



15. Shinakov V.G., Lyalin A.V., Travnikov E.P., Vinogradov V.N. *Lopastnoi pnevmaticheskii pitatel'* [Bladed pneumatic feeder]. Patent RF no. 2248703, MKP A21D 6/00, A21B 5/00. ; patent applicant and holder is ZAO "Vladimir Bread-Baking Plant No.2". 2003122996/13 ; applied Jul 21, 2003 ; published Mar. 27, 2005. Bull. No. 9.

16. Arkhangel'skii V.Yu., Dzhangiryan V.G., Varenikh N.M. *Ob'emnyi dozator* [Volumetric feeder]. Patent RF no. 2133944, MKP G01F11/00, C06B21/00. ; patent applicant and holder is Research and Development Establishment of Applied Chemistry. No. 97121079/02 ; applied Dec. 02, 1997 ; published Jul 27, 1999.

17. Eron'ko S.P. et al. Avtonomnaya pnevmomekhanicheskaya sistema dozirovannoi podachi shlakoobrazuyushchei smesi v kristallizator MNLZ [An autonomous pneumomechanical system for dosed supply of a slag-forming mixture into a CCM crystallizer]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2011, No. 2, pp. 10–18.

18. Kol'tsov V.P., Elshin V.V., Nguen V.Kh. Dozatory dlya podachi zernistykh materialov v zonu vysokogo davleniya [Dosers for feeding granular materials into the high pressure zone]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013. No.5 (76), pp. 38–42.

УДК 669.71:502.3

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).59-66

Колосов Александр Дмитриевич,инженер НИЧ, Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
e-mail: akolosov.irk@gmail.com**Немаров Александр Алексеевич,**доцент кафедры информатики института кибернетики,
Иркутский национальный исследовательский технический
университет,
e-mail: nemarov@mail.ru**Небогин Сергей Андреевич,**аспирант физико-технического института,
Иркутский национальный исследовательский технический
университет,
e-mail: s.a.nebo@yandex.ru**A. D. Kolosov,**Research department Engineer, Irkutsk National Re-
search Technical University,
e-mail: akolosov.irk@gmail.com**A. A. Nemarov,**Assoc. Prof., the Informatics Subdepartment, the Institute
of Cybernetics,
Irkutsk National Research Technical University,
e-mail: nemarov@mail.ru**S.A. Nebogin,**Ph.D. student, the Institute of Physics and Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
e-mail: s.a.nebo@yandex.ru**Информация о статье**

Дата поступления: 29 мая 2017 г.

Article info

Received: May 29, 2017

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКРЕМНЕЗЕМА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

NANOSILICA OBTAINMENT AND APPLICATION TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF NEW MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING

Аннотация. В работе приведен краткий обзор существующих разновидностей аморфного кремнезема, технологий его получения и основные направления применения. Основным предметом исследования данной работы являются промышленные разновидности аморфного нанокремнезема, именно эти материалы представляют собой высокомаржинальные продукты, наиболее востребованные в современной промышленности. Наноструктуры на основе аморфного диоксида кремния получают различными способами, начиная от использования необработанной пыли, отводящейся от рудотермических печей по производству кремния, заканчивая дорогостоящими химическими и пиролизными способами. Одним из перспективных способов получения высококачественного аморфного нанокремнезема является предварительная обработка пыли рудотермических печей по производству кремния с целью избавления от углерода и других примесей. Получаемый данным способом наномодификатор имеет свойства, близкие к осажденному и пирогенному кремнезему, при этом обладает значительно более низкой себестоимостью. Наномодификаторы на основе аморфного диоксида кремния значительно меняют свойства материалов, при производстве которых применяются. Различные разновидности аморфного нанокремнезема находят применение при производстве бетонов, в шинной промышленности, в химической промышленности, имеют перспективы применения в металлургии и других отраслях производства. Производство и использование различных добавок на основе нанокремнезема является одним из перспективных направлений развития современной науки и техники. Анализ применения аморфного нанокремнезема, проведенный в рамках подготовки данной работы, показал, что применение наносилики позволяет заметно улучшить свойства многих известных материалов. Существует опыт успешного применения наномодификаторов на основе аморфного диоксида кремния в строительстве, в резинотехнической и химической промышленности, в металлургии и других отраслях производства. Нанокремнезем является одним из наиболее востребованных наноматериалов в современном производстве и имеет широкие перспективы применения.

Ключевые слова: обогащение полезных ископаемых, флотационное обогащение наноразмерных сред, наномодификатор, новые материалы в машиностроении.

