стороны – «подгонка» условий спекания разных по составу и структуре компонентов слоистой композиции друг к другу с реализацией одностадийного цикла ее получения.

4. Заключение

Таким образом, к главным выводам из результатов проведенных исследований можно отнести установление возможности целенаправленного регулирования параметров спекания порошковых компактизированных заготовок для получения сложнооксидной керамики. К указанным параметрам относится температурный интервал интенсивного спекания и достигаемая усадка прессовки. Выбор состава исходных прекурсоров с точки зрения природы и количества органического компонента при синтезе сложных оксидов (в частности, манганита лантана-стронция) в реакциях горения нитрат-органических композиций дает возможность регулировать параметры спекания в широких пределах (на сотни градусов, например, по температуре спекания). Такая возможность связана с процессами генерирования зарядов в ходе горения прекурсоров. Интенсификация генерирования зарядов в свою очередь обеспечивает и интенсификацию процессов спекания за счет взаимного отталкивания наночастиц и накопления поверхностной энергии. Вышеназванные моменты могут быть использованы практически, что относится, например, к технологии экономичного получения слоистых оксидных композиций в одном цикле спекания, в частности, сборок твердооксидных топливных элементов, включая прочные пористые катоды для этих устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема FEUZ-2026-0011).

Библиографический список:

1. **Aruna, S.T.** Combustion synthesis and nanomaterials / S.T. Aruna, A.S. Mukasyan // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2008. – V. 12. – I. 3-4. – P.44-50. DOI: 10.1016/j.cossms.2008.12.002.
2. **Manukyan, K.V.** Solution combustion synthesis of nano-crystalline metallic materials: mechanistic studies / K.V. Manukyan, A, Cross, S. Roslyakov et al. // Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – V. 117. – I. 46. – P. 24417-24427. DOI: 10.1021/jp408260m.
3. **Wen, W.** Nanomaterials via solution combustion synthesis: a step nearer to controllability / W. Wen, J-M. Wu // RSC Advances. – 2014. – V. 4. – I. 101. – P. 58090-58100. DOI: 10.1039/C4RA10145F.
4. **Varma, A.** Solution Combustion Synthesis of Nanoscale Materials / A. Varma, A.S. Mukasyan, A.S. Rogachev, K.V. Manukyan // Chemical Reviews. – 2016. – V. 116. – I. 23. – P. 14493-14586. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00279.
5. **Thoda, O.** Review of recent studies on solution combustion synthesis of nanostructured Catalysts / O. Thoda, G. Xanthopoulou, G. Vekinis, A. Chroneos // Advanced Engineering Materials. – 2018. – V. 20. – I. 8. – Art. № 1800047. – 30 p. DOI: 10.1002/adem.201800047.
6. **Deganello, F.** Solution combustion synthesis, energy and environment: Best parameters for better materials / F. Deganello, A.K. Tyagi // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 2018. – V. 64. – I. 2. – P. 23-61. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2018.03.001.
7. **Novitskaya, E.** A review of solution combustion synthesis: an analysis of parameters controlling powder characteristics / E. Novitskaya, J.P. Kelly, S. Bhaduri, O.A. Graeve // International Materials Reviews. – 2021. – V. 66. – I. 3. – P. 188-214. DOI: 10.1080/09506608.2020.1765603.
8. **Parauha, Y.R.** Prospective of combustion method for preparation of nanomaterials: a challenge / Y.R. Parauha, V. Sahu, S.J. Dhoble // Materials Science and Engineering B. – 2021. – V. 267. – Art. № 115054. – 29 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115054.

