



DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84



## Плазменно-электролитное получение порошка оксида титана

Кашапов Р.Н.\* <sup>1</sup>, Кашапов Н.Ф. <sup>1</sup>, Кашапов Л.Н. <sup>1</sup>, Ключев С.В. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

\**Ответственный автор E-mail: kashramiln@gmail.com*

**Аннотация:** работа посвящена исследованию плазменно-электролитного процесса реализуемого в условиях катодной полярности активного металлического электрода и его погружении в электролит для получения микро- и наночастиц оксида титана, а также частиц титана размером до 10 мкм, покрытых оксидом титана. Установлено влияние два режима горения разряда, отличающихся тепловыделением и концентрации раствора электролита на распределение частиц по размерам. Повышение напряжения может приводить к горению разряда в дуговом режиме за счет термоэмиссии электронов и интенсивного нагрева катода-титана. Это в свою очередь приводит к образованию частиц титана размером до 10 мкм, поверхность которых окислена. Установлено что горение разряда в режиме с меньшим тепловыделением приводит к формированию частиц оксида титана размером менее 1 мкм. Данные порошки можно использовать в аддитивном производстве, порошковой металлургии и в качестве добавок в композиционных материалах.

**Ключевые слова:** плазменно-электролитный процесс, электрический разряд, электролит, тепловыделение, наночастицы, титан, оксида титана

**Для цитирования:** Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н., Ключев С.В. Плазменно-электролитное получение порошка оксида титана // Строительные материалы и изделия. 2022. Том 5. № 6. С. 75 – 84. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84

## Plasma electrolyte production of titanium oxide powder

Kashapov R.N.\* <sup>1</sup>, Kashapov N.F. <sup>1</sup>, Kashapov L.N. <sup>1</sup>, Klyuev S.V. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Kazan (Volga Region) Federal University, Russia

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

\*Corresponding author E-mail: kashramiln@gmail.com

---

**Abstract:** the work is devoted to the research of plasma-electrolyte process realized in conditions of cathodic polarity of active metal electrode and its immersion into electrolyte to produce titanium oxide micro- and nanoparticles as well as titanium oxide-coated particles up to 10  $\mu\text{m}$  in size. Two modes of discharge combustion differing in heat generation and concentration of electrolyte solution on particle size distribution were found to influence. Voltage increase can result in discharge combustion in arc mode due to thermal emission of electrons and intensive heating of titanium cathode. This, in its turn, leads to formation of titanium particles up to 10  $\mu\text{m}$  in size, which surface is oxidized. It was found that discharge combustion in the regime with less heat emission leads to formation of titanium oxide particles sized less than 1  $\mu\text{m}$ . These powders can be used in additive manufacturing, powder metallurgy and as additives in composite materials.

**Keywords:** plasma-electrolytic process, electric discharge, electrolyte, heat generation, nanoparticles, titanium, titanium oxide

**Please cite this article as:** Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V. Plasma electrolyte production of titanium oxide powder. Construction Materials and Products. 2022. 5 (6). P. 75 – 84. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84