Abstract. The paper presents a brief overview of the existing varieties of amorphous silica, technologies of its production and the main areas of application. The main subject of investigation in this article are industrial varieties of amorphous nanosilica, these materials represent high-margin products, the most popular in modern industry. Nanostructures on the basis of amorphous silicon dioxide are obtained in various ways, ranging from raw dust withdrawn from ore-thermal furnaces for the silicon production, to costly chemical and pyrolytic methods. One of the promising ways to obtain high quality amorphous nanosilica is pre-treatment of dust of ore-thermal furnaces for production of silicon for the purpose of removing the carbon and other impurities. Obtained by this method, the



nanomodifier has properties close to those of precipitated and pyrogenic silica and, in addition, has a much lower cost. Nanomodifiers on the basis of amorphous silicon dioxide significantly change the properties of materials in the production of which they are applied. Different varieties of amorphous nanosilicas are applied in the manufacture of concrete in the tire industry, in the chemical industry, have prospects of application in metallurgy and other industries. The production and use of various nanosilica-based additives is one of the promising directions of development of modern science and technology. Analysis of application of amorphous nanosilica conducted in the preparation for this work showed that the use of nanosilica allows significantly improving the properties of many known materials. There is an experience of the successful application of nanomodifiers on the basis of amorphous silicon dioxide in construction, rubber and chemical industry, metallurgy and other industries. Nanosilica is one of the most popular nanomaterial in modern manufacturing and has broad application prospects.

Keywords: mineral processing, flotation concentration of nanoscale environments, nanomodifier, new materials in mechanical engineering.

Введение

Понятие нанотехнологии возникло в научной среде во второй половине прошлого века. Уже с начала века текущего нанотехнологии всё больше входят в повседневную жизнь каждого человека. Как показывают различные исследования, наночастицы, добавляемые в какой-либо материал, заметно меняют его характеристики. На данном этапе развития прикладной науки именно это свойство наночастиц в большей степени используется в реальном производстве.

Другой важной тенденцией последнего времени является борьба за экологию на производстве (футеровка, теплообменник, ГОУ) и в повседневной жизни. Приоритет всё чаще отдается безотходным или малоотходным способам производства той или иной продукции.

Тематика данной статьи объединяет вышеперечисленные тезисы. В статье рассказывается о существующих видах наносилики, способах получения наносилики, о возможных направлениях её применения.

Аморфный кремнезем

Диоксид кремния (кремнезем) – вещество с химической формулой SiO_2 . Может существовать в аморфной и кристаллической формах. Кристаллический кремнезем является крайне распространенным минералом на нашей планете, его основные формы – кварц, тридимит, кристобалит. Аморфный кремнезем встречается в природе в виде минералов - гидратов диоксида кремния, таких как опал, однако в чистом виде практически не существует. Аморфный диоксид кремния в чистом виде можно получить только технологическим способом. На рис. 1 представлены наиболее распространенные разновидности диоксида кремния. Серым цветом обозначены наиболее распространенные промышленные аморфные кремнеземы.

Синтетический кремнезем является незаменимым во многих отраслях современной промышленности благодаря следующим особенностям:

- Нейтрален по отношению к большинству существующих минеральных и органических соединений;

- Имеет высокую площадь удельной поверхности (высокоразвитая поверхность).

Химическая нейтральность и большая площадь удельной поверхности аморфного диоксида кремния способны придавать новые физические характеристики различным составам, материалам, продуктам, не меняя их химических свойств. В частности, высокочистый тонкодисперсный аморфный кремнезем широко применяется:

– для повышения вязкости жидких составов (используется при производстве клеев, лаков, красок, герметиков, паст, мазей и т. д.);

– для увеличения сыпучести и предотвращения комкования порошкообразных материалов (сухие строительные смеси, медикаменты, бытовая химия, специи, сухое молоко и т. д.);

– для повышения прочностных характеристик и износостойкости материалов (бетон, резина, пластики и т. д.);

– в качестве сорбента во всевозможных областях (медицина, экология и т. д.);

– при производстве электронных компонентов в качестве изолятора;

– как исходный материал для получения кремния высокой чистоты.

Область применения высокочистого аморфного диоксида кремния в промышленном производстве с каждым годом увеличивается. Основными характеристиками промышленного микрокремнезема являются:

– себестоимость производства;

– удельная поверхность по BET;

– химический состав;

– химическая активность;

– гидрофильность либо гидрофобность.

В зависимости от данных характеристик, стоимость аморфного кремнезема может отличаться в сотни раз.