9. **Padayatchee, S.** Solution combustion synthesis for various applications: a review of the mixed-fuel approach / S. Padayatchee, H. Ibrahim, H.B. Friedrich et al. // Fluids. – 2025. – V. 10. – I. 4. – Art. № 82. – 24 p. DOI: 10.3390/fluids10040082.
10. **Томина, Е.В.** Синтез наноразмерного феррита кобальта и его каталитические свойства в фентоноподобных процессах / Е.В. Томина, Н.А. Куркин, А.В. Дорошенко // Неорганические материалы. – 2022. – Т. 58. – № 7. – С. 727-732. DOI: 10.31857/S0002337X22070132.
11. **Томина, Е.В.** Влияние метода синтеза на состав, морфологию и каталитические свойства наноразмерного феррита висмута / Е.В. Томина, Н.А. Куркин, И.С. Чередниченко, А.Н. Лукин // Журнал неорганической химии. – 2024. – Т. 69. – № 11. – С. 1522-1534. DOI: 10.31857/S0044457X24110038.
12. **Остроушко, А.А.** Термохимическое генерирование зарядов в полимерно-солевых пленках / А.А. Остроушко, М.Ю. Сенников // Журнал неорганической химии. – 2005. – Т. 50. – № 6. – С. 1024-1026.
13. **Ostroushko, A.A.** Charge generation during the synthesis of doped lanthanum manganites via combustion of organo-inorganic precursors / A.A. Ostroushko, O.V. Russkikh, T.Yu. Maksimchuk // Ceramic International. – 2021. – V. 47. – I. 15. – P. 21905-21914. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.04.208.
14. **Остроушко, А.А.** Изучение генерирования зарядов при синтезе наноразмерных сложных оксидов в реакциях органо-неорганических прекурсоров / А.А. Остроушко, О.В. Русских, И.Д. Гагарин, Е.А. Филонова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 215-222. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.215.
15. **Остроушко, А.А.** Факторы, определяющие термохимическое генерирование зарядов в реакциях горения нитрат-органических прекурсоров материалов на основе манганита лантана и диоксида церия // А.А. Остроушко, Т.Ю. Максимчук, А.Е. Пермякова, О.В. Русских // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67. – № 6. – С. 727-738. DOI: 10.31857/S0044457X22060186.
16. **Russkikh, O.** Synthesis, structure and catalytic activity features of alkali-substituted nanostructured lanthanum manganites / O. Russkikh, A. Permyakova, E. Filonova et al. // Materialia. – 2026. – V. 45. – Art. № 102665. – 28 p. DOI: 10.1016/j.mtla.2026.102665.
17. **Остроушко, А.А.** Влияние наноразмерных добавок на температуру спекания оксида алюминия / А.А. Остроушко, А.И. Вылков, Т.Ю. Жуланова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 799-806. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.799.
18. **Иванов, В.В.** Электрофоретическое формирование тонкопленочного электролита на несущем катоде ТОТЭ / В.В. Иванов, Ю.А. Котов, А.С. Липилин и др. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2008. – № 10 (66). – С. 36-56.
19. **Ostroushko, A.A.** Synthesis of lanthanum manganite powders via combustion reactions: some aspects of the influence of magnetic field and charge generation in precursors on the formation of properties / A.A. Ostroushko, I.D. Gagarin, E.V. Kudyukov et al. // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2023. – Т. 14. – Вып. *5*. – С. 571-583. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-571-583.

References:

1. Aruna S.T., Mukasyan A.S. Combustion synthesis and nanomaterials, *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* 2008, vol. 12, issue 3-4, pp. 44-50. DOI: 10.1016/j.cossms.2008.12.002.
2. Manukyan K.V., Cross A., Roslyakov S. et al. Solution combustion synthesis of nano-crystalline metallic materials: mechanistic studies, *Journal of Physical Chemistry C,* 2013, vol. 117, issue 46, pp. 24417-24427. DOI: 10.1021/jp408260m.
3. Wen W., Wu J-M. Nanomaterials via solution combustion synthesis: a step nearer to controllability, *RSC Advances*, 2014, vol. 4, issue 101, pp. 58090-58100. DOI: 10.1039/C4RA10145F.
4. Varma A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Manukyan K.V. Solution combustion synthesis of nanoscale materials, *Chemical Reviews,* 2016, vol. 11, issue 23, pp. 14493-14586. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00279.
5. Thoda O., Xanthopoulou G., Vekinis G., Chroneos A. Review of Recent Studies on Solution Combustion Synthesis of Nanostructured Catalysts, *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 20, issue 8, art. no. 1800047, 30 p. DOI: 10.1002/adem.201800047.
6. Deganello F., Tyagi A.K. Solution combustion synthesis, energy and environment: Best parameters for better materials, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2018, vol. 64, issue 2, pp. 23-61. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2018.03.001.
7. Novitskaya E., Kelly J.P., Bhaduri S., Graeve O.A. A review of solution combustion synthesis: an analysis of parameters controlling powder characteristics, *International Materials Reviews*, 2021, vol. 66, issue 3, pp. 188-214. DOI: 10.1080/09506608.2020.1765603.
8. Parauha Y.R., Sahu V., Dhoble S.J. Prospective of combustion method for preparation of nanomaterials: a