---

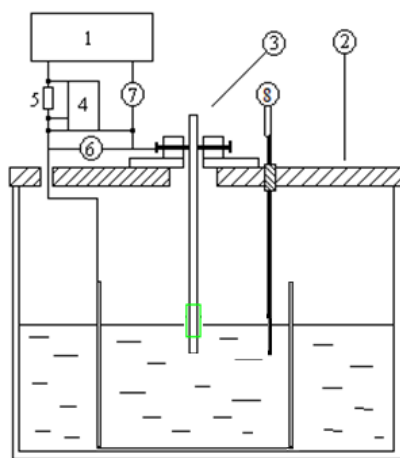
### ВВЕДЕНИЕ

Плазменные технологии являются современным и эффективным методом получения новых материалов. Изучение влияния параметров низкотемпературной плазмы на процессы создания материалов, изменения свойств и модификации поверхности всегда будет являться актуальной задачей. Так и получение новых сорбентов для хроматографических колонок высокоэффективной жидкостной хроматографии может быть реализовано с помощью использования газоразрядных систем. Сорбент выполняет функцию разделения компонентов смеси во времени [1, 2]. Для увеличения диапазона возможностей применения хроматографических колонок, а именно возможности эксплуатации в диапазоне  $\text{pH}=1-14$ , были подобраны такие материалы как оксид титана и оксид циркония [3, 4]. Эффективность работы хроматографической колонки определяется способностью работать при высоких давлениях и наличии большой удельной площади поверхности [5, 6, 7]. Данные условия могут быть достигнуты при использовании частиц имеющих монолитную сердцевину и пористую оболочку [8, 9]. Именно такая конфигурация позволяет частице сорбента не разрушаться при высоком давлении и иметь большую удельную площадь. Одним из эффективных и достаточно простым способом получения частиц порошка (от нанометрового до микронных размеров) является горение разряда с жидкими электродами или же называемого плазменно-электролитным процессом [10]. Помимо получения частиц порошка также можно реализовать модификацию поверхности, нанесение функциональных покрытий, явления полимеризации и разложения химических веществ [11]. Горение разряда может происходить при разных условиях, а именно полярностях активного металлического электрода, на поверхности которого реализуется возникновение низкотемпературной плазмы, формах прикладываемого напряжения и расположения электродов (находятся в контакте с жидкостью или находятся над ней без соприкосновения) [12]. Комбинируя данные вариации можно получать требуемые результаты по обработке и получению материалов. Целью данной работы являлось исследование плазменно-электролитного процесса при получении порошка диоксида титана.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В данной работе получение ультрадисперсного порошка оксида титана предполагалось при использовании в качестве активного электрода, на поверхности которого будет реализовываться горение разряда, – металлического катода, находящегося в погруженном состоянии в раствор электролита. Использование металлического анода не привело бы к формированию частиц порошка, вместо этого наблюдался бы процесс анодного окисления, переходящего в микродуговое окислирование. А как известно микродуговое окислирование предназначено для получения керамических защитных покрытий. Если активный электрод находится над поверхностью электролита, то будет происходить интенсивный нагрев его торцевой поверхности, ее оплавление и отрыв от электрода в виде капли размером в несколько миллиметров [13, 14]. В свою очередь погружение электрода в электролит, позволяет предотвратить интенсивный нагрев торцевой части и производить горение разряда по всей погруженной части металлического катода. Тем самым реализовывать стабильный процесс локального нагрева и оплавления поверхности.

Для исследования процесса плазменно-электролитного получения ультрадисперсного порошка использовалась экспериментальная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из системы электрического питания 1, электролитической ванны – 2, электродной системы – 3, осциллографа – 4, добавочного сопротивления – 5, вольтметра – 6, амперметра – 7, термопары – 8. С помощью электродной системы контролировалась глубина погружения металлического катода в раствор электролита. С помощью осциллографа 4 контролировалась форма подаваемого напряжения и тока, с помощью вольтметра и амперметра измерялись напряжение и ток разряда. Система электрического питания состоит из источника постоянного тока для создания и поддержания горения электрического разряда с плавным регулированием выходного напряжения в диапазоне от 0 – 400 В и тока 0 – 10 А. Измерение напряжения и тока разряда осуществлялось с помощью двух цифровых универсальных измерительных устройств АРРА-305 и АРРА 109N, относительная погрешность измерения составляет 0,8%.



