



Строительные материалы и изделия

Construction Materials and Products

ISSN
2618-7183

journal homepage: <https://bstu-journals.ru>

DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94



Структура и анализ наночастиц аморфного диоксида кремния

Кашапов Н.Ф.¹, Ямалеев М.М.*¹, Лукашкин Л.Н.¹, Гребенщиков Е.А.¹,
Гилев И.Ю.¹, Кашапов Р.Н.¹, Кашапов Л.Н.¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

**Ответственный автор E-mail: m1959@yandex.ru*

Аннотация: одним из наиболее распространенных методов изучения, а также контроля окружающей среды и продуктов производства является метод хроматографии. Основным рабочим элементом, разделяющий компоненты на составляющие, в частности, является порошок диоксида кремния нано и микроразмеров. В то же время порошковые материалы широко применяются и актуальны для порошковых технологий аддитивного построения. Целью работы является изучение структуры и анализ полученных наночастиц аморфного диоксида кремния, удовлетворяющего по своим характеристикам для использования в колонках высокоэффективной жидкостной хроматографии, а также в различных аддитивных технологиях. Проведенные исследования показали, что метод ввода пара воды в плазмохимический реактор установки для получения аморфного диоксида кремния существенно влияет на наличии свободных гидроксильных групп. В инфракрасном спектре продукта, который уловили на расстоянии 2 метра линия 3750 см^{-1} отсутствует. На расстоянии 1 метр интенсивность линии как эталон со 100% значением. При добавлении незначительного количества NaCl в брикет, используемого при распылении, интенсивность упала на 50%. При удалении на 1,5 метра интенсивность составляет 75%. Из этого следует, что в более горячем газе при быстром охлаждении образуются больше гидроксильных групп ОН на поверхности агрегатов, при удалении от реактора т.е. охлажденные выходящего газа ОН групп образуются меньше.

Ключевые слова: жидкостная хроматография, аддитивные технологии, плазмохимический метод, аморфный диоксид кремния, колонка, кремнезем, брикет, реактор, наночастицы, частицы носителя неподвижной фазы

Для цитирования: Кашапов Н.Ф., Ямалеев М.М., Лукашкин Л.Н., Гребенщиков Е.А., Гилев И.Ю. Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н. Структура и анализ наночастиц аморфного диоксида кремния. 2022. Том 5. № 6. С. 85 – 94. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94

Structure and analysis of amorphous silicon dioxide nanoparticles

Kashapov N.F.¹, Yamaleev M.M.*¹, Lukashkin L.N.¹,
Grebenschikov E.A.¹, Gilev I.Yu.¹, Kashapov R.N.¹, Kashapov L.N.¹

¹ Kazan (Volga region) Federal University, Russia

*Corresponding author E-mail: m1959@yandex.ru

Abstract: one of the most common methods of studying as well as controlling the environment and production products is the method of chromatography. The main working element that separates components into components, in particular, is silicon dioxide powder of nano and micro sizes. At the same time powder materials are widely used and relevant for powder technologies of additive construction. The aim of the work is to study the structure and analysis of obtained nanoparticles of amorphous silicon dioxide, satisfying the characteristics for use in high-performance liquid chromatography columns, as well as in various additive technologies. Studies have shown that the method of introducing water vapor in the plasma chemical reactor of the installation for the production of amorphous silica significantly affects the presence of free hydroxyl groups. In the infrared spectrum of the product, which was caught at a distance of 2 meters the line 3750 cm^{-1} is absent. At a distance of 1 meter the intensity of the line as a reference with 100% value. When a small amount of NaCl was added to the briquette used in spraying, the intensity dropped by 50%. When removed 1.5 meters away, the intensity is 75%. It follows that in the hotter gas during rapid cooling more OH hydroxyl groups are formed on the surface of the aggregates, when moving away from the reactor i.e. cooling the outgoing gas OH groups are formed less.

