



Научная статья
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 54.052
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.026

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Елизавета Сергеевна Кутищева ¹, Ирина Олеговна Усольцева ²,
Юрий Владимирович Передерин ³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ ekutishcheva123@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7635-7677>

² iou2@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4861-6467>

³ perederin@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5312-7211>

Аннотация. В статье представлен анализ методов получения диоксида кремния жидкофазными (золь-гель) и газофазными (пиролиз и плазмохимические) методами. Рассмотрены технологии получения диоксида кремния различной формы: осажженный (белая сажа) и пирогенный (аэросил). Приведены примеры использования технологий в промышленности. Методы исследования включали в себя все доступные источники информации: патентные базы РФ, электронные источники РИНЦ. Переработанные промышленные отходы и побочные продукты, содержащий кремний, являются одними из богатых источников диоксида кремния. Показано, что первоначальные технологии получения диоксида кремния требуют модификации для устранения недостатков и повышения качества продукта. По сравнению с первоначальными разработками существенно увеличилось разнообразие сырьевых источников, модифицировались способы путем добавлений стадий (например, карбонизация в жидкофазном методе) и исключения энергозатратных. Можно сделать вывод, что в дальнейшем, ввиду с широкой сферой применения (химическая, строительная, пищевая, фармацевтическая и другие виды промышленности), технологии потребуют создания новых способов извлечения и отделения диоксида кремния из вторичного кремнийсодержащего сырья.

Ключевые слова: кремнезем, диоксид кремния, белая сажа, аэросил, осажженный диоксид кремния, пирогенный диоксид кремния.

Для цитирования: Кутищева Е. С., Усольцева И. О., Передерин Ю. В. Способы получения высокодисперсного диоксида кремния // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 188–193. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.026.

Original article

METHODS FOR PRODUCING HIGH-DISPERSION SILICON DIOXIDE

Elizaveta S. Kutishcheva ¹, Irina O. Usoltseva ², Yuri V. Perederin ³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ ekutishcheva123@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7635-7677>

² iou2@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4861-6467>

³ perederin@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5312-7211>

Abstract. The article presents an analysis of methods for obtaining silicon dioxide by liquid-phase (sol-gel) and gas-phase (pyrolysis and plasma-chemical) methods. Technologies for producing silicon dioxide of various forms are considered: precipitated (white soot) and pyrogenic (aerosil). Examples of the use of technologies in industry are given. The research methods included all available sources of information: patent databases of the Russian Federation, electronic sources of the RSCI. Recycled industrial waste and silicon-containing by-products are some of the richest sources of silicon dioxide. It

© Кутищева Е. С., Усольцева И. О., Передерин Ю. В., 2021

has been shown that the initial technologies for the production of silicon dioxide require modification to eliminate disadvantages and improve the quality of the product. Compared with the initial developments, the variety of raw materials has increased significantly, the methods have been modified by adding stages (for example, carbonization in the liquid-phase method) and eliminating energy-intensive ones. It can be concluded that in the future, in view of the wide scope of application (chemical, construction, food, pharmaceutical and other types of industry) technologies will require the creation of new methods for the extraction and separation of silicon dioxide from secondary silicon-containing raw materials.

Keywords: *silica, silica, silica white, aerosil, precipitated silica, fumed silica.*

For citation: Kutishcheva, E. S., Usoltseva, I. O. & Perederin, Yu. V. (2021). Methods for producing high-dispersion silicon dioxide. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 188-193. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.026.

ВВЕДЕНИЕ

Диоксид кремния является одним из наиболее важных и востребованных соединений кремния. Формула диоксида кремния SiO_2 (оксид кремния (IV), кремнезём) представляет собой бесцветные кристаллы, обладающие высокой твердостью и прочностью. В процессе изучения его физических и химических свойств данный оксид применялся для изготовления строительных материалов, но по мере исследования стали известны и другие области применения. В настоящее время кроме его природных форм существует множество синтетических, получаемых в химической промышленности. Синтетический кремнезём получают осаждением из раствора силиката натрия (осажденный диоксид кремния и силикагель) и пламенным гидролизом летучих кремнийсодержащих веществ (пирогенный диоксид кремния). Исходным компонентом для выработки синтетического диоксида кремния является кремнийсодержащее сырьё (песок (кварц), силикаты металлов, галогениды кремния и т. д.) [1]. Аморфный непористый диоксид кремния используется в пищевой промышленности в качестве вспомогательного вещества E551, препятствующего слеживанию и комкованию, в фармацевтической промышленности – в качестве вспомогательного вещества, а также пищевой добавки или лекарственного препарата. Диоксид кремния применяют в производстве стекла, керамики, абразивов, бетонных изделий, для получения кремния, как наполнитель в производстве резин, при производстве кремнезёмистых огнеупоров, в хроматографии и др. Кристаллы кварца обладают пьезоэлектрическими свойствами и поэтому используются в радиотехнике, ультразвуковых установках, в зажигалках. Искусственно полученные плёнки диоксида кремния используются в качестве изолятора при производстве микросхем и других электронных компонентов. Также используется для производства волоконно-оптических

