



УДК 658.567.1

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).23-31

С. А. Небогин, В. О. Горовой, В. А. Ершов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация
 Дата поступления: 15 сентября 2018 г.

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАШИН ДЛЯ СИНТЕЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Данная статья посвящена способам переработки пыли, уносимой от рудотермических печей кремниевого производства. Проведен химический и гранулометрический анализ пыли уноса кремниевого производства. Рассмотрена возможность применения гравитационно-центробежной сепарации для получения целевых продуктов, таких как шарообразный диоксид кремния и наноструктурированный углерод. Сепарация пыли рукавных фильтров кремниевого производства на углеродную и микрокремнеземистую составляющую происходила на разработанном стенде, состоящем из пяти последовательно установленных гравитационно-центробежных пылеуловителей (циклонов). Частицы микрокремнезема, имея большую истинную плотность по сравнению с углеродными частицами, в большей степени подвергались влиянию центробежных сил во время прохождения циклона. Пылегазовый поток создавался при помощи компрессора и пыледозирующего устройства, включающего шнековый питатель и целевой затвор. Запыленность пылегазового потока 33 г/м^3 при производительности по сырью 1 кг/ч . В качестве сырья использовалась пыль печей, отобранная рукавными фильтрами из трубопровода, уносящего пылегазовый поток от печей кремния. Моделирование процесса гравитационно-центробежной сепарации показало возможность полного разделения частиц диоксида кремния и углерода. В результате серии испытаний удалось достичь повышения концентрации микрокремнезема с 93 % до 98 % с выходом продукта до 35 % по массе. Удалось добиться увеличения концентрации углеродной фракции с 6 % до 24 % с выходом продукта 10 %. Малая эффективность использования данного метода сепарирования возникает из-за механически связанных частиц диоксида кремния и углерода, разделение которых, вероятнее всего, возможно только химическими способами. Математические расчеты и результаты математического моделирования свидетельствуют о возможности увеличения выхода готового продукта в случае изменения геометрических размеров пылеулавливающих устройств и режимов работы тягодутьевого оборудования стенда.

Ключевые слова: диоксид кремния, наноструктурированный углерод, гравитационно-центробежная сепарация, пыль уноса, наносилика.

S. A. Nebogin, V. O. Gorovoy, V. A. Ershov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation
 Received: September 15, 2018

THEORY AND METHODS OF CREATING MACHINES FOR THE SYNTHESIS OF ENGINEERING MATERIALS

Abstract. This article deals with methods of processing of the dust carried away from ore-thermal furnaces of silicon production. Chemical and granulometric analysis of dust entrainment of silicon production is carried out. The possibility of application of gravity-centrifugal separation to obtain target products, such as spherical silicon dioxide and nanostructured carbon, is considered. Separation of dust from the silicon production bag filters in carbon and microsilica components took place on the developed stand that consisted of five consecutively mounted gravity-centrifugal dust collectors (cyclones). Microsilica particles, having a higher true density compared to carbon particles, were more exposed to the influence of centrifugal forces during the passage of the cyclone. The dust and gas flow was created with the help of a compressor and a dust-dosing device including a screw feeder and a slit gate. Dustiness of the dust and gas flow is 33 g/Nm^3 , with a performance of raw material of 1 kg/h . Dust from furnaces, collected by bag filters from the pipeline, carrying the dust and gas flow from the furnaces of silicon, was used as the raw materials. Simulation of the gravitational-centrifugal separation process showed the possibility of complete separation of silicon dioxide and carbon particles. As a result of a series of tests, it was possible to achieve an increase in the concentration of microsilica suspension from 93% to 98% with a product yield of up to 35% by weight. It was possible to increase the concentration of carbon fraction from 6% to 24% with a product yield of 10%. Low efficiency of using this method of separation occurs due to mechanically bound particles of silicon dioxide and carbon, the separation of which is most likely possible only by chemical methods. Mathematical calculations and the results of mathematical modeling indicate that it is possible to increase the yield of the finished product in the case of changes in the geometric dimensions of dust-collecting devices and the modes of operation of the draft equipment of the stand.

Keywords: silicon dioxide, nano-structured carbon, gravitational-centrifugal separation, fly ash, nanosilica.

Введение

Металлургическая промышленность ежегодно производит большое количество отходов различных видов и классов опасности. В послед-

ние годы наблюдается ужесточение природоохранного законодательства, что вынуждает предприятия разрабатывать методики и технологии уменьшения пагубного воздействия на окружаю-



шую среду. Помимо снижения экологической нагрузки, модернизация производства, направленная на снижение выбросов, может иметь заметный экономический эффект. Например, для снижения теплового загрязнения окружающей среды, алюминиевыми заводами разрабатываются различные конструкции теплообменных аппаратов, позволяющих снизить температуру газов, отводимых от электролизных ванн в атмосферу [1, 2]. Благодаря снижению температуры газов, уменьшается их физический объем, что позволяет использовать системы газоочистки меньшей производительности, а это значительно снижает затраты на их эксплуатацию. Другим примером получения экономической выгоды одновременно с улучшением экологической эффективности может служить переработка красных шламов, являющихся отходами с высоким классом опасности, однако содержащих в себе ряд дорогостоящих элементов [3–7]. В данной работе пойдет речь об установке, позволяющей эффективно перерабатывать один из отходов

кароботермического производства кремния – пыль, улавливаемую системами газоочистки.