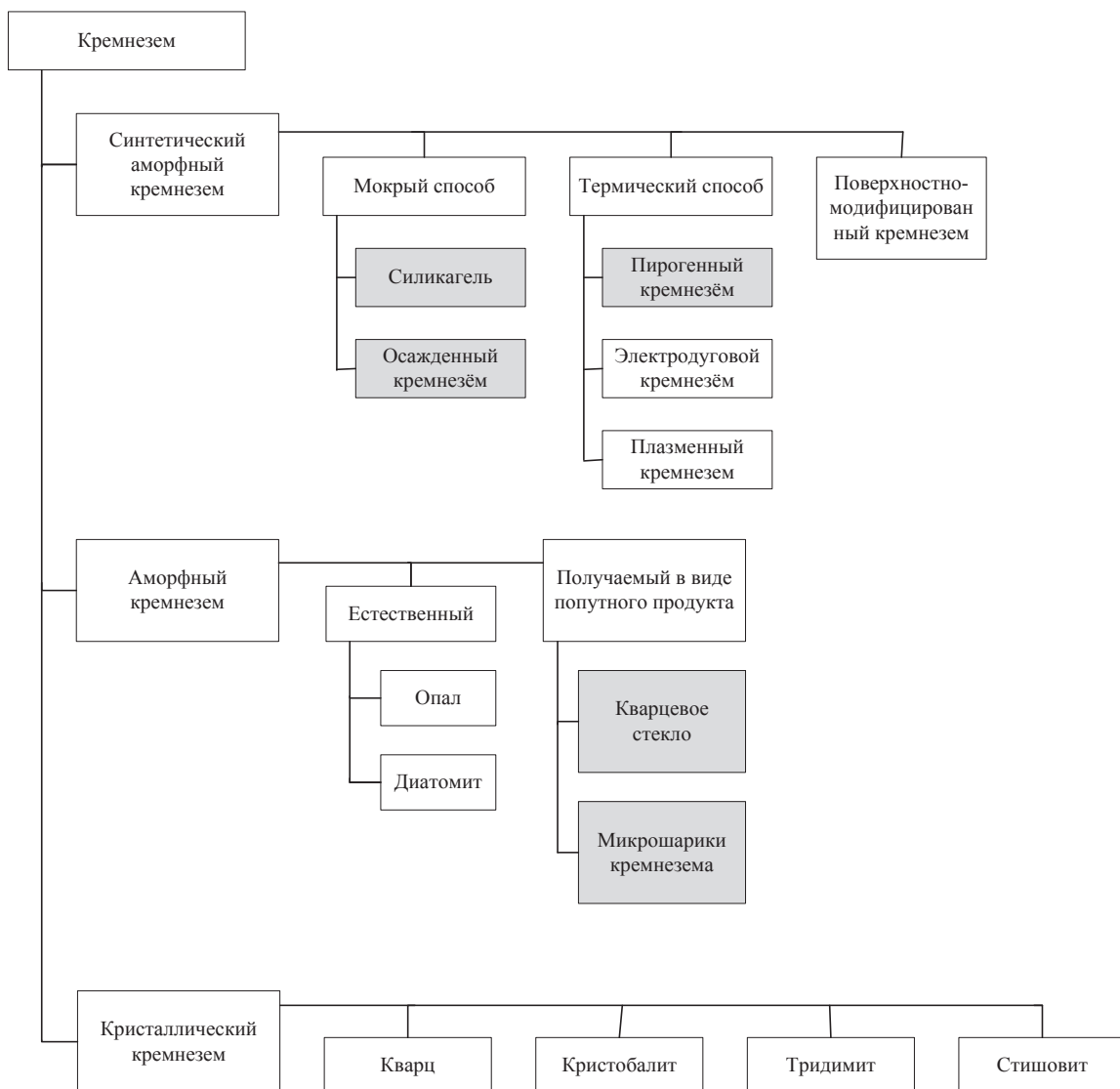


Рис. 1. Международная классификация кремнезёмов

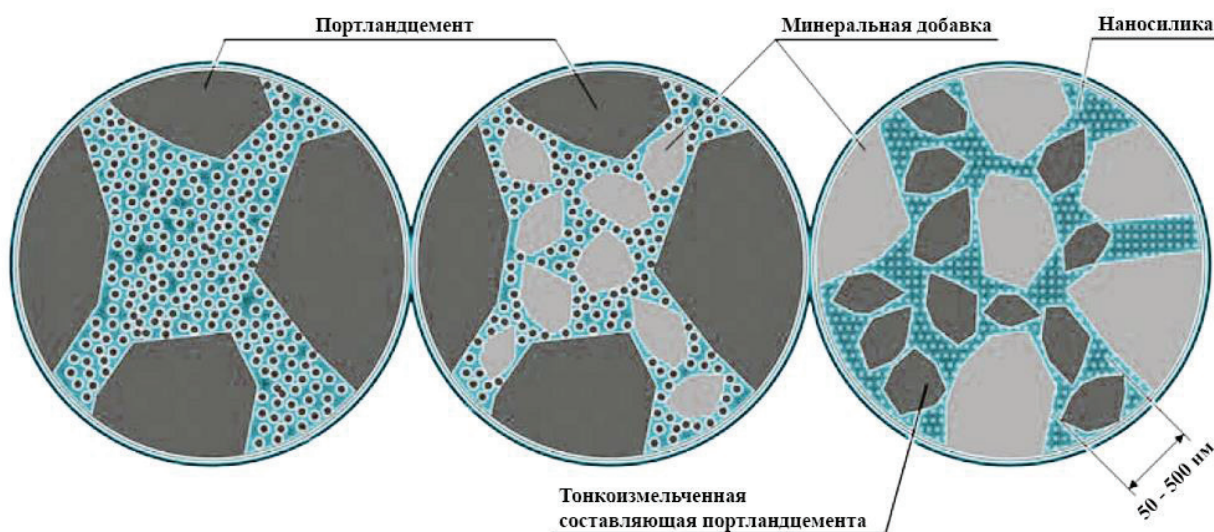


Рис. 2. Структура нанобетонов с добавлением наносилики

Основные промышленные разновидности аморфного кремнезема

Нанодисперсная пыль диоксида кремния, являющаяся продуктом газоочистки при рудотермическом производстве кремнийсодержащих сплавов, содержит около 75-85 % SiO_2 и большое количество посторонних примесей, таких как углерод, карбид кремния, железо и т. д. В связи с низкой чистотой, сырой продукт газоочистки находит массовое применение только в строительной отрасли в качестве минеральной добавки к цементам. Стоимость исходного продукта газоочистки находится в пределах от 5 до 20 тысяч рублей за одну тонну. Продукт газоочистки, обогащенный до содержания диоксида кремния 98 %, имеет значительно более широкий спектр применения [1-19]. Данный продукт может использоваться как модификатор цемента, резины и т. д. [20-25] Возрастает и стоимость – на рынке Европы продукт стоит в среднем 1000 долларов США за тонну.

Другой популярной на рынке разновидностью аморфного кремнезема является осажденный кремнезем – белая сажа. Обычно данный продукт получают осаждением из раствора силиката натрия кислотой с последующей фильтрацией, промывкой и сушкой. Белая сажа – активный минеральный наполнитель, широко используемый в шинной, резинотехнической, химической и других отраслях промышленности. В зависимости от технологии производства, белая сажа, представлена на рынке с содержанием SiO_2 от 90 % до 99 %. Для изменения свойств, белую сажу часто подвергают различной химической обработке. Мировое потребление осажденного кремнезема в 2014–2016 годах составляет 2–2,5 миллиона тонн в год. Благодаря относительно низкой себестоимости сырья и несложной технологии производства, цена реализации начинается от 500 долларов США за тонну.