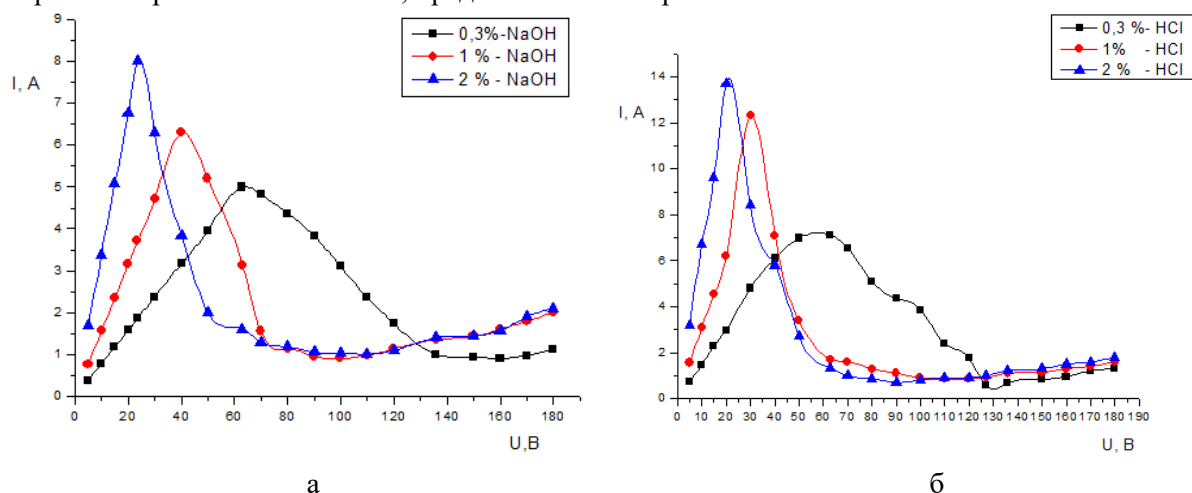
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки  
**Fig. 1.** Schematic diagram of the experimental setup

Горение газового разряда происходит между металлическим катодом, изготовленным из титана марки ВТ-1 и электролитическим анодом. Катод представляет из себя металлический стержень диаметром 1 мм, погруженного в электролит на глубину до 10 мм. В качестве электролитического катода использовались водные растворы HCl и NaOH с концентрацией от 0,3 – 2% по массе.

Получаемый в ходе экспериментов ультрадисперсный порошок оседал на дне электролитической ячейки, а получаемые наночастицы образовывали коллоидный раствор. Осажденный порошок промывался деионизованной водой и высушивался в сушильном шкафу. Для анализа получаемого коллоидного раствора наночастиц использовался анализатор Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd) и УФ-ВИД спектрофотометр Agilent Cary 100.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При постепенном повышении напряжения протекание плазменно-электролитного процесса обусловлено переходом из явления электролиза в состояние горения разряда между металлическим и жидким электродами. В зависимости от концентрации раствора электролита изменяется напряжение зажигания разряда и форма кривой вольтамперной характеристики. При достижении определенных величин напряжения под воздействием низкотемпературной плазмы происходит явление нагрева металлического катода, приводящее к началу процесса получения частиц оксида титана. Параллельно происходит процесс испарения жидкого электрода. Рассмотрим вольтамперные характеристики плазменно-электролитного процесса для двух типов растворов электролита HCl и NaOH, представленные на рис. 2.



**Рис. 2.** Вольтамперные характеристики плазменно-электролитного процесса получения частиц оксида титана в растворах NaOH (а) и HCl (б)  
**Fig. 2.** Voltage-current characteristics of the plasma-electrolyte process of producing titanium oxide particles in NaOH (a) and HCl (b) solutions