Постановка задачи

При карботермическом производстве кремния основными отходами являются шлаки, углекислый газ и пыль, улавливаемая системами газоочистки. Пыль представляет собой частицы диоксида кремния, карбида кремния и углерода, причем размер частиц составляет от нанометров до десятых долей миллиметра. За год образуется порядка 42 тыс. тонн пыли, представляющей собой отходы 3–4-го класса, которая складывается на неопределенный срок на шламовых полях. Площадь шламовых полей неуклонно увеличивается, вместе с ней увеличиваются и затраты на эксплуатацию шламохранилищ и всей сопутствующей инфраструктуры.

Типичный гранулометрический состав пыли, улавливаемой на 1-й ступени очистки, представлен на рис. 1 и в табл. 1.

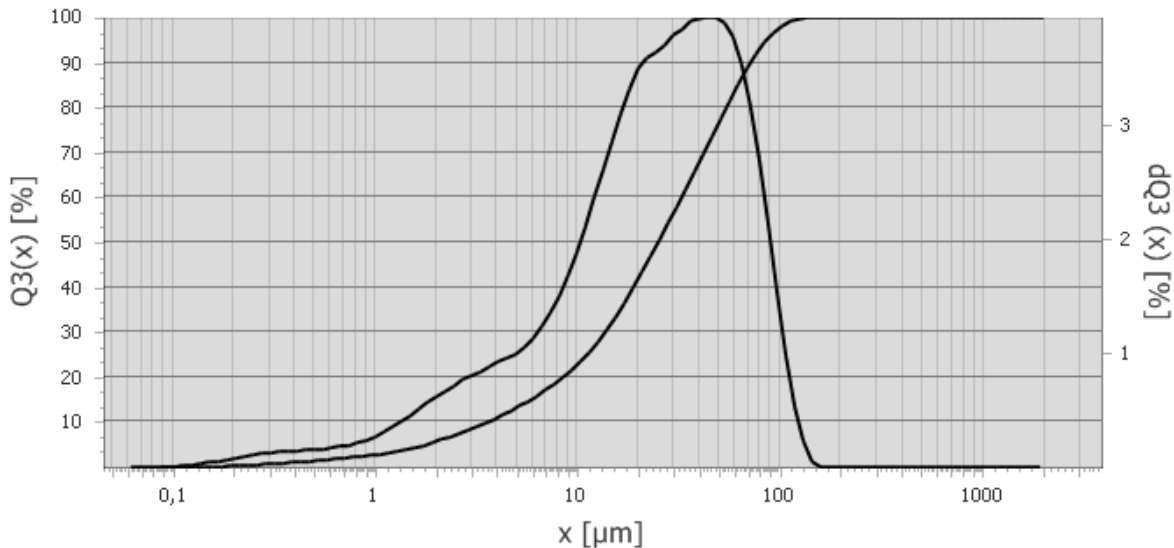


Рис. 1. Гранулометрический состав пыли, улавливаемой циклонами газоочистки кремниевого производства

Таблица 1

Дисперсный состав пыли предварительной очистки

Количество частиц в пробе, %	5	10	25	50	75	90	95	99	100
Размер, мкм	1,8	3,6	11,2	25,2	48,1	71,9	85,9	111,2	115,3

Пыль, уловленная циклонами, имеет следующий состав: диоксид кремния около 75 %, углерод около 15 %, карбид кремния и прочие примеси около 10 % по массе. Среди частиц диоксида кремния и углерода имеется большое количество аморфной фазы, представляющей экономическую ценность. Диоксид кремния с чистотой более 95 %, выделяемый из пыли циклонов, может быть использован в различных отраслях промышленно-

сти – от добавки в бетоны до модификаторов и флюсов в металлургической промышленности [8–17]. Аморфный углерод, представленный различными наноразмерными структурами, также имеет различные сферы применения – от модифицирования чугунов и сталей до добавок в различные сорта резины, лакокрасочные материалы и т. д. [18–20]. Наиболее эффективным способом выделения указанных выше продуктов из пыли циклонов является флотационное разделение. Флотация



частиц высокой дисперсности имеет ряд серьезных особенностей, которым посвящены работы [21–26]. Аппараты, технологии и режимы, приведенные в указанных работах, позволяют производить эффективное разделение частиц размерами от 200 нм, в отличие от классических методов флотации. Однако для более мелких частиц флотация остается малоэффективной.

Вторая ступень газоочистки кремниевого производства нацелена на улавливание частиц, не оседающих в циклонах-пылеуловителях, и обычно представлена электрофильтрами, рукавными фильтрами и т. д. Пыль, улавливаемая системой тонкой очистки, представляет большой экономический интерес. На рис. 2, полученном при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JVB-Z4500, видна сферическая форма частиц диоксида кремния. Гранулометрический анализ пыли тонкой очистки представлен на рис. 3 и в табл. 2.