Третьей и наиболее сложной в получении разновидностью аморфного кремнезема является пирогенный кремнезем. Пирогенный кремнезем получают взаимодействием газообразного четыреххлористого кремния (SiCl_4) с парами воды при температуре около 1500 °С. Содержание SiO_2 в продукте, полученном по данной технологии, начинается от 99 % для производителей КНР и от 99,8 % для Европы и США. Благодаря своим физическим и химическим свойствам, а также из-за высокой сложности производства, продукт находит применение в отраслях с высокой добавленной стоимостью – фармацевтика, косметика, электроника, силиконы, герметики и пр. Мировое потребление пирогенного кремнезема в 2014–2016 годах составляет 50–70 тысяч тонн в год.

Стоимость пирогенного кремнезема от 3000 до 5000 долларов США за тонну.

Применение нанокремнезема в строительном секторе

Одним из перспективных применений нанокремнезема является модификация свойств бетонов и строительных смесей для достижения повышенных эксплуатационных характеристик и снижения сроков строительства. Данное направление получило название УНПС (Ultra High Performance Concrete). Общемировая тенденция – применение наноразмерных частиц с большой площадью поверхности и высокой пуццолановой активностью. Нанокремнезем (наносилика) – наиболее доступный для массового использования модификатор «нанобетонов». На рис. 2 схематично изображено влияние наночастиц диоксида кремния на структуру бетона.

Бетон, получаемый с применением наносилики, позволяет добиться:

- большей прочности при меньшем весе;
- повышения удобоукладываемости смеси;
- уменьшения сроков схватывания бетона;

На рис. 3 изображены балки с равными показателями прочности, изготовленные по различным технологиям. В табл. 1 приведена масса и оценочная стоимость погонного метра каждой из балок, изображенных на рис. 3.



Рис. 3. Балки из различных материалов с равными показателями прочности

Как видно из табл. 1, по соотношению «прочность – масса» с УНПС может конкурировать только сталь. Однако очень высокая стоимость стальных конструкций делает УНПС конкурентоспособным, а значит, объемы спроса на нанокремнеземные модификаторы будут только возрастать.

Т а б л и ц а 1

Масса и стоимость 1 погонного метра балки

№ п/п	Материал	Масса, кг/м	Оценочная стоимость, руб.
1	Железобетон	528	1000
2	Преднапряженный железобетон	466	900
3	Сталь	110	7000
4	УНПС	141	500



Применение нанокремнезема при производстве автомобильных шин.