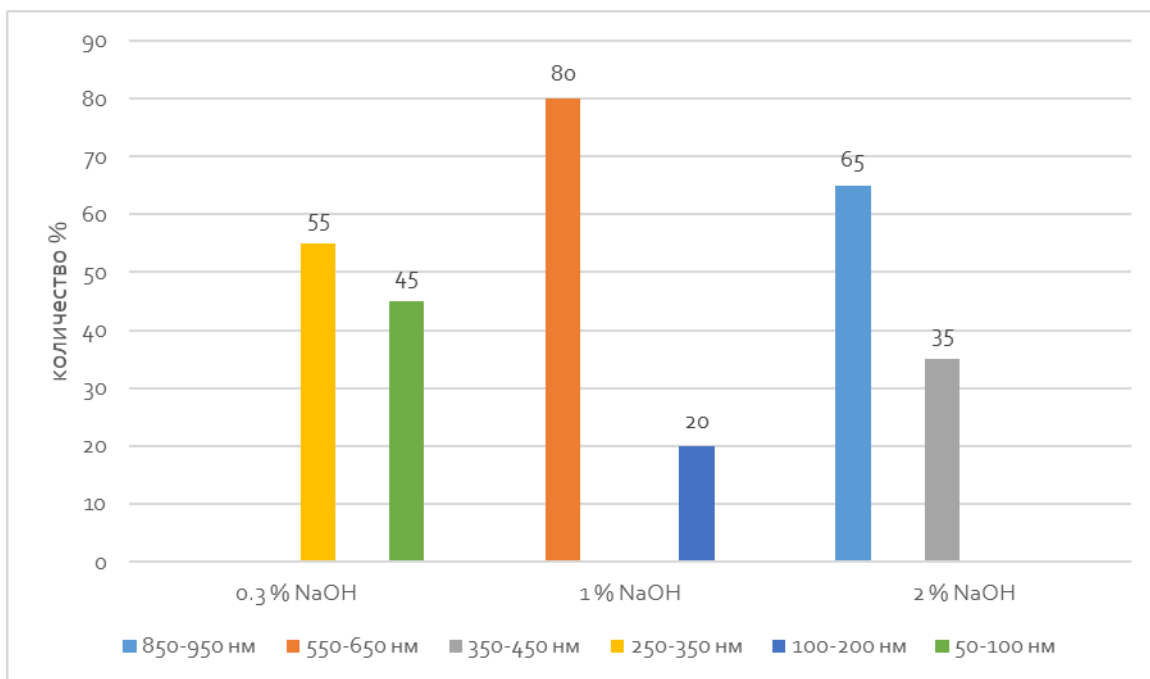
Увеличение концентрации раствора электролита приводит к уменьшению напряжения зажигания разряда, связано это с более высокой плотностью тока для больших концентраций жидкого электрода. Более высокая плотность тока приводит к более интенсивному нагреву и парогазовыделению, что в свою очередь начинает экранировать металлический катод от контакта с раствором. Экранирование электрода приводит к локальному повышению напряженности электрического поля и возможности поджига разряда. Вольтамперную характеристику можно условно разделить на три участка, первый начальный участок связан с протеканием электролиза, на нем мы наблюдаем линейное увеличение силы тока с увеличением напряжения в соответствии с законом Ома. Так как выделение тепла происходит на металлическом катоде, то раствор вблизи его поверхности нагревается до температуры кипения и образуется паросодержащий газовый слой. На кривой ВАХ данный процесс характеризуется падением силы тока. Постепенное повышение напряжения приводит к инициированию горения газового разряда в па-

рогазовой оболочке. Горения разряда начинает развиваться с торцевой части электрода, что объясняется более высокой напряженностью поля в данном месте. Увеличивая прикладываемое напряжение, мы наблюдаем постепенное увеличение зоны горения разряда. Данная область на кривой ВАХ характеризуется малым углом падения кривой и близка к горизонтальному расположению. Дальнейшее увеличение напряжения может привести к более интенсивному горению разряда с изменением свечения плазмы, что на кривой ВАХ отмечается повышением силы тока, это связано с переходом горения разряда из «стационарного» режима в «дуговой» режим за счет возникновения эффекта термоэмиссии. Отличие «стационарного» от «дугового» визуально отличается цветом свечения и намного меньшей его интенсивностью. Для «стационарного» – фиолетовое свечение, для «дугового» – оранжево-желтое. Уменьшение концентрации раствора приводит к смещению максимума ВАХ в область меньших напряжений и уменьшению его величины. Сравнение двух типов электролитов показало, что для раствора кислоты наблюдаются более высокие значения силы тока, что объясняется большей проводимостью раствора. Установлено, что для раствора гидроксида натрия с концентрации 2% образование газопаровой оболочки происходит при 47 В, 1% – 70 В, 0.3% – 140 В. Для растворов соляной кислоты образование парогазовой оболочки происходило для концентрации 2% – 50 В, 1% – 65 В, 0.3% – 130 В. Как было описано выше горение разряда имеет два режима, отличающихся друг от друга спектром излучением и тепловыделением. На примере 1% раствора NaOH переход из начального «стационарного» режима горения разряда в «дуговой» режим происходил при 120 В, для 2% при 108 В и для 0.3% в экспериментах не наблюдалось. В свою очередь изменяя режимы горения разряда можно управлять степенью термического воздействия на титановый электрод и процесс получения частиц оксида титана. На основании проведенных наблюдений были выбраны режимы проведения плазменно-электролитного процесса для получения ультрадисперсных порошков оксида титана, которые представлены в табл. 1.