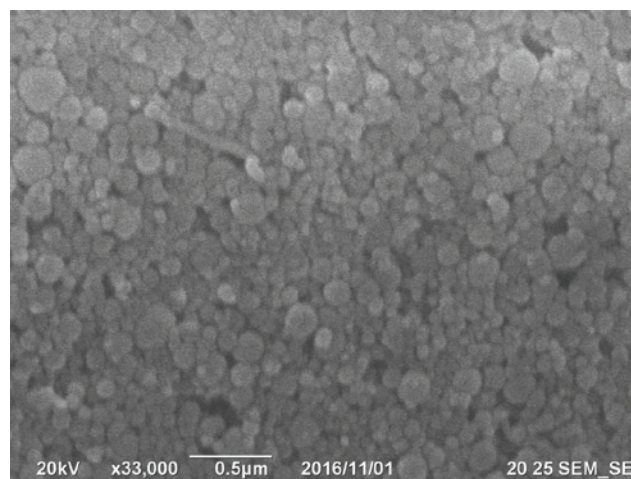


Рис. 2. Изображение пыли, уловленной системой тонкой газоочистки, полученное методом СЭМ

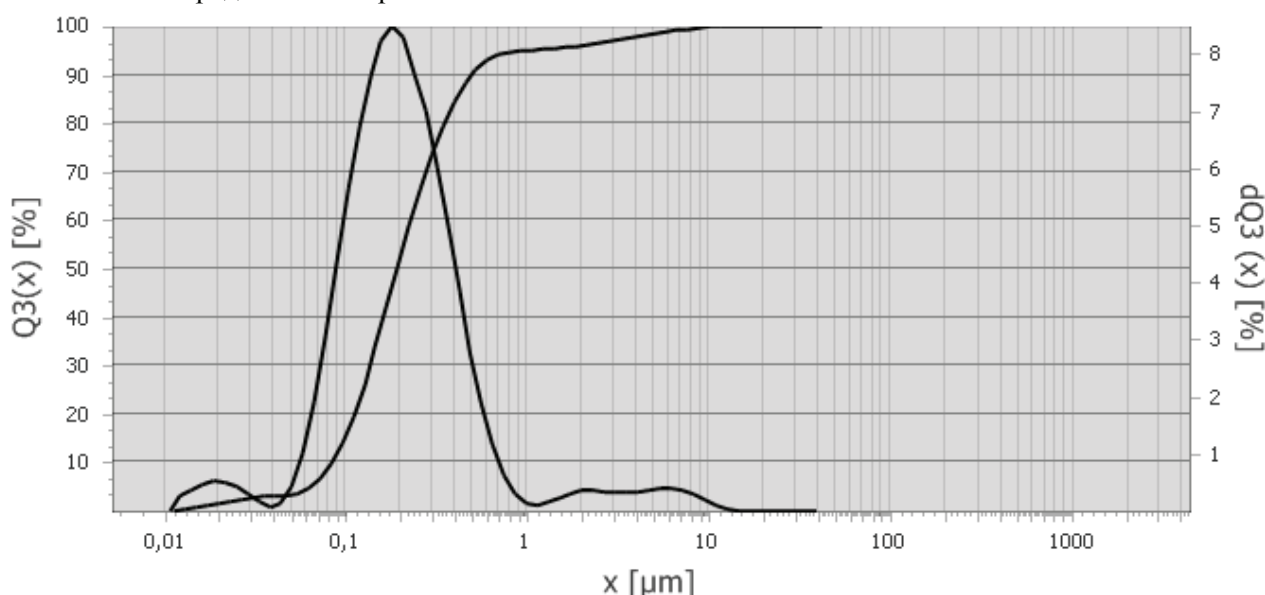


Рис. 3. Гранулометрический состав пыли, улавливаемой системой тонкой газоочистки кремниевого производства

Таблица 2

Дисперсный состав пыли тонкой очистки

Количество частиц в пробе, %	5	10	25	50	75	90	95	99	100
Размер, менее мкм	0,06	0,09	0,1	0,2	0,3	0,5	1	6,6	10,3

Более подробно применение наноразмерного диоксида кремния приведено в работах [8, 27–29].

Для дальнейшего использования пыли, улавливаемой системами тонкой очистки кремниевого производства, требуется обогащение до содержания диоксида кремния не менее 98 %.

Разработанные технические решения

Так как контакт с жидкостью и различными реагентами крайне отрицательно влияет на химическую активность и другие потребительские

свойства шаровидного диоксида кремния, наиболее подходящим способом обогащения является сухая сепарация.

Сепарация пыли рукавных фильтров кремниевого производства на углеродную и микрокремнеземистую составляющую происходила на стенде (рис. 4, 6), состоящем из пяти последовательно установленных гравитационно-центробежных пылеуловителей (циклонов) (рис. 5). Частицы микрокремнезема, имея боль-



шую истинную плотность по сравнению с углеродными частицами, в большей степени подвергались влиянию центробежных сил во время прохождения циклона. Запыленность пылегазового потока 33 г/м^3 при производительности по сырью 1 кг/ч . В качестве сырья использовалась пыль печей, отобранная рукавными фильтрами из трубо-

провода, уносящего пылегазовый поток от печей кремния. Моделирование процесса гравитационно-центробежной сепарации показало возможность полного разделения частиц диоксида кремния и углерода.