Keywords: liquid chromatography, additive technology, plasma chemical method, amorphous silicon dioxide, column, silica, briquette, reactor, nanoparticles, fixed phase carrier particles

Please cite this article as: Kashapov N.F., Yamaleev M.M., Lukashkin L.N., Grebenshikov E.A., Gilev I.Yu., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Structure and analysis of amorphous silicon dioxide nanoparticles. Construction Materials and Products. 2022. 5 (6). P. 85 – 94. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных методов изучения, а также контроля окружающей среды и продуктов производства является метод хроматографии. Суть метода заключается в разделении во времени и определения веществ, растворенных в подвижной фазе, при прохождении через неподвижную фазу. В методе высокоэффективной жидкостной хроматографии подвижная фаза представляет собой жидкость, которая под большим давлением и за относительно короткое время проходит через неподвижную фазу – сорбент. В качестве стационарной фазы используют колонки или микрожидкостные чипы. [1, 2]. На практике наибольшее распространение имеют колонки, представляющие трубку нержавеющей стали, заполненную неподвижной фазой. Неподвижная фаза имеет два вида исполнения: частицы порошка или цельная пористая структура. Одно из основных требований к частицам – это наличие пористой структуры, поверхность которой имеет химически связанную или физически покрытую активную фазу, используемую для разделения. Обычно оцениваются при сравнении два параметра неподвижной фазы: – химический состав носителя и – химические функциональные возможности,

позволяющие закреплять активную фазу для разделения подвижной фазы. Установлено, что в качестве неподвижной фазы используется диоксид кремния, диоксид кремния с этиленовым или пропиленовым мостиком, гидратированный оксид циркония, гидратированный оксид алюминия, алюмосиликат, пористый графитовый углерод, цеолиты или различные органических полимеры (полистирол сшитый дивинилбензолом, метакрилаты) [3]. Наибольшее распространение получил диоксид кремния. Частицы диоксида кремния представляют пористые сферы размером от 1 до 10 мкм, с пористой структурой от 2 до 50 нм, при этом дополнительно имеются поры размером от 60 до 300 Å.

Также одной из актуальных задач промышленности является получение порошков для аддитивных технологий производства [4-6]. Например, построение микро- и нано изделий путем трехмерной порошковой печати одно из перспективных направлений в области микроэлектроники.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения исследований были использованы следующие типы порошков аморфного диоксида кремния, представленные в табл. 2 работы [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Согласно работе Чукина Д.Г. [9] нанодисперсные порошки диоксида кремния представляют собой очень мелкие кристаллики (кристаллиты) с прикрепленными к поверхности кристаллитов групп ионов OH – к Si как показано на рис. 1, поэтому особое значение приобретает поверхность кристаллитов, отвечающая за образование агломератов из кристаллитов SiO_2 как показано на рисунке 6, которая в свою очередь отвечает за удельную поверхность и реологические свойства нанопорошка диоксида кремния [8, 12, 14, 15]. Известен аэросил 200 производства Orisil с удельной площадью поверхности $200 \text{ м}^2/\text{гр}$. Вязкость одно из основных свойств аморфного пирогенного кремнезёма, это свойство материала поглощать посредством тангенциальной деформации касательное напряжение, зависящие от градиента скорости [8]. Большая вязкость для пирогенного кремнезема нужна как для загустителя при добавлении в жидкость. При этом агрегаты (микрочастицы) кремнезема связываться вместе в цепи посредством водородных связей. Для образования этих связей кислород из гидроксильных групп не должен участвовать в другой водородной связи [8]. OH группы прикреплены к наружной части шарообразных структур (рыхлых кубиков) неорганических полимерных цепей молекул SiO_2 .

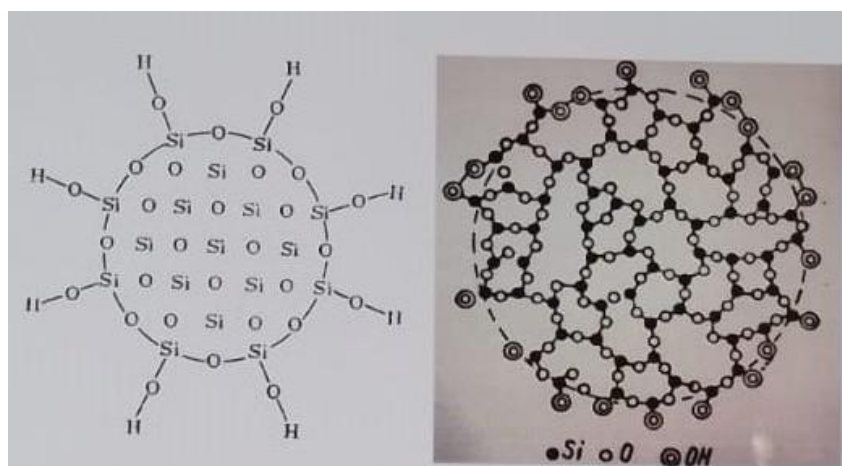


Рис. 1. Нанодисперсные порошки диоксида кремния
Fig. 1. Nanodispersed silicon dioxide powders