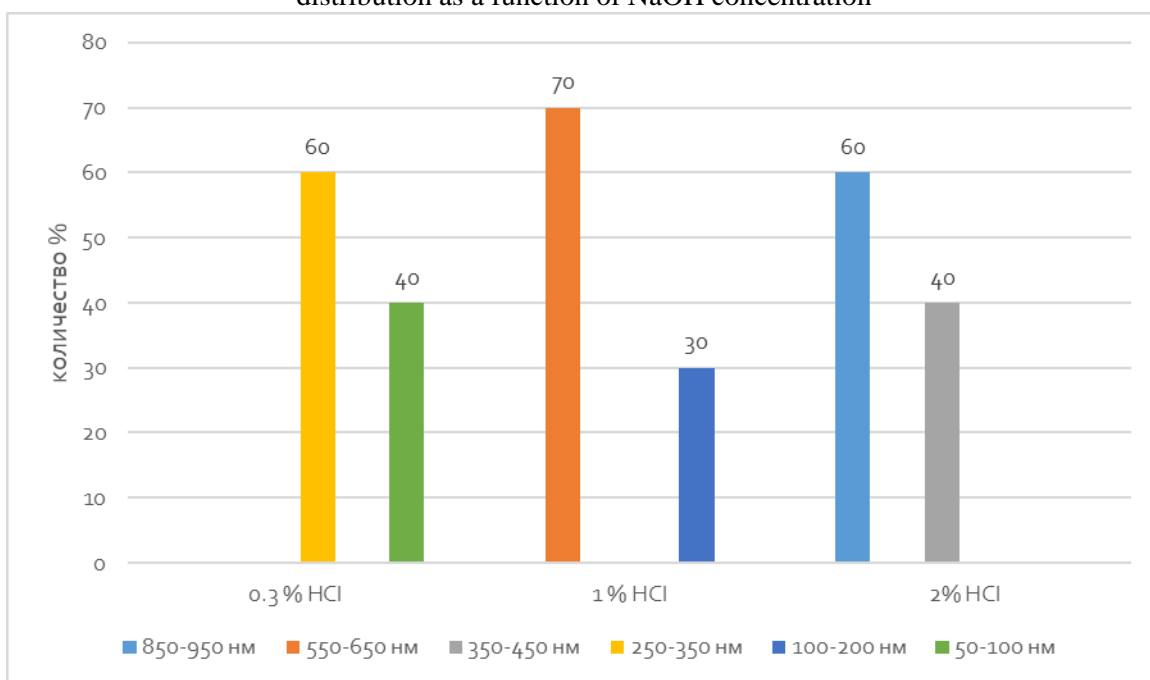
**Таблица 1.** Режимы плазменно-электролитного получения ультрадисперсных порошков оксида титана  
**Table 1.** Modes of plasma-electrolyte production of ultrafine titanium oxide powders

| N | Раствор   | U, В | I, А | P, Вт  | t, сек | Тип режима     |
|---|-----------|------|------|--------|--------|----------------|
| 1 | 0.3% NaOH | 160  | 0.95 | 152    | 600    | «стационарный» |
| 2 | 1% NaOH   | 90   | 1.26 | 113.4  | 600    | «стационарный» |
| 3 | 2% NaOH   | 75   | 1.43 | 107.25 | 600    | «стационарный» |
| 4 | 2% NaOH   | 130  | 1.35 | 175.5  | 180    | «дуговой»      |
| 5 | 0.3% HCl  | 160  | 1.1  | 176    | 600    | «стационарный» |
| 6 | 1% HCl    | 90   | 1.28 | 115.2  | 600    | «стационарный» |
| 7 | 2% HCl    | 75   | 1.51 | 113.25 | 600    | «стационарный» |
| 8 | 2% HCl    | 130  | 1.63 | 211.9  | 180    | «дуговой»      |

Были проведены исследования растворов электролитов, после плазменно-электролитного процесса при разных режимах горения разряда. Которые далее были проанализированы с помощью УФ-ВИД спектрофотометра для обнаружения плазмонного резонанса. Наблюдались пики поглощения 224 нм, 230 нм, 235 нм, подтверждающие наличие наночастиц оксида титана согласно обзору [15]. При дуговом режиме горения разряда наблюдается образование осадка, состоящего из сферического порошка размером менее 10 мкм. Коллоидный раствор очищенный от осадка порошка исследовался с помощью анализатора Zetasizer Nano ZS, полученное распределение частиц по размерам представлено на рис. 3 и 4.