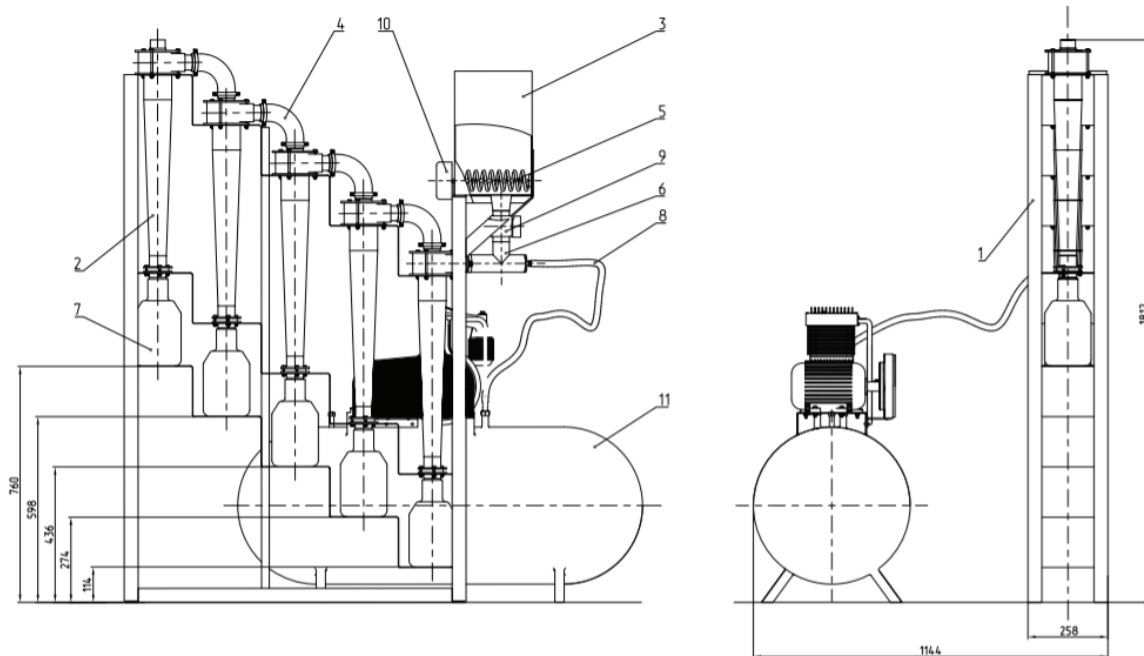


Рис. 4. Чертеж стенда сухой сепарации пыли печей производства кремния: 1 – рама; 2 – циклон; 3 – бункер загрузки; 4 – отвод гибкий; 5 – подающий шнек; 6 – камера смешивания воздушного потока с пылью; 7 – бункер циклона; 8 – рукав высокого давления; 9 – щелевой дозатор; 10 – электродвигатель; 11 – компрессор

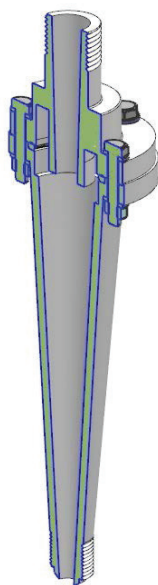


Рис. 5. Гравитационно-центробежный пылеуловитель (циклон)

Моделирование процесса сепарации продемонстрировало полное разделение углеродной и микрокремнеземистой части и было проведено со следующими допущениями:

- 1) температура моделируемой области неизменна, расчет и учет изменения температуры и соответствующих изменений свойств моделируемой среды не выполняется;
- 2) свойства моделируемой среды соответствуют воздуху при стандартных условиях;
- 3) влияние частиц микрокремнезема и углерода на свойства моделируемой среды не учитывается;
- 4) взаимодействие между частицами не учитывается;
- 5) прилипание частиц к стенкам сепаратора не учитывается;
- 6) частицы материала в исходном потоке распределены равномерно по сечению канала.

В результате проведенных опытов фактически наблюдалась следующая картина. Концентрация диоксида кремния повышалась у пыли, улавливаемой в первом и втором циклоне. Концентра-



ция углеродной составляющей повышалась в пыли, улавливаемой в третьем, четвертом и пятом циклоне. Полного разделения материала на диоксидную и углеродную фракцию не наблюдалось. Исследования просепарированного материала на электронном микроскопе позволяют говорить, что частицы углерода в пробе, отобранной из бункера первого циклона, находятся в основном на поверхности частиц диоксида кремния. Во время эксперимента наблюдалось налипание сырья на внутреннюю поверхность циклонов. Налипание материала связано с возникновением статического электричества вследствие трибоэлектризации пылевоздушного потока, а также с работой ван-дер-ваальсовых сил.