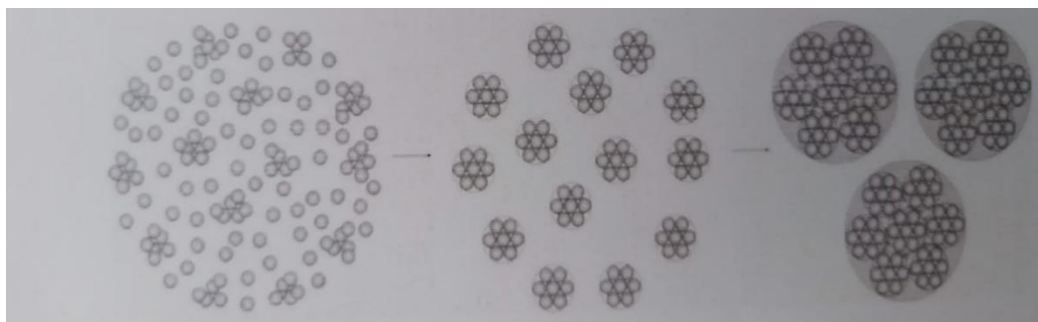


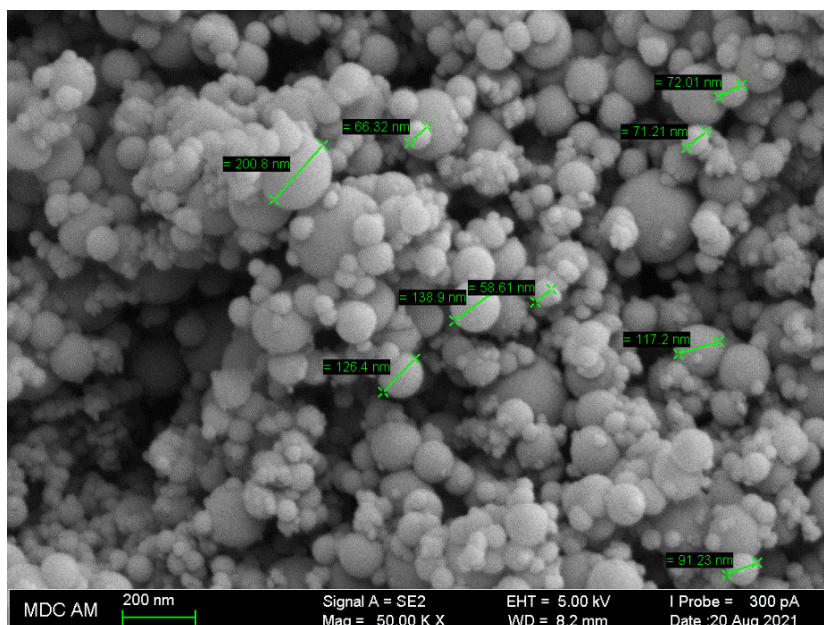
Рис. 2. Схема образования конечных частиц. Первичные частицы 5 – 80 нм объединяются в рыхлые пористые конечные частицы агломераты размером 5 – 140 мкм, с очень большой совокупной удельной поверхностью

Fig. 2. Scheme of formation of final particles. Primary particles of 5 – 80 nm are combined into loose porous final particles agglomerates of 5 – 140 μm , with a very large aggregate specific surface area