Мировые лидеры производства автомобильных шин все больше применяют нанокремнезема при изготовлении своей продукции. По данным самих производителей и независимых лабораторий, применение наносилики положительно влияет на важные эксплуатационные характеристики автомобильной резины:

- снижается истираемость протектора;
- увеличивается срок службы шины;
- уменьшается сопротивление качению;
- усиливаются фрикционные свойства;

Наносилика частично заменяет технический углерод в составе резиновой смеси, благодаря чему снижается эмиссия CO₂ как при производстве шин, так и при их эксплуатации. Использование технического углерода и других ингредиентов, которые могут содержать полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), регламентируется законодательством в большинстве развитых стран:

- ЕС: регламент REACH, 2007 г.;
- Япония: Закон о контроле химических веществ, 2011 г.;
- Южная Корея: регламент K-REACH, 2013 г.;
- Австралия: реформа NICNAS;
- Китай: China GHS, 2011 г.;
- США: TSCA, Закон о контроле над токсичными веществами, 2002 г.;
- Индия: Проект Правил об опасных веществах;
- В РФ данного законодательства пока нет.

Шины, которые производят ведущие заводы на сегодняшний день, носят название «зеленых шин», однако по всему миру активно идут разработки технологии производства «белых шин». «Белые шины» должен отличать максимальный отказ от технического углерода и других ингредиентов, которые могут содержать ПАУ, основной упор исследований делается на применение белой сажи в качестве основного наполнителя. Разработка составов модифицированных каучуков, которые позволят создать эффективные и экологичные «белые шины», является актуальной задачей.

Современные тенденции развития шинной индустрии говорят о том, что различные виды аморфного нанокремнезема будут всё более востребованы в ближайшие годы.

Применение нанокремнезема при производстве синтетических каучуков

В химической промышленности применение наносилики сконцентрировано в области производства синтетических каучуков и смол. Крем-

нийорганические каучуки (полиорганосилоксаны) обладают тепло- и морозостойкостью, высокими электроизоляционными свойствами и физиологической инертностью, что обуславливает их широкое применение.

В России работает большое количество производителей синтетических каучуков, экспорт из РФ составляет более 1 млн тонн в год. Импорт в РФ пирогенного кремнезема для производства синтетических каучуков и смол превышает 20 тысяч т/год на сумму более 100 млн долларов США в год.

Производство синтетических каучуков развивается как в России, так и во всем мире, что обуславливает дальнейший рост спроса на нанокремнезем.

Применение нанокремнезема в металлургии.

Силумины являются наиболее востребованными алюминиевыми сплавами в промышленности. В настоящее время сплавы на основе системы Al–Si получают либо сплавлением шихтовых материалов, либо методом восстановления легирующего компонента из его соединений. Одним из перспективных способов получения силуминов является прямое восстановление кремния из его оксидов алюминием. Восстановление производится в плавильных печах, используемых в литейном производстве, при температуре 670–900 °С [26–31].

Заключение

Анализ применения аморфного нанокремнезема, проведенный в рамках подготовки данной работы, показал, что применение наносилики позволяет заметно улучшать свойства многих известных материалов. Существует опыт успешного применения наномодификаторов на основе аморфного диоксида кремния в строительстве, в резинотехнической и химической промышленности, в металлургии и других отраслях производства. Нанокремнезем является одним из наиболее востребованных наноматериалов в современном производстве и имеет широкие перспективы применения.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0174 «Разработка комплексной ресурсосберегающей технологии и организация высокотехнологичного производства наноструктур на основе углерода и диоксида кремния для улучшения свойств строительных и конструкционных материалов» в рамках Про-