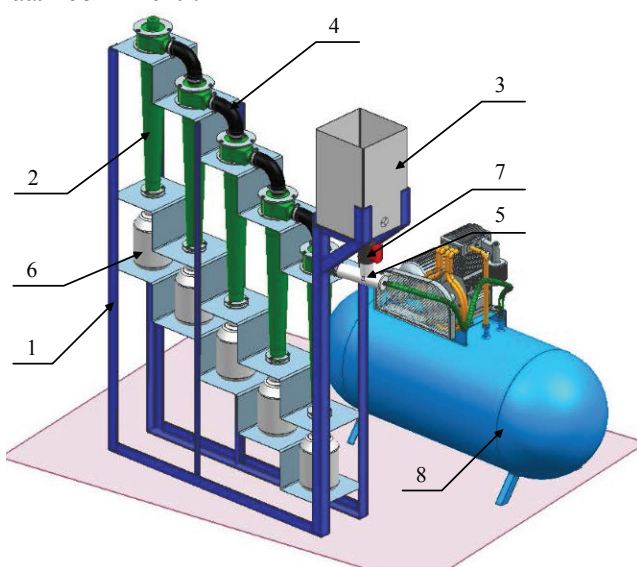


Рис. 6. Внешний вид стенда для сепарации пыли

Заключение

В результате серии испытаний удалось достичь повышения концентрации микрокремнезема с 93 % до 98 % с выходом продукта до 35 % по массе. Удалось добиться увеличения концентрации углеродной фракции с 6 % до 24 % с выходом продукта 10 %. Малая эффективность использования данного метода сепарирования возникает из-за механически связанных частиц диоксида кремния и углерода, разделение которых, вероятнее всего, возможно только химическими способами. Математические расчеты и результаты математического моделирования свидетельствуют о возможности увеличения выхода готового продукта в случае изменения геометрических размеров пылеулавливающих устройств и режимов работы тягодутьевого оборудования стенда.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Горовой В.О., Зимина Т.И. Лабораторные испытания кожухотрубчатого теплообменного устройства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 155-164.
2. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Колмогорцев И.В., Унагаев Е.И., Зимина Т.И. Оптимизация конструкции теплообменных элементов при проектировании теплообменного устройства // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 118-124.
3. Yolkin K.S., Yolkin D.K., Shtayger M.G., Kolosov A.D., Ivanov N.A. Technologies, which allow to reduce an impact of metal silicon production on the environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 411 conference proceedings. 2018. С. 012028.
4. Колосов А.Д. Анализ применения аморфного нанокремнезема // Байкал 2018 Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018. С. 85-91.
5. Кондратьев В.В., Колосов А.Д., Горовой В.О., Небогин С.А., Ёлкин К.С., Немаров А.А., Иванов А.А. Ресурсосберегающая технология получения нанокремнезема // МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО труды XX Международной научно-практической конференции: в 2 частях. 2017. С. 401-406.
6. Горовой В.О., Колосов А.Д., Балеева А.И. Извлечения фтористых солей из отработанной футеровки электролизера по производству алюминия // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов. Иркутский национальный исследовательский технический университет; Редакционная коллегия: Анциферов Е.А., Бельский С.С., Немчинова Н.В., Ёлшин В.В., Дьячкова С.Г., Половнева С.И., Подгорбунская Т.А., Ознобихин Л.М.. 2017. С. 175-178.
7. Колосов А.Д., Ершов В.А., Сысоев И.А. Технологические решения переработки фторсодержащих отходов алюминиевого производства // Экологические проблемы регионов Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 2017. С. 145-149.