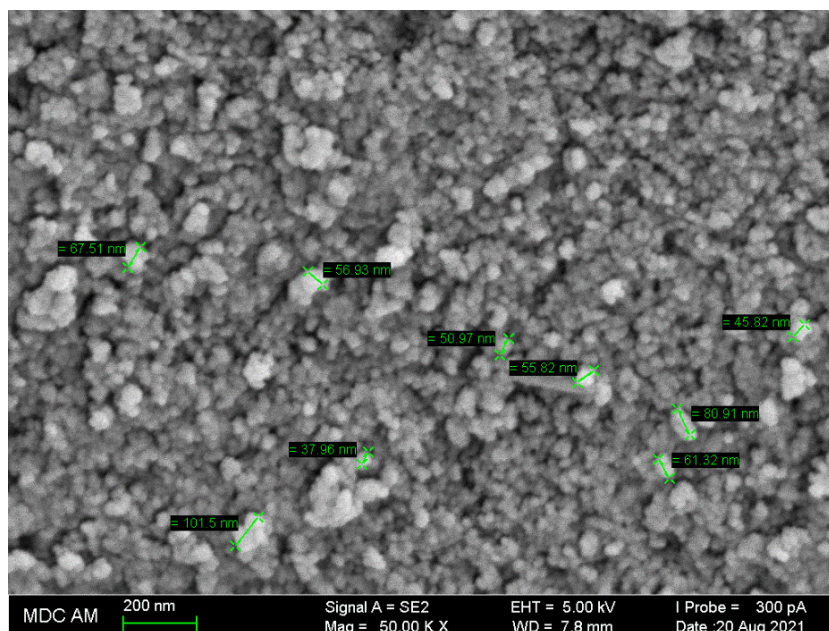
Присутствие в ИК спектре линии 3750 см^{-1} говорит о наличии свободных гидроксильных групп [9]. Задача увеличения вязкости аморфного кремнезема, получаемого плазмохимическим методом, сводится к увеличению свободных гидроксильных групп на поверхности агрегатов. На увеличение количества свободных ОН групп влияет условие охлаждения выходящего раскаленного газа SiO, возможно ионов Si^+ и O^+ [10, 11, 13, 14, 15]. Для быстрого охлаждения выходящего газа в трубу выходящую из реактора через одну форсунку на расстоянии 150 мм от реактора вдувался водяной пар с воздухом. ИК-спектроскопия показала, что интенсивность 3750 см^{-1} линии менялась в зависимости от расстояния выхода из реактора газа SiO₂. На основании немногочисленных данных просматривается закономерность чем больше расстояние выхода раскаленного газа из реактора, тем меньше свободных гидроксильных групп ОН. В ИК спектре продукта, который уловили на расстоянии 2 метра линия 3750 см^{-1} отсутствует. На расстоянии 1 метр интенсивность линии как эталон со 100% значением. При добавлении незначительного количества NaCl в брикет, интенсивность упала на 50%. При удалении на 1,5 метра интенсивность составляет 75%.

По этим наблюдениям можно заключить следующее: в более горячем газе при быстром охлаждении образуются больше гидроксильных групп ОН на поверхности агрегатов, при удалении от реактора т.е. охлаждение выходящего газа ОН групп образуются меньше. Интенсивность линии 3750 см^{-1} , также отображает удельную поверхность, чем интенсивнее линии, тем она больше.

Величина удельной поверхности (по сути размер первичных частиц) определяется на стадии конденсации монооксида кремния из газовой фазы. Дальнейшее его окисление мало влияет на рост частиц. Минимальный размер первичных частиц, который удалось получить в ходе экспериментов 30-40 нм, что соответствует удельной поверхности 50-80 $\text{м}^2/\text{г}$. Для достижения удельной поверхности 200 $\text{м}^2/\text{г}$ необходимо добиться размера первичных частиц 12 нм. На рисунке 7 представлены СЭМ-изображения полученного порошка (рис. 3а) и аэросила 200, производства Orisil (рис. 3б). На основе данных изображений установлено, что аэросил 200 имеет более мелкий размер частиц.



3a



3б

Рис. 3. а – полученный аморфный диоксид кремния, б – аэросил производство Orisil
Fig. 3. a – obtained amorphous silicon dioxide, b – aerosil produced by Orisil

Вязкость, как важная характеристика коммерческого продукта (тиксотропность и псевдопластичность) [8, 12]. Эти свойства мало зависят от удельной поверхности и в основном определяются химией поверхности частиц – концентрацией и типом ОН групп прикрепленных к поверхности частиц диоксида кремния. При классическом способе производства диоксида кремния эти группы образуются в большом количестве, вследствие природы самого процесса. При плазмохимическом способе производства ОН группы образуются в минимальном количестве и необходимо разработать и исследовать приемы химической модификации поверхности частиц. Это и будет дальнейшим этапом исследований после достижения заданной величины удельной поверхности.