граммы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденной постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория и практика процессов флотационного обогащения наноразмерных сред / В.В. Кондратьев и др. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. 160 с.
2. Теория и практика прикладной гидроаэромеханики в обогащении полезных ископаемых и металлургии / К.Л. Ястребов и др. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. 350 с.
3. Карлина А.И. Изучение гидродинамики гравитационного обогащения полезных ископаемых // Вестник ИрГТУ. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. № 3. С. 194–199.
4. Новые возможности для очистки сточных вод угольных месторождений / В.А. Гронь и др. // Вестник ИрГТУ. 2012. № 9 (68). С. 183–189.
5. Карлина А.И. Изучение структуры внутренних течений и волнового движения водного и взвесенесущего потока // Вестник ИрГТУ. Иркутск : Издательство ИрГТУ. 2015. № 4. С. 137–145.
6. Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Problem solution of reagent free complex preparation and natural water & sewage purification. – Science and Education, Material of the VI international research and practice conference, June 27th – 28th, 2014, Munich, Germany, 2014, P. 518–524.
7. Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Improved modes reagentless comprehensive preparation and purification of natural and waste waters. – Science and Education // Material of the VII international research and practice conference, October 29th – 30th, 2014, Munich, Germany, 2014, P. 241–245.
8. Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Elaboration of technology and the way of reagent free complex preparation and purification of natural water & sewage. – Science and Education, Material of the V international research and practice conference, Vol. II, February 27th – 28th, 2014, Munich, Germany, 2014. Germany : Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg –Munich, 2014. P. 392–401.
9. Технология очистки сточных вод гидролизных производств / В.В. Коростовенко и др. // Вестник ИрГТУ. 2013. № 7 (78). С. 105–109.
10. Подготовка и очистка природных и сточных вод / К.Л. Ястребов и др. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2014. 564 с.
11. Карлина А.И. Исследование работы гидроэлеваторов и безнапорного самотечного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. №4. С. 62–69.
12. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Ржечицкий А.Э. Исследование применения эффекта Коанды для сепарации целевой фракции микрочастиц кварца // Вестник ИрГТУ. 2011. № 11 (58). С. 174–178.
13. Новые технологические решения по переработке отходов кремниевого и алюминиевого производств / В.В. Кондратьев и др. // Металлург. № 5. 2013. С. 92–95.
14. Естественная аэрация струй и потоков производств / В.В. Кондратьев и др. // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10. С. 80–87.
15. Пат. 2500480 Рос. Федерация. Способ извлечения наноразмерных частиц из техногенных отходов производства флотацией / Кондратьев В.В., Немаров А.А., Ржечицкий А.Э., Иванов Н.А., Лебедев Н.В. Опубл. 10.12.2013.
16. Пат. 2578319 Рос. Федерация. Способ выделения углеродных наночастиц из техногенного углеродистого материала / Ржечицкий Э.П., Кондратьев В.В. Заявл. 21.11.2014 ; опубл. 27.03.2016.
17. Немаров А.А., Лебедев Н.В. Разработка научных основ повышения производительности флотационных машин и оценка их экономической эффективности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 79–82.
18. Немаров А.А., Лебедев Н.В., Карлина Ю.И. Теоретические и экспериментальные исследования параметров пневмогидравлических аэраторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 44–50.
19. Дружинина Т.Я., Немаров А.А., Небогин С.А. Основные типы конструкций отсадочных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 88–92.
20. Ivanchik N., Kondrat'ev V., Chesnokova A. Use of Nanosilica Recovered from the Finely Dispersed By-product of the Electrothermal Silicon Production for Concrete Modification : 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. С. 1567–1573.
21. Оценка применения продуктов переработки отходов кремния в качестве ультрадисперсных активирующих флюсов для дуговой сварки / Н.Н. Иванчик и др. // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 165–172.
22. Иванов Н.А., Балановский А.Е., Иванчик Н.Н., Карлина А.И. Улучшение свойств серого чугуна кремнийдиоксид и углеродными наноструктурами / В.В. Кондратьев и др. // Журн. Сибир. федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 5. С. 671–685.
23. Кондратьев В.В., Карлина А.И., Немаров А.А., Иванов Н.Н. Результаты теоретических и практических исследований флотации наноразмерных кремнийсодержащих структур / В.В. Кондратьев и др. // Журн. Сибир. федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 5. С. 657–670.
24. Пат. 2588965 Рос. Федерация. Способ модифицирования чугуна / В.В. Кондратьев, Э.П. Ржечицкий, А.Е. Балановский, Н.Н. Иванчик. № 2015106439/02 ; заявл. 25.02.2015 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. 19.
25. Переработка и применение мелкодисперсных отходов кремниевого производства в строительстве / В.В. Кондратьев и др. // Олон Улсын Бетоны XIV БАГА ХУРАЛ : материалы междунар. строит. симпозиума. Монголия, 2015. С. 105–114.
26. Возможность получения сплавов системы Al-Si с использованием аморфного микрокремнезёма / М.П. Кузьмин и др. // Металлург. 2017. № 1 С. 101–105.
27. Possibility of preparing alloys of the Al-Si system using amorphous microsilica / M.P. Kuz'min et al. // Metallurgist. 2017. Vol. 61. P. 86–91.
28. Кузьмин М.П., Жалсанов Б.Г. Исследование термодинамической возможности восстановления алюминием кремния из аморфного микрокремнезёма // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов : материалы докл. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2017. С. 46–48.



29. Получение силуминов с использованием аморфного микрокремнезёма / М.П. Кузьмин и др. // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов : материалы докл. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2017. С. 48–50.
30. Кузьмин М.П., Кондратьев В.В. Разработка способа получения силуминов с использованием микро- и наночастиц диоксида кремния // Цветные металлы и минералы–2016 : сб. тезисов докл. VIII Междунар. конгресса. Красноярск, 2016. – С. 170–171.
31. Наноструктуры и алюминиевая промышленность / В.В. Кондратьев и др. // Вестник ИрГТУ. 2015. № 8. С. 77–85.