8. Колосов А.Д., Немаров А.А., Небогин С.А. Технология получения и применения нано-кремнезема при производстве новых материалов для машиностроения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 59-66.
9. Иванчик Н.Н., Кондратьев В.В., Иванов Н.А., Карлина А.И. Изучение свойств тонкодисперсных отходов кремниевого производства методами электронной микроскопии // Сборник докладов VII международного Конгресса «Цветные металлы и минералы», 2015. С. 234-235.
10. Кондратьев В.В., Иванчик Н.Н., Петровская В.Н., Немаров А.А., Карлина А.И. Переработка и применение мелкодисперсных отходов кремниевого производства в строительстве // В сборнике: Олон Улсын Бетоны XIV БАГГА ХУРАЛ Материалы международного строительного симпозиума. 2015. С. 105-114.
11. Карлина А.И. Анализ современных и перспективных способов воздействия на природные и сточные воды // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 146-150.
12. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Надршин В.В., Карлина А.И. Подготовка и очистка природных и сточных вод // монография Иркутский государственный технический университет. Иркутск, 2014.
13. Карлина А.И. Разработка технологии подготовки отходов кремниевого производства для использования в черной металлургии // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации). 2018. С. 148-156.
14. Иванчик Н.Н., Балановский А.Е., Кондратьев В.В., Сысоев И.А., Карлина А.И. Расширение возможностей производства активирующих флюсов для дуговой сварки за счет использования ультрадисперсных продуктов переработки отходов кремния // Металлургия: технологии, инновации, качество. 2017. С. 300-305.
15. Ёлкин К.С., Ёлкин Д.К., Карлина А.И. О технологиях снижения влияния производств металлического кремния на окружающую среду // Металлургия: технологии, инновации, качество. 2017. С. 427-432.
16. Немаров А.А., Лебедев Н.В., Иванов Н.А., Карлина А.И., Иванов Н.Н., Горовой В.О. Применение аэрации при флотации наноразмерных частиц пыли газоочистки производства кремния // Цветные металлы и минералы. 2016. С. 168-169.
17. Кондратьев В.В., Немаров А.А., Иванов Н.А., Карлина А.И., Иванчик Н.Н. Теория и практика процессов флотационного обогащения нано-размерных сред // Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск, 2015.
18. Кондратьев В.В., Иванов Н.А., Балановский А.Е., Иванчик Н.Н., Карлина А.И. Улучшение свойств серого чугуна кремнийдиоксид и углеродными наноструктурами // Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 5. С. 671-685.
19. Карлина А.И., Балановский А.Е., Колосов А.Д., Ёлкин К.С., Левина С.В. Модификаторы на основе кремнийдиоксид и углеродных наноструктур для улучшения свойств серого чугуна // Байкал 2018. 2018. С. 104-108.
20. Ёлкин К.С., Иванов Н.А., Карлина А.И., Иванов Н.Н. Углеродные нанотрубки в производстве металлического кремния // Цветные металлы и минералы. 2015. С. 224-225.
21. Кондратьев В.В., Карлина А.И., Немаров А.А., Иванов Н.Н. Результаты теоретических и практических исследований флотации наноразмерных кремнийсодержащих структур // Техника и технологии, 2016, 9(5), С 657-670.
22. Карлина А.И. Изучение гидродинамики гравитационного обогащения полезных ископаемых // Вестник ИрГТУ. – Иркутск : Издательство ИрГТУ. 2015. № 3. С. 194-199.
23. Карлина А.И. Изучение структуры внутренних течений и волнового движения водного и взвешенного потока // Вестник ИрГТУ. – Иркутск: Издательство ИрГТУ. 2015. № 4. С. 137-145.
24. Nemařov A., Lebedev N., Kondrat'ev V., Kornyařov M., Karlina A.I. Theoretical and experimental research of parameters of pneumatic aerators and elementary cycle flotation // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. T. 11. № 20. С. 10222-10226.
25. Ершов В.А., Горовой В.О., Карлина А.И. Управление технологическим процессом переработки отходов кремниевого производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 114-121.
26. Кондратьев В.В., Иванов Н.А., Карлина А.И., Каргапольцев С.К. Автоматизированная система управления параметрами систем газоочистки технологических процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 90-94.
27. Kondratiev V.V., Govorkov A.S., Kolosov A.D., Gorovoy V.O., Karlina A.I. The development of a test stand for developing technological operation flotation and separation of md2. The deposition of nanostructures md1 produce nanostructures with desired properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 22. С. 12373-12377.
28. Kondratiev V.V., Nebogin S.A., Sysoev I.A., Gorovoy V.O., Karlina A.I. Description of the test stand for developing of technological operation of nano-dispersed dust preliminary coagulation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 22. С. 12809-12813.
29. Кондратьев В.В., Небогин С.А., Колосов А.Д., Горовой В.О., Немаров А.А., Иванов А.А., Запольских А.С. Возможности использования сухой сепарации микрокремнезема для получения целевых продуктов // МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО ТРУДА XX Международной научно-практической конференции: в 2 частях. 2017. С. 432-436.

REFERENCES

1. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Gorovoi V.O., Zimina T.I. Laboratornye ispytaniya kozhukhotrubchatogo teploobmennogo ustroystva [Laboratory tests of shell-and-tube heat exchanging device]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016, Vol. 20, No. 12 (119), pp. 155-164.
2. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Kolmogortsev I.V., Unagaev E.I., Zimina T.I. Optimizatsiya konstruktssii teploobmennykh elementov pri proektirovaniі teploobmennogo ustroystva [Optimization of the design of heat exchange elements in the design of heat exchange devices]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2016, No. 4 (32), pp. 118-124.
3. Yolkin K.S., Yolkin D.K., Shtayger M.G., Kolosov A.D., Ivanov N.A. Technologies, which allow reducing an impact of metal silicon production on the environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 411 conference proceedings*, 2018, pp. 012028.