Различные спектральные характеристики хорошо видны при сравнении ИК спектров аэросила 200 производства Orisil (рис. 4) и нескольких экспериментальных продуктов (рис.5), полученных в работе [7]. Вязкость обусловлена наличием ОН групп где ОН деформационные колебания на длине волны 3747 см^{-1} .

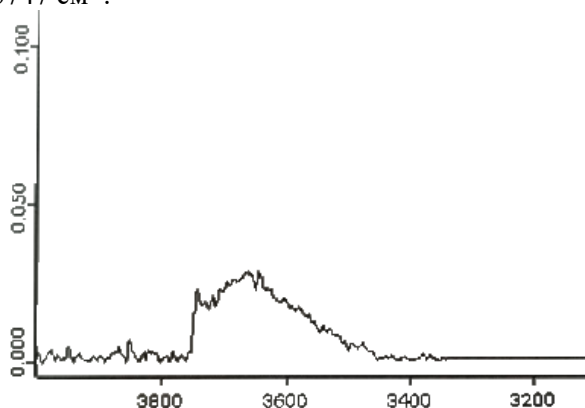


Рис. 4. Аэросил производства Orisil. Удельная поверхность $180 \text{ м}^2/\text{гр}$
Fig. 4. Aerosil manufactured by Orisil. Specific surface area $180 \text{ м}^2/\text{g}$

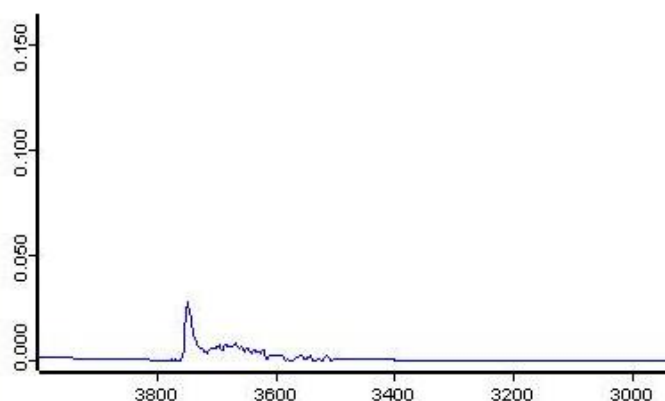


Рис. 5а. Соответствует аморфному кремнезему, имеющему удельную площадь поверхности $85,3 \text{ м}^2/\text{гр}$ [7]. Конденсировали на расстоянии 1 метр
Fig. 5a. Corresponds to amorphous silica, which has a specific surface area of $85.3 \text{ м}^2/\text{g}$ [7]. Condensed at a distance of 1 meter

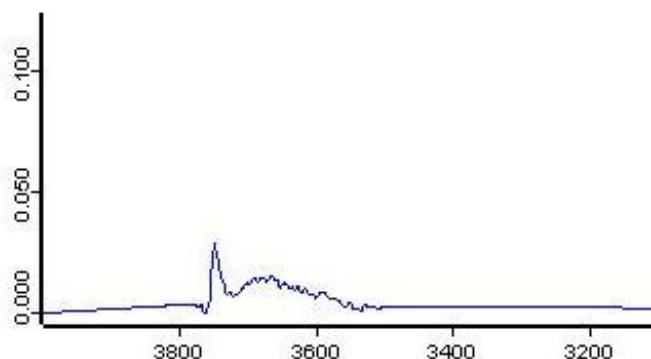


Рис. 5б. Соответствует аморфному кремнезему, имеющему удельную площадь поверхности $64,4 \text{ м}^2/\text{гр}$ [7]. Конденсировали на расстоянии 1 метр
Fig. 5b. Corresponds to amorphous silica, which has a specific surface area of $64.4 \text{ м}^2/\text{g}$ [7]. Condensed at a distance of 1 meter