challenge, *Materials Science and Engineering B*, 2021, vol. 267, art. no. 115054, 29 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115054.
9. Padayatchee S., Ibrahim H., Friedrich H.B. et al. Solution combustion synthesis for various applications: a review of the mixed-fuel approach, *Fluids*, 2025, vol. 10, issue 4, art. no. 82, 24 p. DOI: 10.3390/fluids10040082.
10. Tomina E.V., Kurkin N.A., Doroshenko A.V. Synthesis of nanoparticulate cobalt ferrite and its catalytic properties for fenton-like processes, *Inorganic Materials*, 2022, vol. 58, issue 7, pp. 701-705. DOI: 10.1134/S0020168522070135.
11. Tomina E.V., Kurkin N.A., Cherednichenko I.S., Lukin A.N. The effect of the synthesis method on the composition, morphology, and catalytic properties of nanosized bismuth ferrite, *Russian Journal of Inorganic Chemistry,* 2024, vol. 69, issue 11, pp. 1626-1636. DOI: 10.1134/S0036023624602654.
12. Ostroushko A.A., Sennikov, M.Yu. Thermochemical charge generation in polymer-salt films, *Russian Journal of Inorganic Chemistry,* 2005, vol. 50, issue 6, pp. 933-936.
13. Ostroushko A.A., Russkikh O.V., Maksimchuk T.Yu. Charge generation during the synthesis of doped lanthanum manganites via combustion of organo-inorganic precursors, *Ceramic International*, 2021, vol. 47, issue 15, pp. 21905-21914. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.04.208.
14. Ostroushko A.A., Russkikh O.V., Gagarin I.D., Filonova E.A. Izuchenie generirovaniya zaryadov pri sinteze nanorazmernykh slozhnykh oksidov v reaktsiyakh organo-neorganicheskikh prekursorov [Study of the charge generation in the synthesis of nanosized complex oxides in the combustion reactions of organo-inorganic precursors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 215-222. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.215.
15. Ostroushko A.A., Zhulanova T.Y., Permyakova A.E., Russkikh O.V. Determinative factors for the thermochemical generation of electric charges upon combustion of nitrate–organic precursors for materials based on lanthanum manganite and cerium dioxide, *Russian Journal of Inorganic Chemistry,* 2022, vol. 67, issue 6, pp. 799-809. DOI: 10.1134/S0036023622060171.
16. Russkikh O., Permyakova A., Filonova E. et al. Synthesis, structure and catalytic activity features of alkali-substituted nanostructured lanthanum manganites, *Materialia,* 2026, vol. 45, art. no. 102665, 28 p. DOI: 10.1016/j.mtla.2026.102665.
17. Ostroushko A.A., Vylkov A.I., Zhulanova T.Yu. et al. Vliyanie nanorazmernykh dobavok na temperaturu spekaniya oksida alyuminiya [Influece of nanoscale additives on the sintering temperature of aluminium oxide], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue. 15, pp. 799-806. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.799. (In Russian).
18. Ivanov V.V., Kotov Yu.A., Lipilin A.S. et al. Elektroliticheskoe formirovanie tonkoplionochnogo electrolyta na nesushchem katode TOTE [Electrophoretic formation of electrolyte layer on cathode surface of cathode supported SOFC], *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» [International scientific journal «Alternative Energy and Ecology»]*, 2008, no. 10 (66), pp. 36-50. (In Russian).
19. Ostroushko A.A., Gagarin I.D., Kudyukov E.V. et al. Synthesis of lanthanum manganite powders via combustion reactions: some aspects of the influence of magnetic field and charge generation in precursors on the formation of properties, Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika [*Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics], 2023, vol. 14,* issue 5, pp. 571-583. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-571-583.