4. Kolosov A.D. Analiz primeneniya amorfnoho nanokremnezema [Analysis of the use of amorphous nanosilicon]. *Baikal 2018. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Baikal 2018. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference], 2018, pp. 85-91.
5. Kondrat'ev V.V., Kolosov A.D., Gorovoi V.O., Nebogin S.A., Elkin K.S., Nemarov A.A., Ivanov A.A. Resursoberegayushchaya tekhnologiya polucheniya nanokremnezema [Resource-saving technology of nanosilica production]. *METALLURGIYA: TEKHNOLOGII, INNOVATSII, KACHESTVO. Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 chastyakh* [METALLURGY: TECHNOLOGIES, INNOVATIONS, QUALITY. Works of the XX International Scientific and Practical Conference: in 2 parts], 2017, pp. 401-406.
6. Gorovoi V.O., Kolosov A.D., Baleeva A.I. Izvlecheniya fluoristykh soley iz otrabotannoi futerovki elektrolizera po proizvodstvu aluminia [Extraction of fluoride salts from the spent lining of an aluminum production cell]. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh i mineral'nykh resursov Materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 55-letiyu kafedry avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov* [Prospects for the development of technology for the processing of hydro-carbon and mineral resources Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Department of Automation of Production Processes]. Irkutsk National Research Technical University. Editorial board: Antsiferov E.A., Bel'skii S.S., Nemchinova N.V., Elshin V.V., et al., 2017, pp. 175-178.
7. Kolosov A.D., Ershov V.A., Sysoev I.A. Tekhnologicheskie resheniya pererabotki ftorsoderzhashchikh otkhodov aluminievogo proizvodstva [Technological solutions for the processing of fluorine-containing aluminum production wastes]. *Ekologicheskie problemy regionov Sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Environmental problems of the regions. Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference], 2017, pp. 145-149.
8. Kolosov A.D., Nemarov A.A., Nebogin S.A. Tekhnologiya polucheniya i primeneniya nanokremnezema pri proizvodstve novykh materialov dlya mashinostroeniya [Technology of production and use of nanosilica in the production of new materials for mechanical engineering]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, No. 3 (55), pp. 59-66.
9. Ivanchik N.N., Kondrat'ev V.V., Ivanov N.A., Karlina A.I. Izuchenie svoystv tonkodispersnykh otkhodov kremnievogo proizvodstva metodami elektronnoi mikroskopii [Study of the properties of fine silicon waste produced by electron microscopy methods]. *Sbornik dokladov VII mezhdunarodnogo Kongressa «Tsvetnye metally i mineraly»* [Collection of reports of the VII International Congress "Non-Ferrous Metals and Minerals"], 2015, pp. 234-235.
10. Kondrat'ev V.V., Ivanchik N.N., Petrovskaya V.N., Nemarov A.A., Karlina A.I. Pererabotka i primeneniye melkodispersnykh otkhodov kremnievogo proizvodstva v stroitel'stve [Processing and application of fine silicon waste in construction]. *V sbornike: Olon Ulsyn Betony XIV BAGA KhURAL Materialy mezhdunarodnogo stroitel'nogo simpoziuma* [In the collection: Olon Ulsyn Concretes XIV BAGA KHURAL. Materials of the international construction symposium], 2015, pp. 105-114.
11. Karlina A.I. Analiz sovremennykh i perspektivnykh sposobov vozdeistviya na prirodnye i stochnye vody [Analysis of modern and promising ways of influencing natural and waste waters]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, No. 5 (100), pp. 146-150.
12. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Nadrshin V.V., Karlina A.I. Podgotovka i ochestka prirodnnykh i stochnykh vod. Monografiya [Preparation and purification of natural and waste waters: a monograph]. Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 2014.
13. Karlina A.I. Razrabotka tekhnologii podgotovki otkhodov kremnievogo proizvodstva dlya ispol'zovaniya v chernoii metallurgii [Development of technology for the preparation of waste silicon production for use in ferrous metallurgy]. *Zhiznennyi tsikl konstruktivnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)* [Life cycle of structural materials (from receipt to disposal)], 2018, pp. 148-156.
14. Ivanchik N.N., Balanovskii A.E., Kondrat'ev V.V., Sysoev I.A., Karlina A.I. Rasshirenie vozmozhnostei proizvodstva aktiviruyushchikh flyusov dlya dugovoi svarki za schet ispol'zovaniya ul'tradispersnykh produktov pererabotki otkhodov kremniya [Expanding the production of activating fluxes for arc welding through the use of ultrafine silicon waste processing products]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technology, innovation, quality], 2017, pp. 300-305.
15. Elkin K.S., Elkin D.K., Karlina A.I. O tekhnologiyakh snizheniya vliyaniya proizvodstv metallicheskogo kremniya na okruzhayushchuyu sredu [On technologies to reduce the impact of the production of metallic silicon on the environment]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technology, innovation, quality], 2017, pp. 427-432.
16. Nemarov A.A., Lebedev N.V., Ivanov N.A., Karlina A.I., Ivanov N.N., Gorovoi V.O. Primeneniye aeratsii pri flotatsii nanorazmernykh chastits pyli gazoochistki proizvodstva kremniya [The use of aeration in the flotation of nanosized dust particles from gas purification of silicon production]. *Tsvetnye metally i mineraly* [Non-ferrous metals and minerals], 2016, pp. 168-169.
17. Kondrat'ev V.V., Nemarov A.A., Ivanov N.A., Karlina A.I., Ivanchik N.N. Teoriya i praktika protsessov flotatsionnogo obogashcheniya nanorazmernykh sred [Theory and practice of flotation enrichment processes of nanoscale media]. Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 2015.
18. Kondrat'ev V.V., Ivanov N.A., Balanovskii A.E., Ivanchik N.N., Karlina A.I. Uluchsheniye svoystv serogo chuguna kremniidioksid i uglerodnymi nanostrukturami [Improving the properties of gray iron, silica and carbon nanostructures]. *Tekhnika i tekhnologii* [Engineering and Technologies], 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 671-685.
19. Karlina A.I., Balanovskii A.E., Kolosov A.D., Elkin K.S., Levina S.V. Modifikatory na osnove kremniidioksida i uglerodnykh nanostruktur dlya uluchsheniya svoystv serogo chuguna [Modifiers based on silicon dioxide and carbon nanostructures to improve the properties of gray iron]. *Baikal 2018*, 2018, pp. 104-108.
20. Elkin K.S., Ivanov N.A., Karlina A.I., Ivanov N.N. Uglerodnye nanotrubki v proizvodstve metallicheskogo kremniya [Carbon nanotubes in the production of metallic silicon]. *Tsvetnye metally i mineraly* [Non-ferrous metals and minerals], 2015, pp. 224-225.
21. Kondrat'ev V.V., Karlina A.I., Nemarov A.A., Ivanov N.N. Rezul'taty teoreticheskikh i prakticheskikh issledovaniy flotatsii nanorazmernykh kremniisoderzhashchikh struktur [The results of theoretical and practical studies of flotation of nanoscale silicon-containing structures]. *Tekhnika i tekhnologii* [Engineering and Technologies], 2016, 9(5), pp. 657-670.
22. Karlina A.I. Izuchenie gidrodinamiki gravitatsionnogo obogashcheniya poleznykh iskopaemykh [Study of the hydrodynamics of gravitational enrichment of minerals]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2015, No. 3, pp. 194-199.