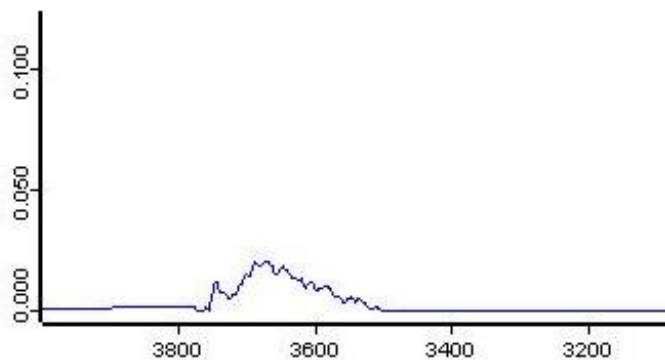


Рис. 5в. Соответствует аморфному кремнезему, имеющему удельную площадь поверхности $27,5 \text{ м}^2/\text{гр}$ [7]. Конденсировали на расстоянии 1 метр
Fig. 5c. Corresponds to amorphous silica, which has a specific surface area of $27.5 \text{ м}^2/\text{g}$ [7]. Condensed at a distance of 1 meter

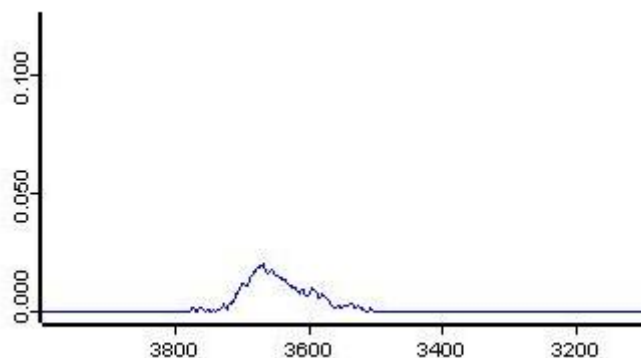
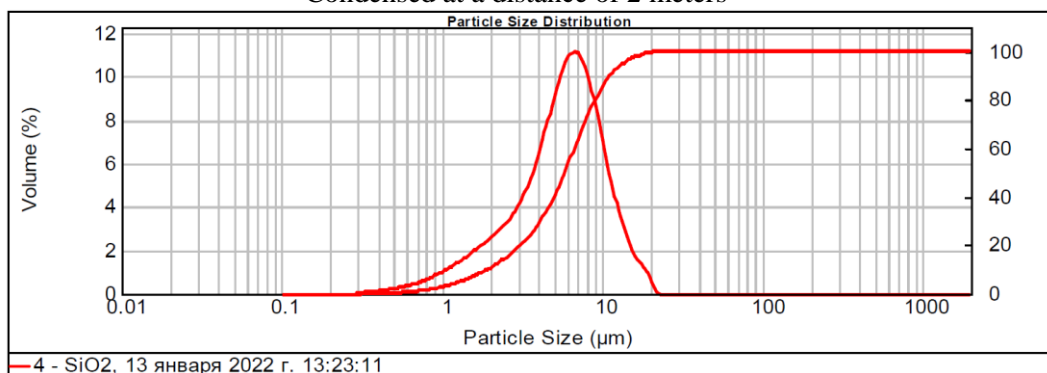


Рис. 5г. Соответствует аморфному кремнезему, имеющему удельную площадь поверхности $36,1 \text{ м}^2/\text{гр}$ [7]. Конденсировали на расстоянии 2 метра
Fig. 5d. Corresponds to amorphous silica, which has a specific surface area of $36.1 \text{ м}^2/\text{g}$ [7]. Condensed at a distance of 2 meters



Заметки оператора:

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.100	2.95	10.000	14.07	40.000	0.00	150.000	0.00	500.000	0.00
1.000	37.39	20.000	0.18	50.000	0.00	200.000	0.00	1000.000	0.00
5.000	45.41	30.000	0.00	100.000	0.00	250.000	0.00	2000.000	0.00
10.000		40.000	0.00	150.000	0.00	500.000	0.00		

Рис. 6. Гранулометрический анализ для порошка, полученного при режиме соответствующему аморфному кремнезему, имеющему удельную площадь поверхности $85,3 \text{ м}^2/\text{гр}$ [7]
Fig. 6. Granulometric analysis for the powder obtained under the regime corresponding to amorphous silica having a specific surface area of $85.3 \text{ м}^2/\text{g}$ [7]

ВЫВОДЫ

Установлено, что метод ввода пара воды в плазмохимический реактор существенно влияет на наличии свободных гидроксильных групп. В ИК спектре продукта, который уловили на расстоянии 2 метра линия 3750 см^{-1} отсутствует. На расстоянии 1 метр интенсивность линии как эталон со 100% значением. При добавлении незначительного количества NaCl в брикет, интенсивность упала на 50%. При удалении на 1,5 метра интенсивность составляет 75%.