REFERENCES

- Kondrat'ev V.V. et al. Teoriya i praktika protsessov flotatsionnogo obogashcheniya nanorazmernykh sred [Theory and practice of the processes of flotation enrichment of nanoscale media]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, 160 p.
- Yastrebov K.L. Teoriya i praktika prikladnoi gidroaeromekhaniki v obogashchenii poleznykh iskopaemykh i metallurgii [Theory and practice of applied hydroaeromechanics in the enrichment of minerals and metallurgy]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, 350 p.
- Karlina A.I. Izuchenie gidrodinamiki gravitatsionnogo obogashcheniya poleznykh iskopaemykh [The study of hydrodynamics of gravity dressing of minerals]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, Irkutsk: ISTU Publ., 2015, No. 3, pp. 194–199.
- Gron' V.A. et al. Novye vozmozhnosti dlya ochistki stochnykh vod ugol'nykh mestorozhdenii [New opportunities for sewage treatment of coal deposits]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2012. No. 9 (68). pp. 183–189.
- Karlina A.I. Izuchenie struktury vnutrennikh techenii i volnovogo dvizheniya vodnogo i vzvesenesushchego potoka [A study of the structure of internal currents and the wave motion of an aqueous and suspension-carrying flow]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, Irkutsk: ISTU Publ., 2015, No. 4, pp. 137–145.
- Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Problem solution of reagent free complex preparation and natural water & sewage purification. *Science and Education, Material of the VI international research and practice conference, June 27th – 28th, 2014*, Munich, Germany, 2014, pp. 518–524.
- Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Improved modes reagentless comprehensive preparation and purification of natural and waste waters. *Science and Education. Material of the VII international research and practice conference, October 29th – 30th, 2014*, Munich, Germany, 2014, pp. 241–245.
- Yastrebov K.L., Dykusov G.E., Karlina A.I. Elaboration of technology and the way of reagent free complex preparation and purification of natural water & sewage. *Science and Education, Material of the V international research and practice conference, Vol. II, February 27th – 28th, 2014*, Munich, Germany, 2014. Germany : Rublising office Vela Verlag Waldkraiburg –Munich, 2014, pp. 392–401.
- Korostovenko V.V. et al. Tekhnologiya ochistki stochnykh vod gidroliznykh proizvodstv [Technology of wastewater treatment of hydrolysis industries]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 7 (78), pp. 105–109.
- Yastrebov K.L. et al. Podgotovka i ochistka prirodnykh i stochnykh vod [Preparation and purification of natural and waste water]. Irkutsk: ISTU Publ., 2014, 564 p.
- Karlina A.I. Issledovanie raboty gidroelevatorov i beznapornogo samotechnogo transporta [Investigation of the operation of hydroelevators and gravity free gravity transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System analysis. Modeling]*, 2014, No.4, pp. 62–69.
- Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Rzhechitskii A.E. Issledovanie primeneniya effekta Koandy dlya separatsii tsevoi fraktsii mikrochastits kvartsa [Investigation of the application of the Coanda effect for separation of the target fraction of quartz microparticles]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2011, No. 11 (58), pp. 174–178.
- Kondrat'ev V.V. et al. Novye tekhnologicheskie resheniya po pererabotke otkhodov kremnievogo i aluminievogo proizvodstv [New technological solutions for waste processing of silicon and aluminum industries]. *Metallurg [Metallurgist]*, No. 5, 2013, pp. 92–95.
- Kondrat'ev V.V. et al. Estestvennaya aeratsiya strui i potokov proizvodstv [Natural aeration of jets and streams of productions]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015, No. 10, pp. 80–87.
- Kondrat'ev V.V., Nemarov A.A., Rzhechitskii A.E., Ivanov N.A., Lebedev N.V. *Sposob izvlecheniya nanorazmernykh chastits iz tekhnogennykh otkhodov proizvodstva flotatsiei [The method of extraction of nanosized particles from technogenic wastes produced by flotation]*. Patent RF 2500480. Published Dec. 10, 2013.
- Rzhechitskii E.P., Kondrat'ev V.V. *Sposob vydeleniya uglerodnykh nanochastits iz tekhnogennoy uglerodistoy materiala [Method for the isolation of carbon nanoparticles from technogenic carbonaceous material]*. Patent RF 2578319. Applied Nov. 21, 2014 ; published Mar. 27, 2016.
- Nemarov A.A., Lebedev N.V. Razrabotka nauchnykh osnov povysheniya proizvoditel'nosti flotatsionnykh mashin i otsenka ikh ekonomicheskoi effektivnosti [Development of scientific bases for increasing the productivity of flotation machines and assessing their economic efficiency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System analysis. Modeling]*, 2015, No. 3 (47), pp. 79–82.
- Nemarov A.A., Lebedev N.V., Karlina Yu.I. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya parametrov pnevmogidravlicheskikh aeratorov [Theoretical and experimental studies of the parameters of pneumohydraulic aerators]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System analysis. Modeling]*, 2015, No. 4 (48), pp. 44–50.
- Druzhinina T.Ya., Nemarov A.A., Nebogin S.A. Osnovnye tipy konstruksii otsadochnykh mashin [The main types of jiggling machine designs]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System analysis. Modeling]*, 2016, No. 3 (51), pp. 88–92.
- Ivanchik N., Kondrat'ev V., Chesnokova A. Use of Nanosilica Recovered from the Finely Dispersed By-product of the Electrothermal Silicon Production for Concrete Modification : 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1567–1573.