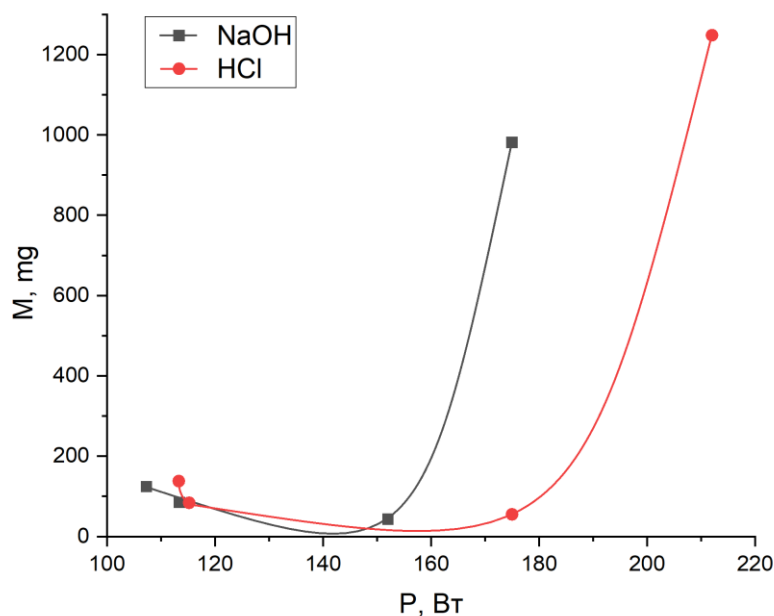
**Рис. 3.** Гистограмма распределения наночастиц оксида титана по размерам в зависимости от концентрации NaOH  
**Fig. 3.** Histogram of titanium oxide nanoparticles size distribution as a function of NaOH concentration



**Рис. 4.** Гистограмма распределения наночастиц оксида титана по размерам в зависимости от концентрации HCl  
**Fig. 4.** Histogram of titanium oxide nanoparticles size distribution as a function of HCl concentration

Установлено, что имеются два пика в распределении частиц, которые смещаются в область меньших значений с уменьшением концентрации электролита. К примеру для раствора гидроксида натрия при концентрации 2% наблюдаем максимальное количество частиц для диапазона размеров 850-950 нм и 350 – 450 нм, а с уменьшением концентрации до 0.3% при 250-350 нм и 50-100 нм.

Интерес представляет величина эрозии титанового электрода, так как по ней косвенно можно судить о количестве образовавшегося ультрадисперсного порошка. На рисунке 5 представлен график зависимости величины износа электрода от используемой мощности разряда. Установлено, что с повышением мощности процесса при протекании «стационарного» режима горения наблюдается уменьшение степени эрозии электрода, что также коррелирует с уменьшением размера частиц порошка. Однако, при реализации «дугового» режима горения наблюдается скачкообразное увеличение степени эрозии, что объясняется уже получением крупных частиц микронного размера.



**Рис. 5.** Зависимость износа титанового электрода от мощности плазменно-электролитного процесса

**Fig. 5.** Dependence of titanium electrode wear on the power of plasma electrolyte process

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что плазменно-электролитный процесс реализуемый в условия катодной полярности активного металлического электрода и его погружении в электролит может быть применен для получения микро- и наночастиц оксида титана, а также частиц титана размером до 10 мкм, покрытых оксидом титана. Установлено, что режим горения разряда существенно влияет на размеры получаемых частиц оксида титана. Выявлено два режима горения, отличающихся тепловыделением. Повышение напряжения может приводить к горению разряда в дуговом режиме за счет термоэмиссии электронов и интенсивного нагрева катода-титана. Это в свою очередь приводит к образованию частиц титана размером до 10 мкм, поверхность которых окислена. Установлено что горение разряда в режиме с меньшим тепловыделением приводит к формированию частиц оксида титана размером менее 1 мкм.