23. Karlina A.I. Izuchenie struktury vnutrennikh techenii i volnovogo dvizheniya vodnogo i vzvesenesushchego potoka [Study of the structure of internal currents and wave motion of a water and a suspended flow]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*. Irkutsk: IrGTU Publ., 2015, No. 4, pp. 137-145.

24. Nemarov A., Lebedev N., Kondrat'ev V., Korniyakov M., Karlina A.I. Theoretical and experimental research of parameters of pneumatic aerators and elementary cycle flotation [Theoretical and experimental cycle flotation]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, Vol. 11, No. 20, pp. 10222-10226.

25. Ershov V.A., Gorovoi V.O., Karlina A.I. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami pererabotki otkhodov kremnievogo proizvodstva [Management of the technological process of recycling silicon production]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2016, No. 4 (52), pp. 114-121.

26. Kondrat'ev V.V., Ivanov N.A., Karlina A.I., Kargapol'tsev S.K. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya parametrami sistem gazoochistki tekhnologicheskikh protsessov [Automated system for controlling the parameters of gas purification systems of technological processes]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2017, No. 2 (54), pp. 90-94.

27. Kondrat'ev V.V., Govorkov A.S., Kolosov A.D., Gorovoy V.O., Karlina A.I. The development of a test stand for developing technological operation flotation and separation of md2. The deposition of nanostructures md1 produce nanostructures with desired properties. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No. 22, pp. 12373-12377.

28. Kondrat'ev V.V., Nebogin S.A., Sysoev I.A., Gorovoy V.O., Karlina A.I. Description of the test stand for developing of technological operation of nano-dispersed dust preliminary coagulation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No. 22, pp. 12809-12813.

29. Kondrat'ev V.V., Nebogin S.A., Kolosov A.D., Gorovoi V.O., Nemarov A.A., Ivanov A.A., Zapol'skikh A.S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya sukhoi separatsii mikrokremnezema dlya polucheniya tselevykh produktov [Possibilities of using dry separation of microsilica for obtaining target products]. *METALLURGIYA: TEKHNologii, INNOVATSII, KACHESTVO. Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 chastyakh [METALLURGY: TECHNOLOGIES, INNOVATIONS, QUALITY. Works of the XX International Scientific and Practical Conference: in 2 parts]*, 2017, pp. 432-436.

Информация об авторах

Authors

Небогин Сергей Андреевич - аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: s.a.nebo@yandex.ru

Горовой Валерий Олегович - инженер НИЧ, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: 123valera321@gmail.com

Ершов Владимир Александрович - доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: ershov@istu.edu

Nebogin Sergei Andreevich – Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: s.a.nebo@yandex.ru

Gorovoi Valerii Olegovich – RD engineer, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: 123valera321@gmail.com

Ershov Vladimir Aleksandrovich – Assoc. Prof. at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: ershov@istu.edu

Для цитирования

Небогин С. А. Теория и методы создания машин для синтеза машиностроительных материалов / С. А. Небогин, В. О. Горовой, В. А. Ершов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 60, № 4. - С. 23–31. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).23-31

For citation

Nebogin S. A., Gorovoi V. O., Ershov V. A. Teoriya i metody sozdaniya mashin dlya sinteza mashinostroitel'nykh materialov [Theory and methods of creating machines for the synthesis of engineering materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2018, Vol. 60, No. 4, pp. 23–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).23-31

УДК 621.373

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).31-38

В. И. Шастин¹, С. К. Каргапольцев¹, А. Г. Пермяков²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский релейный завод, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 18 сентября 2018 г.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам исследования трибологических показателей модифицированного поверхностного слоя деталей машин по большинству видов контактирования фрикционных элементов, применяемых в машиностроении. Представлены варианты лабораторного триботехнического оборудования для оценки влияния различных видов поверхностного модифицирования на механизм изнашивания. Приводятся конструктивные особенности, основные технические характеристики оборудования и методические рекомендации исследовательского характера для разнообразных видов изнашивания, таких как контактное трение скольжения, пара трения «кольцо – гильза цилиндра» и сопряжение «вал – подшипник скольжения». Конструкция оборудования предусматривает возможность проведения испытаний при различных уровнях