По этим наблюдениям можно заключить следующее: в более горячем газе при быстром охлаждении образуются больше гидроксильных групп OH на поверхности агрегатов, при удалении от реактора т.е. охлаждение выходящего газа OH групп образуются меньше.

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] Recent developments in LC column technology // LCGC Supplements, Special Issues-06-01-2018. Vol. 36. Issue 6.
- [2] Fekete S., Murisier A., Losacco G.L., Lawhorn J., Godinho J.M., Ritchie H. Using 1.5 mm internal diameter columns for optimal compatibility with current liquid chromatographic systems // Journal of Chromatography A. 2021. № 1650. P. 462258.
- [3] New chromatography columns and accessories for 2018. Bell DS. LCGC Supplements, Special Issues-06-01-2018. Vol. 36. Issue 6. P. 234 – 247.
- [4] Lyakhovich A.M., Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N. Modifying surface properties of polyamide powders for selective laser sintering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012066.
- [5] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Tom 51. № 49. P. 494003.
- [6] Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F Formation of cracks in the selective laser melting of objects from powdered stainless steel 17-4 PH // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. P. 012074.
- [7] Кашапов Н.Ф., Ямалеев М.М., Лукашкин Л.Н., Гребенщиков Е.А., Гилев И.Ю., Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н. Плазменная технология получения аморфного диоксида кремния // Строительные материалы и изделия. 2022. Том 5. № 5. С. 80 – 90.
- [8] Pristavita R., Munz R.J., Addona T. Transferred Arc Production of Fumed Silica: Rheological Properties // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008. Vol. 47. № 17. P. 6790 – 6795.
- [9] Чукин Г.Д. «Химия поверхности и строения дисперсного кремнезема»: монография. Москва, 2008.
- [10] Munz R.J., Addona T. Thermal plasma production of fumed silica: The effect of quench conditions on thickening and thixotropic ability // Can. J. Chem. Eng. 1994. Vol. 72. P. 476 – 483.
- [11] Munz R.J., Addona T., da Cruz A.-C. Application of transferred arcs to the production of nanoparticles // Pure and Applied Chemistry. 1999. Vol. 71. № 10. P. 1889 – 1897.
- [12] Meunier J.L., Mendoza-Gonzalez N.Y., Pristavita R. Two-Dimensional Geometry Control of Graphene Nanoflakes Produced by Thermal Plasma for Catalyst Applications // Plasma Chem Plasma Process. 2014. Vol. 34. P. 505 – 521.
- [13] Kim G.E., Brochu M., Moran A., Addona T. Enhanced TBC performance with nanostructured bond coats // Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2009. P. 397 – 402.

- [14] Balabanova E. Silica nanoparticles produced by thermal arc plasma. Modelling // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2003. Vol. 5. № 3. P. 679 – 686
- [15] Balabanova E. Emilia BALABANOVA Synthesis of nanostructured materials by means of thermal plasma. Modelling of the processes // Revue Roumaine de Chimie. 2008. Vol. 53. № 2. P. 83 – 100.