Полученные частицы можно использовать в аддитивном производстве, порошковой металлургии и в качестве добавок в композиционных материалах. Также необходимо их дополнительно исследовать на способность использования в качестве носителя неподвижной фазы колонки высокоэффективной жидкостной хроматографии.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bao B., Wang Z., Thushara D., Liyanage A., Gunawardena S., Yang Z. et al. Recent advances in microfluidics-based chromatography – a mini review // *Separations*. 2021. № 8. P. 3.
- [2] Lopez D.A., Green A., Bell D.S. What is on your HPLC particle? A look at stationary phase chemistry synthesis // *LC/GC North America*. 2020. № 38. P. 488 – 493.
- [3] Fekete S., Murisier A., Losacco G.L., Lawhorn J., Godinho J.M., Ritchie H. et al. Using 1.5 mm internal diameter columns for optimal compatibility with current liquid chromatographic systems // *Journal of Chromatography*. 2021. № 1650. P. 462258.
- [4] Szabolcs F., Erzsébet O., Jenő F. Fast liquid chromatography: The domination of core-shell and very fine particles // *Journal of Chromatography*. March 9, 2012. Vol. 1228. P. 57 – 71.
- [5] Bell D.S. New liquid chromatography columns and accessories // *LC/GC North America*. 2019. № 37. P. 232 – 243.
- [6] Blumberg L.M. Column length is a structure-independent measure of solvent consumption in liquid chromatography // *Journal of Chromatography*. 2022. № 1662. P. 462727.
- [7] Recent developments in LC column technology, Supplement to *LC/GC North America* 38. 2020. № s6.
- [8] Xuan Q.Q.H., Zhang K., Chen X., Ding Y., Feng S., Xu Q. Core-shell silica particles with dendritic pore channels impregnated with zeolite imidazolate framework-8 for high performance liquid chromatography separation // *Journal of Chromatography*. 2017. № 1505. P. 63 – 68.
- [9] Richar Hayes, Adham Ahmed, Tony Edge, Haifei Zhang. Core-shell particles: Preparation, fundamentals and applications in high performance liquid chromatography // *Journal of Chromatography*. 29 August 2014. Vol. 1357. P. 36 – 52.
- [10] Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. Research of the impact acidity of electrolytic cathode on the course of the plasma-electrolytic process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. № 479. Issue 1. P. 012011.
- [11] Denisov D., Kashapov N., Kashapov R. The appearance of shock waves in the plasma electrolytic processing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 26 июнь 2015. № 86. Issue 1. P. 012005.
- [12] Kashapov R., Kashapov N., Kashapov L. Investigations of the growth of the vapor-air shell of a gas discharge with a liquid electrolytic cathode of sodium hydroxide solution // *Journal of Physics Conference Series*. November 2017. № 927 (1). P. 012085.
- [13] Kashapov R., Kashapov N., Kashapov L. Research of plasma-electrolyte discharge in the processes of obtaining metallic powders // *Journal of Physics Conference Series*. November 2017. № 927 (1). P. 012086.
- [14] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. September 2018 // *Journal of Physics D Applied Physics*. № 51 (49).
- [15] Tanabe I., Ozaki Y. Far- and deep-ultraviolet spectroscopic investigations for titanium dioxide: electronic absorption, Rayleigh scattering, and Raman spectroscopy // *J. Mater. Chem. C*. 2016. № 4. P. 7706.

## REFERENCES

- [1] Bao B., Wang Z., Thushara D., Liyanage A., Gunawardena S., Yang Z. et al. Recent advances in microfluidics-based chromatography – a mini review. *Separations*. 2021. 8. P. 3.
- [2] Lopez D.A., Green A., Bell D.S. What is on your HPLC particle? A look at stationary phase chemistry synthesis. *LC.GC North America*. 2020. 38. P. 488 – 493.
- [3] Fekete S., Murisier A., Losacco G.L., Lawhorn J., Godinho J.M., Ritchie H. et al. Using 1.5 mm internal diameter columns for optimal compatibility with current liquid chromatographic systems. *Journal of Chromatography*. 2021. 1650. P. 462258.