кабелей. Кремнезёмная нить находит применение в нагревательных элементах электронных сигарет, так как хорошо впитывает жидкость и не разрушается под нагревом спирали. В микроэлектронике диоксид кремния является одним из основных материалов. Его применяют в качестве изолирующего слоя, а также в качестве защитного покрытия [2].

В зависимости от способа получения определяется и конечное свойство продукта: размер и форма частиц, наличие или отсутствие пор на поверхности, свойства поверхности и т. д. В данном исследовании рассматриваются только два вида диоксида кремния – осажденный (белая сажа) и пирогенный (аэросил, орисил). На рынке осажденный диоксид кремния выпускается в России, пирогенный кремний производится в Украине, Германии и других европейских странах. «Аэросил», «Белая сажа», «Орисил» – одни из торговых наименований высокодисперсного диоксида кремния [3]. Высокодисперсный диоксид кремния – белый, аморфный, непористый порошок высокой огнеупорностью. Имеет высокую дисперсность (диаметр частиц 1–100 нм, имеют почти сферическую форму ядра).

Белая сажа представляет собой диоксид кремния, который получается осаждением из раствора силиката натрия (жидкого стекла) кислотой, причем соляной в РФ и серной за рубежом, с последующей фильтрацией, промывкой и сушкой. Химическая формула вещества – $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Белая сажа – активный минеральный наполнитель, используемый в шинной, резинотехнической, химической и других отраслях промышленности [4].

Коллоидный диоксид кремния SiO_2 представляет собой очень легкий порошок с выраженными адсорбционными свойствами. Химическое название коллоидного диоксида кремния – пирогенная двуокись кремния. Пирогенная двуокись кремния выпускается под торговыми названиями Аэросил, HDK, Орисил, Асил, Осил. Диоксид кремния (Аэросил) получают способом взаимодействия газообразного

четырёххлористого кремния с парами воды. Немодифицированные пирогенные кремнеземы типа аэросил различных марок применяют как высококачественные наполнители при производстве резины, пластмасс, как загустители жидкостей (краски, консистентные смазки, клеи, герметики и др.), в качестве носителей активных веществ (медицина, парфюмерия), а также в радиоэлектронике, текстильной и других сферах промышленности [5].

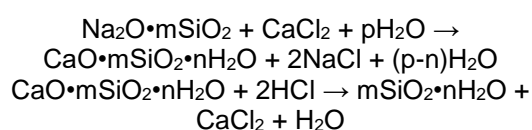
Данная работа направлена на обзор существующих способов получения высокодисперсного диоксида кремния жидкофазным и газофазным методами. Выявление достоинств и недостатков с точки зрения свойств готового продукта и простоты получения.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Среди способов получения порошков в данной статье будут рассматриваться лишь некоторые из них, наиболее подходящие к получению диоксида кремния. Методы получения делятся на химические и физические. В обзорной статье большую часть будут составлять химические методы, к которым относят золь-гель (жидкофазные), пиролиз и плазмохимические (газофазные). Золь-гель широко применяется в промышленности для производства осажденного диоксида кремния, керамики и стекла. Он позволяет производить чистый и однородный продукт с высокими характеристиками. Данный метод является многостадийным и затрачивает множество ресурсов (энергию, реагенты), что является недостатком. Несмотря на данный недостаток, его повсеместно используют в промышленности в качестве извлечения, отделения и получения из горных пород и других кремнийсодержащих растворов осажденный диоксид кремния. По сравнению с золь-гель пиролиз и плазмохимический методы являются менее стадийными за счет оборудования (горелки, камеры горения, плазматрона). Для данного оборудования нужно специальное сырье, что является одним из недостатков данных методов, так как они не позволяют использовать природные материалы. К преимуществам можно отнести высокую чистоту и разнообразие параметров (размер и форму частиц) получаемого продукта [6]. Данные методы повсеместно применяются на различных производствах, лабораториях и других исследовательских учреждениях.

СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ЖИДКОФАЗНЫМ МЕТОДОМ

Для получения осажденного диоксида кремния (белой сажи) применяется технология, основанная на взаимодействии кремнийсодержащих веществ (силикаты металлов, песок, кремнийсодержащие руды) с раствором кислот. На российских предприятиях применяется технология взаимодействия силиката натрия с раствором хлористого кальция и кислоты. На первых стадиях ведется приготовление водных растворов силиката металла, из которого в дальнейшем получают суспензию продукта по следующим реакциям [1]:



Вместо соляной кислоты может использоваться серная кислота. В дальнейшем полученную суспензию отправляют на фильтрацию и отмывку от примесей ионов металлов и кислотных остатков. Заключительными этапами становятся сушка и измельчение. Схема производства представлена на рисунке 1.

Осажденный диоксид кремния обладает различными свойствами в зависимости от варьированности состава и концентрации реагентов, времени, температуры и т. д. Положительным аспектом является выбор размера частиц, который может задаваться. К недостаткам относят расход реагентов, энергозатратность на стадии фильтрации, образование промывных вод, которые нужно фильтровать и отстаивать от примесей. В России существует множество проектов, направленных на получение белой сажи с высоким содержанием кремнезема путем кислотной обработки. Однако подобные технологии не реализованы в промышленных масштабах [7].

Одним из направлений исследований по получению белой сажи является карбонизация раствора. Как пример можно отнести патенты 0002605987 РФ и 0002574252 РФ [8, 9]. Данные способы можно использовать для получения кремнезема из различного алюмосиликатного сырья. Технология переработки и выделения предусматривает перевод алюмосиликатного сырья путем выщелачивания и проковки, в силикат металлов, которые хорошо растворяются в кислотах. Далее их обрабатывают газом, содержащим CO_2 .

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

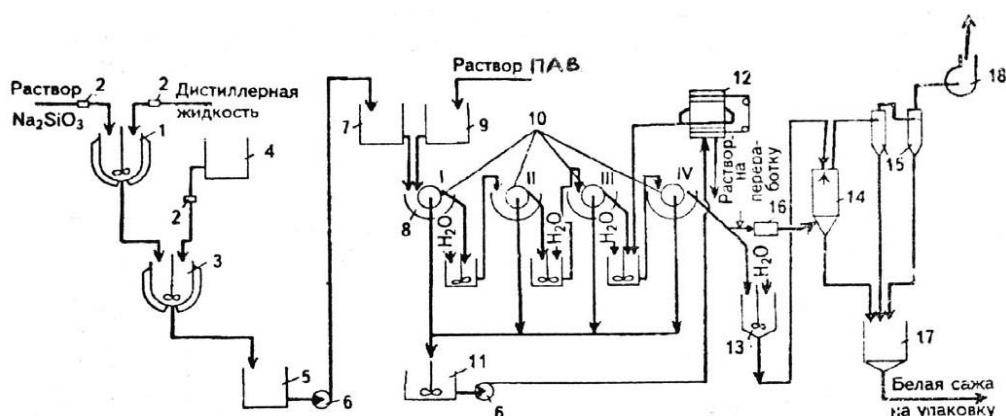


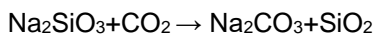
Рисунок 1 – Технологическая схема получения белой сажи в промышленности [1]:

1 – реактор для осаждения силиката кальция; 2 – ротаметры; 3 – реактор для осаждения белой сажи; 4 – напорная емкость для соляной кислоты; 5 – емкость; 6 – насосы; 7 – напорная емкость для суспензии белой сажи; 8 – вакуум-фильтр; 9 – напорная емкость для раствора ПАВ; 10 – репульпаторы; 11 – сборник промывных вод; 12 – фильтр; 13 – репульпатор пасты белой сажи; 14 – распылительная сушилка; 15 – циклоны; 16 – печь; 17 – бункер готовой продукции; 18 – вентилятор

Figure 1 - Technological scheme for producing silica white in industry [1]:

1 - reactor for precipitation of calcium silicate; 2 - rotameters; 3 - reactor for the deposition of white soot; 4 - pressure vessel for hydrochloric acid; 5 - capacity; 6 - pumps; 7 - pressure vessel for white soot suspension; 8 - vacuum filter; 9 - pressure vessel for surfactant solution; 10 - repulperators; 11 - collection of rinsing water; 12 - filter; 13 - white soot paste repulperator; 14 - spray dryer; 15 - cyclones; 16 - oven; 17 - bunker for finished products; 18 - fan

Происходит карбонизация раствора, сопровождающаяся выпадением из раствора аморфного кремнезема, который после промывки и термообработки является товарным продуктом.