REFERENCES

- [1] Recent developments in LC column technology. LCGC Supplements, Special Issues-06-01-2018. 36 (6).
- [2] Fekete S., Murisier A., Losacco G.L., Lawhorn J., Godinho J.M., Ritchie H. Using 1.5 mm internal diameter columns for optimal compatibility with current liquid chromatographic systems. Journal of Chromatography A. 2021. 1650. P. 462258.
- [3] New chromatography columns and accessories for 2018. Bell DS. LCGC Supplements, Special Issues-06-01-2018. Vol. (6). P. 234 – 247.
- [4] Lyakhovich A.M., Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N. Modifying surface properties of polyamide powders for selective laser sintering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012066.
- [5] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. 51 (49). P. 494003.
- [6] Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F Formation of cracks in the selective laser melting of objects from powdered stainless steel 17-4 PH. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. P. 012074.
- [7] Kashapov N.F., Yamaleev M.M., Lukashkin L.N., Grebenshikov E.A., Gilev I.Yu., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Development of a plasma-chemical method for producing amorphous silicon dioxide nanoparticles. Construction Materials and Products. 2022. 5 (5). P. 80 – 90. (rus.)
- [8] Pristavita R., Munz R.J., Addona T. Transferred Arc Production of Fumed Silica: Rheological Properties. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008. 47 (17). P. 6790 – 6795.
- [9] Chukin G.D. “Chemistry of the surface and structure of dispersed silica”: monograph. Moscow, 2008. (rus.)
- [10] Munz R.J., Addona T. Thermal plasma production of fumed silica: The effect of quench conditions on thickening and thixotropic ability. Can. J. Chem. Eng. 1994. 72. P. 476 – 483.
- [11] Munz R.J., Addona T., da Cruz A.-C. Application of transferred arcs to the production of nanoparticles. Pure and Applied Chemistry. 1999. 71 (10). P. 1889 – 1897.
- [12] Meunier J.L., Mendoza-Gonzalez N.Y., Pristavita R. Two-Dimensional Geometry Control of Graphene Nanoflakes Produced by Thermal Plasma for Catalyst Applications. Plasma Chem Plasma Process. 2014. 34. P. 505 – 521.
- [13] Kim G.E., Brochu M., Moran A., Addona T. Enhanced TBC performance with nanostructured bond coats. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2009. P. 397 – 402.
- [14] Balabanova E. Silica nanoparticles produced by thermal arc plasma. Modelling. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2003. 5 (3). P. 679 – 686
- [15] Balabanova E. Emilia BALABANOVA Synthesis of nanostructured materials by means of thermal plasma. Modelling of the processes. Revue Roumaine de Chimie. 2008. 53 (2). P. 83 – 100.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Кашапов Н.Ф., e-mail: m1959@yandex.ru, 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

Ямалеев М.М., e-mail: m1959@yandex.ru, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-3751-9573 Казанский (Приволжский) федеральный университет, кандидат физико-математические науки, доцент

Лукашкин Л.Н., e-mail: m1959@yandex.ru, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-8298-3906, Казанский (Приволжский) федеральный университет, лаборант

Гребенщиков Е.А., e-mail: m1959@yandex.ru, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-2091-5342, Казанский (Приволжский) федеральный университет, лаборант

Гилев И.Ю., e-mail: m1959@yandex.ru, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-9983-7227, Казанский (Приволжский) федеральный университет, лаборант

Кашапов Р.Н., e-mail: m1959@yandex.ru, 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 Л.Н., e-mail: m1959@yandex.ru, тел. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0001-7893-440X, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5599057050>, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра «Биомедицинской инженерии и управления инновациями», НИЛ Плазмохимическое получение функциональных материалов, старший научный сотрудник

Поступила в редакцию 18 октября 2022 г.
Принята в доработанном виде 12 ноября 2022 г.
Одобрена для публикации 19 декабря 2022 г.

Kashapov N.F., e-mail: m1959@yandex.ru, 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

Yamaleev M.M., e-mail: m1959@yandex.ru, tel. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-3751-9573, Kazan (Volga Region) Federal University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Lukashkin L.N., e-mail: m1959@yandex.ru, tel. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-8298-3906, Kazan (Volga Region) Federal University, Laboratory Assistant

Grebenshchikov E.A., e-mail: m1959@yandex.ru, tel. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-2091-5342, Kazan (Volga Region) Federal University, Laboratory Assistant

Gilev I.Yu., e-mail: m1959@yandex.ru, tel. +7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-9983-7227, Kazan (Volga Region) Federal University, Laboratory Assistant

Kashapov R.N., e-mail: m1959@yandex.ru, tel.+7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0003-2174-4394, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5458368660>, 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 L.N., e-mail: m1959@yandex.ru, tel.+7(843) 233-75-76, ORCID ID: 0000-0001-7893-440X, SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=5599057050>, Kazan (Volga Region) Federal University, Department of Biomedical Engineering and Innovation Management, Research Laboratory of Plasma Chemical Production of Functional Materials, Senior Research Officer

Received: October 18, 2022.
Revised: November 12, 2022.
Accepted: December 19, 2022.