- [4] Szabolcs F., Erzsébet O., Jenő F. Fast liquid chromatography: The domination of core-shell and very fine particles. *Journal of Chromatography*. March 9, 2012. 1228. P. 57 – 71.
- [5] Bell D.S. New liquid chromatography columns and accessories. *LC.GC North America*. 2019. 37. P. 232 – 243.
- [6] Blumberg L.M. Column length is a structure-independent measure of solvent consumption in liquid chromatography. *Journal of Chromatography*. 2022. 1662. P. 462727.
- [7] Recent developments in LC column technology, Supplement to *LC.GC North America* 38. 2020. s6.
- [8] Xuan Q.Q.H., Zhang K., Chen X., Ding Y., Feng S., Xu Q. Core-shell silica particles with dendritic pore channels impregnated with zeolite imidazolate framework-8 for high performance liquid chromatography separation. *Journal of Chromatography*. 2017. 1505. P. 63 – 68.
- [9] Richar Hayes, Adham Ahmed, Tony Edge, Haifei Zhang. Core-shell particles: Preparation, fundamentals and applications in high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography*. 29 August 2014. 1357. P. 36 – 52.
- [10] Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. Research of the impact acidity of electrolytic cathode on the course of the plasma-electrolytic process. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. 479 (1). P. 012011.
- [11] Denisov D., Kashapov N., Kashapov R. The appearance of shock waves in the plasma electrolytic processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 26 ijun' 2015. 86 (1). P. 012005.
- [12] Kashapov R., Kashapov N., Kashapov L. Investigations of the growth of the vapor-air shell of a gas discharge with a liquid electrolytic cathode of sodium hydroxide solution. *Journal of Physics Conference Series*. November 2017. 927 (1). P. 012085.
- [13] Kashapov R., Kashapov N., Kashapov L. Research of plasma-electrolyte discharge in the processes of obtaining metallic powders. *Journal of Physics Conference Series*. November 2017. 927 (1). P. 012086.
- [14] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. September 2018. *Journal of Physics D Applied Physics*. 51 (49).
- [15] Tanabe I., Ozaki Y. Far- and deep-ultraviolet spectroscopic investigations for titanium dioxide: electronic absorption, Rayleigh scattering, and Raman spectroscopy. *J. Mater. Chem. C*. 2016. 4. P. 7706.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Кашапов Р.Н.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0003-2174-4394, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5458368660>, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра «Биомедицинской инженерии и управления инновациями», НИЛ Плазмохимическое получение функциональных материалов, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук

**Кашапов Н.Ф.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-1185-4605, <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602262381>, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра «Технической физики и энергетики», заведующий кафедрой, директор Инженерного института, доктор технических наук, профессор

**Кашапов Л.Н.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0001-7893-440X, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5599057050>

**Kashapov R.N.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, tel.+7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0003-2174-4394, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=54583686600>, Kazan (Volga Region) Federal University, Department of "Biomedical Engineering and Innovation Management", Research Laboratory of Plasma Chemical Production of Functional Materials, Leading Research Officer, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.)

**Kashapov N.F.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, tel.+7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-1185-4605, <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602262381>, Kazan (Volga Region) Federal University, Department of "Technical Physics and Power Engineering", Head of Department, Director of Engineering Institute, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor

**Kashapov L.N.**, e-mail: kashramiln@gmail.com, tel.+7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0001-7893-440X, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5599057050>

0, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра «Биомедицинской инженерии и управления инновациями», НИЛ Плазмохимическое получение функциональных материалов, старший научный сотрудник

**Клюев С.В.**, e-mail: Klyuyev@yandex.ru, тел. +7(951) 139-63-27, ORCID ID: 0000-0002-1995-6139, SCOPUS ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212454175>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, ведущий научный сотрудник

70500, Kazan (Volga Region) Federal University, Department of Biomedical Engineering and Innovation Management, Research Laboratory of Plasma Chemical Production of Functional Materials, Senior Research Officer

**Klyuev S.V.**, e-mail: Klyuyev@yandex.ru, tel. +7(951)139-63-27, ORCID ID: 0000-0002-1995-6139, SCOPUS ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212454175>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Leading Research Officer

Поступила в редакцию 14 октября 2022 г.  
Принята в доработанном виде 5 ноября 2022 г.  
Одобрена для публикации 6 декабря 2022 г.

Received: October 14, 2022.  
Revised: November 5, 2022.  
Accepted: December 6, 2022