21. Ivanchik N.N. et al. Otsenka primeneniya produktov pererabotki otkhodov kremniya v kachestve ul'tradispersnykh aktiviruyushchikh flyusov dlya dugovoi svarki [Evaluation of the application of silicon waste processing products as ultra-dispersive activating fluxes for arc welding]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016, Vol. 20, No. 12 (119), pp. 165–172.
22. Ivanov N.A., Balanovskii A.E., Ivanchik N.N., Karlina A.I. Uluchshenie svoystv serogo chuguna kremniidioksid i uglerodnymi nanostrukturami [Improvement of the properties of gray cast iron silicon dioxide and carbon nanostructures]. *Zhurn. Sibir. feder. un-ta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and Technologies]*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 671–685.
23. Kondrat'ev V.V., Karlina A.I., Nemarov A.A., Ivanov N.N. Rezul'taty teoreticheskikh i prakticheskikh issledovaniy flotatsii nano-razmernykh kremniisoderzhashchikh struktur [Results of theoretical and practical studies of flotation of nanoscale silicon-containing structures]. *Zhurn. Sibir. feder. un-ta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and Technologies]*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 657–670.
24. Kondrat'ev V.V., Rzhechitskii E.P., Balanovskii A.E., Ivanchik N.N. *Sposob modifitsirovaniya chuguna [Method for modifying cast iron]*. Patent RF 2588965. No. 2015106439/02 ; applied Feb. 25, 2015 ; published Jul. 10, 2016, Bull. 19.
25. Kondrat'ev V.V. et al. Pererabotka i primeneniye melkodispersnykh otkhodov kremnievogo proizvodstva v stroitel'stve [Processing and application of fine waste of silicon production in construction]. *Olon Ulsyn Betony XIV BAGA KhURAL : materialy mezhdunar. stroit. Simpoziuma [Olon Ulsyn Betony XIV BAGA KhURAL: Materials of the International construction symposium]*. Mongoliya, 2015, pp. 105–114.
26. Kuz'min M.P. et al. Vozmozhnost' polucheniya splavov sistemy Al-Si s ispol'zovaniem amorfnoho mikrokretnezema [The possibility of obtaining alloys of the Al-Si system using amorphous microsilica]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2017, No. 1, pp. 101–105.
27. Kuz'min M.P. et al. Possibility of preparing alloys of the Al-Si system using amorphous microsilica. *Metallurgist*. 2017, Vol. 61, pp. 86–91.
28. Kuz'min M.P., Zhalsanov B.G. Issledovanie termodinamicheskoi vozmozhnosti vosstanovleniya alyuminiem kremniya iz amorfnoho mikrokretnezema [Investigation of the thermodynamic possibility of aluminum reduction of silicon from amorphous microsilica]. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh, rastitel'nykh i mineral'nykh resursov : materialy dokl. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem [Prospects for the development of technology for the processing of hydrocarbon, plant and mineral resources: materials of the reports of the scientific and practical conference with international participation]*. Irkutsk, 2017, pp. 46–48.
29. Kuz'min M.P. et al. Poluchenie siluminov s ispol'zovaniem amorfnoho mikrokretnezema [Preparation of silumins using amorphous microsilica]. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh, rastitel'nykh i mineral'nykh resursov : materialy dokl. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem [Prospects for the development of technology for the processing of hydrocarbon, plant and mineral resources: the materials of the reports of the scientific and practical conference with international participation]*. Irkutsk, 2017, pp. 48–50.
30. Kuz'min M.P., Kondrat'ev V.V. Razrabotka sposoba polucheniya siluminov s ispol'zovaniem mikro- i nanochastits dioksida kremniya [Development of a method for the production of silumin with the use of micro- and nanoparticles of silicon dioxide]. *Tsvetnye metally i mineraly-2016 : sb. tezisov dokl. VIII Mezhdunar. kongressa [Non-ferrous metals and minerals-2016: a collection of abstracts of the reports of the VIII International Congress]*. Krasnoyarsk, 2016, pp. 170–171.
31. V.V. Kondrat'ev et al. Nanostrukturny i alyuminiyevaya promyshlennost' [Nanostructures and aluminum industry]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015, No. 8, pp. 77–85.