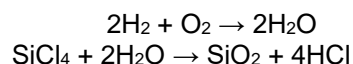


Для увеличения скорости отделения кремнекислот добавляют коагулянты, благодаря правильно подобранным условиям, аморфный кремнезем может иметь высокую удельную поверхность ($> 600 \text{ м}^2/\text{г}$) с содержанием SiO_2 99,95 %.

Есть работа [10], в которой упоминается способ получения осажденного диоксида кремния из силикатных глыб, получившихся путем сплавления песка с гидроксидом натрия. В дальнейшем для получения раствора глыбу разваривают в автоклаве и подвергают карбонизации, затем нейтрализуют кислотой. Также существует патент 0002474535 РФ [11] получения белой сажи из природной горной породы – диатомита. В данной работе диатомит смешивают с твердым NaOH и водой, и помещают в реактор для получения жидкого стекла. Из него при реакции с серной кислотой осаждается аморфный диоксид кремния. Данный способ был направлен для упрощения процесса получения, не используя автоклав и сохраняя производство энергетически выгодным.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ГАЗОФАЗНЫМ МЕТОДОМ

К наиболее часто применяемым методам получения стали относить метод получения коллоидного высокодисперсного кремнезема путем газовой обработки. Данный метод был разработан для получения технического углерода, но в дальнейшем он стал применяться и для кремния. Данная технология была разработана компанией Degussa AG, ныне известной как Evonik Industries AG (Германия). Технология представляет собой высокотемпературное разложение тетрахлорида кремния. Для этого получают тетрахлорид кремния путем смешивания кремния и газообразного HCl . В дальнейшем SiCl_4 смешивается с водородом и воздухом и подается в высокотемпературную камеру горения, где происходят следующие реакции:



Температура реакции составляет около $1800 \text{ }^\circ\text{C}$. Образующийся в ходе реакции HCl рециркулирует. Получаемые первичные частицы диоксида кремния находятся в расплавленном состоянии и начинают коагулировать, образуя более крупные частицы. Когда частицы начинают охлаждаться, они становятся твердыми и имеют склонность к агломерации. Схема производства коллоидного диоксида

кремния представлена на рисунке 2. Конечный продукт, известный как пирогенный коллоидный диоксид кремния (аэросил), имеет высокую чистоту по сравнению с осажденным диоксидом кремния, размер частиц в диапазоне от

5 до 40 нм, имеет высокую удельную поверхность 50–400 м²/г, термическую стабильность, короткую производственную цепь [12, 13].

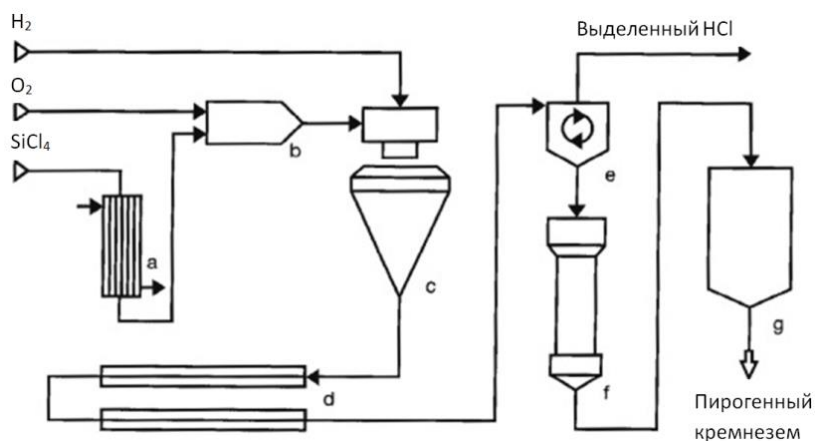


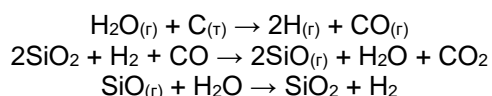
Рисунок 2 – Схема производства пирогенного коллоидного диоксида кремния (аэросила) [12]:
 а – испаритель; б – смешивательная камера; с – горелка; д – линия охлаждения; е – осадитель;
 ф – аппарат для снижения кислотности; г – бункер

Figure 2 - Scheme of production of pyrogenic colloidal silicon dioxide (aerosil) [12]: a - evaporator; b - mixing chamber; c - burner; d - cooling line; e - sieve; f - apparatus for reducing acidity; g - bunker

Первичными недостатками процесса получения аэросила были сложности в контроле размера частиц, имелись довольно крупные частицы с присутствием примесей. На сегодняшний день разрабатываются методы, которые позволяют снизить недостатки получения к минимуму, при этом не теряя требуемого качества.

Данный метод применяется в патенте 0002241670 РФ [14], который заключается в переработке серпентинита. Породу выщелачивают кислотой и получают суспензию, содержащую твердый диоксид кремния. Из него получают тетрахлорид кремния путем хлорирования и подвергают парофазному гидролизу. Получаемый продукт имеет удельную поверхность 270 м²/г и может быть использован на рынке.

В патенте 0002488462 РФ [15] в качестве исходного сырья используется измельченный песок (кварц), который восстанавливают каменноугольным коксом и парами воды. Процесс происходит по следующим реакциям:



Сначала кварцевый песок переводят в газообразный монооксид кремния, который в дальнейшем взаимодействует с парами воды, образует диоксид кремния. Данный способ направлен на упрощения процесса получения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На нынешний день все больше производств стремятся быть безотходными и использовать любой побочный ценный продукт на рынке. Переработка промышленных отходов и побочных продуктов, содержащих диоксид кремния, считается востребованным для любого предприятия, так как помогает решить проблемы утилизации отходов и сохранения природных ресурсов. Переработанные промышленные отходы и побочные продукты, содержащие кремний, являются одними из богатых источников диоксида кремния.

Благодаря тому, что в процессе переработки кремнийсодержащего сырья можно выделить диоксид кремния, стало весьма актуально вносить модификации в первоначальные технологии получения для устранения недостатков и повышения качества продукта. По сравнению с первоначальными разработками существенно увеличили разнообразность сырьевых источников, модифицировали способы путем добавлений стадий (например, карбонизации в жидкофазном методе) и исключения энергозатратных. Можно сделать вывод, что из-за широкой применяемости диоксида кремния в разных сферах промышленности исследования будут направлены на создание способов извлечения и отделения диоксида кремния из вторичного кремнийсодержащего сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов Т.Г. Химическая технология неорганических веществ: учебное пособие ; 2 изд., стер. СПб.: Лань, 2019. 414 с.
2. Смороков А.А., Крайденко Р.И. Получение диоксида циркония с использованием фторидов аммония // Ползуновский вестник. № 3. 2017. С. 126–130.
3. Кремний диоксид. Использование диоксида кремния : сайт «Здоровье человека». URL: https://zdorovecheloveka.com/stati/kremniya-dioksid-vred-i-polza-ispolzovanie-dioksida-kremniya#201_h3_0 (дата обращения 19.12.2020).
4. ИНФОМАЙН. Обзор рынка диоксида кремния (белая сажа и аэросил) в СНГ. 2019. № 6. С. 112.
5. Новые химические технологии. Белая сажа: свойства и технические характеристики : сайт «Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности». URL : http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=5687 (дата обращения 19.12.2020).
6. Ремпель А.А., Валева А.А. Материалы и методы нанотехнологий : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 136 с.
7. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М. : Академкнига, 2004. 208 с. ISBN 5-94628-168-2.
8. Способ комплексной переработки золы от сжигания углей: пат. 0002605987 Российская Федерация, МПК С01В 33/12, В09В 3/00.15 : заяв. N 2015129883; дата заяв. 20.07.20 : опубл. 10.01.2017 / Логинова И.В.
9. Способ переработки алюмосиликатного сырья : пат. 0002574252 Российская Федерация, МПК С01F 7/22, С01F 7/38, С01В 33/14 : заяв. N 2013151059/05; дата заяв. 14.11.2013 : опубл. 10.02.2016 / Космухамбетов А.Р. Бюл. № 4.
10. Бочевская Е.Г., Каршигина З., Саргелова Э. Осаждение аморфного диоксида кремния из силикатных растворов, полученных после переработки минеральной высококремнистой руды // Вестник науки и образования. 2017. № 12 (36), С. 18–23.
11. Способ получения аморфного диоксида кремния : пат. 0002474535 Российская Федерация, МПК В82У 40/00, С01В 33/12, В82В 3/00 : заяв. N 2011134416/05; дата заяв. 17.08.2011; опубл. 10.02.2013 / Наседкин В.В.
12. Космачев П.В. Получение наноразмерного диоксида кремния плазменно-дуговым методом из высококремнистого природного сырья : автореф. дис ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 30 с.
13. Wypych G. Fillers – origin, chemical composition, properties, and morphology // Handbook of Fillers. 2016. № 4 (266). P. 13.
14. Способ переработки серпентина : пат. 0002241670 Российская Федерация, МПК В22F 9/20, С01В 33/18, В82У 30/00 : заяв. N2012106283/02; дата заяв. 21.07.2003 : опубл. 10.12.2004 / Щелконогов А.А.
15. Способ получения нанопорошка аморфного диоксида кремния : пат. 0002488462 Российская Федерация, МПК В22F 9/20, С01В 33/18, В82У 30/00 : заяв. N2012106283/02; дата заяв. 21.02.2012 : опубл. 27.07.2013 / Власов О.А. Бюл. № 21.

Информация об авторах

Е. С. Кутищева – студент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, отделение ядерно-топливного цикла.

И. О. Усольтцева – ассистент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, отделение ядерно-топливного цикла.

Ю. В. Передерин – к.т.н., доцент отделения

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.03.2021; одобрена после рецензирования 14.05.2021; принята к публикации 24.05.2021.

The article was submitted to the editorial board on 01 Mar 21; approved after review on 14 May 21; accepted for publication on 24 May 21.

ядерно-топливного цикла, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

REFERENCES

1. Akhmetov, T.G. (2019). *Chemical technology of inorganic substances: textbook*. 2nd ed., Erased. St. Petersburg : Lan. (In Russ).
2. Smorokov, A.A. & Kraydenko, R.I. (2017). Obtaining zirconium dioxide using ammonium fluorides. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 126-130. (In Russ).
3. Human health. (2020). *Silicon dioxide. The use of silicon dioxide*. Retrieved from https://zdorovecheloveka.com/stati/kremniya-dioksid-vred-i-polza-ispolzovanie-dioksida-kremniya#201_h3_0. (In Russ).
4. Overview of the market for silicon dioxide (silica white and aerosil) in the CIS-2019 (2019). *INFOMINE*, (6), 112. (In Russ).
5. New chemical technologies. *White soot: properties and technical characteristics*. Retrieved from http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=5687. (In Russ).
6. Rempel, A.A. & Valeeva, A.A. (2015). *Materials and methods of nano-technologies: textbook*. Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta. (In Russ).
7. Shabanova, N.A. & Sarkisov, P.D. (2004). *Fundamentals of sol-gel technology of nanodispersed silica*. Moscow : Akademkniga. (In Russ). ISBN 5-94628-168-2.
8. Loginova, I.V. (2017). Method of complex processing of ash from coal combustion. *Pat. 0002605987 Russian Federation, publ. 10.01.2017*. (In Russ).
9. Kosmukhambetov, A.R. (2016). Method for processing aluminosilicate raw materials. *Pat. 0002574252 Russian Federation, publ. 02/10/2016*. Bul. No. 4. (In Russ).
10. Bochevskaya, E.G., Karshigina, Z. & Sargelova, E. (2017). Deposition of amorphous silicon dioxide from silicate solutions obtained after processing of high-siliceous mineral ore. *Bulletin of Science and Education*, 12(36), 18-23. (In Russ).
11. Nasedkin, V.V. (2013). Method of obtaining amorphous silicon dioxide. *Pat. 0002474535 Russian Federation, publ. 02/10/2013*. (In Russ).
12. Kosmachev, P.V. (2017). Obtaining nanosized silicon dioxide by the plasma-arc method from high-silica natural raw materials. *Extended abstract of candidates thesis*. Tomsk. (In Russ).
13. Wypych, G. (2016). Fillers – origin, chemical composition, properties, and morphology. *Handbook of Fillers*, 4(266), 13.
14. Shchelkonogov, A.A. (2004). Serpentine processing method. *Pat. 0002241670 Russian Federation, publ. 10.12.2004*. (In Russ).
15. Vlasov, O.A. (2013). Method of obtaining nanopowder of amorphous silicon dioxide. *Pat. 0002488462 Russian Federation, publ. 07/27/2013*. Bul. No. 21. (In Russ).

Information about the authors

E. S. Kutishcheva – student, National Research Tomsk Polytechnic University, Department of Nuclear Fuel Cycle.

I. O. Usoltseva – Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, Department of the Nuclear Fuel Cycle.

Yu. V. Perederin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Nuclear Fuel Cycle Department, National Research Tomsk Polytechnic University.