

## МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИИ КАМЕРНОГО ПРОДУКТА ПОСЛЕ ФЛОТАЦИИ ПЫЛИ ЦИКЛОНА КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.Н. Петровская, В.В. Кондратьев, А.А. Петровский

Валентина Никитична Петровская \*, Виктор Викторович Кондратьев, Алексей Анатольевич Петровский  
Отдел инновационных технологий, Физико-технический институт, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Российская Федерация, 664074  
E-mail: valent-nikit@yandex.ru \*, kvv@istu.edu, begimotus@mail.ru

*Сфероидальный микрокремнезем обладает большой удельной поверхностью. Это делает его незаменимым в производстве композитных материалов: строительных смесей, красок, резин, адсорбентов и др. В процессе исследования свойств пыли, образующейся при производстве кремния, установлено, что практически весь кварцит, уносимый в виде тонкой пылевой фазы в систему газоудаления и газоочистки, представлен сфероидизированными микро- и наночастицами  $\text{SiO}_2$  с примесью углерода, который неизменно присутствует также в тонкодисперсном состоянии. Одним из способов извлечения углерода и аморфного оксида кремния из пыли циклона является флотация. В результате флотации получили 29% песковой фракции, 40% пенного продукта, обогащенного углеродом, и 31% камерного продукта, обогащенного  $\text{SiO}_2$ . В работе показано, что целевые нанодисперсии аморфного кремнезема из камерного продукта после флотации можно извлекать с помощью электрокоагуляции. Получена зависимость массы коагулята от плотности тока на алюминиевых электродах при электрокоагуляции камерного продукта. Установлено, что при действии тока на исследуемую систему происходит растворение металла катода и анода. Показан механизм электрокоагуляции. Камерный продукт представляет собой устойчивую тонкодисперсную взвесь  $\text{SiO}_2$  с pH 8-9. Поскольку поверхность кремнезема гидрофильна, на ней адсорбируются  $\text{OH}^-$  и заряжают поверхность дисперсной частицы отрицательно. В результате электрохимического и химического растворения алюминиевых электродов образующаяся гидроокись алюминия имеет положительный заряд. Разноименные частицы слипаются, вследствие чего увеличиваются их размеры, происходит коагуляция, а затем и осаждение. Установлено, что электрокоагуляцией можно извлекать не менее 52,41 % (масс.) сфероидального микрокремнезема.*

**Ключевые слова:** сфероидальный микрокремнезем, флотация, камерный продукт, коагулят, электрокоагуляция, плотность тока

## MECHANISM OF ELECTROCOAGULATION OF CHAMBER PRODUCT AFTER FLOTATION OF CYCLONE DUST OF SILICON PRODUCTION

V.N. Petrovskaya, V.V. Kondrat'ev, A.A. Petrovskiy

Valentina N. Petrovskaya \*, Viktor V. Kondrat'ev, Alexey A. Petrovskiy  
Department of Innovative Technologies, Physical-Technical Institute, Irkutsk National Research Technical University, Lermontov st., 83, Irkutsk, 664074, Russia  
E-mail: valent-nikit@yandex.ru \*, kvv@istu.edu, begimotus@mail.ru

*Spheroidal micro silica has a large specific-surface. This makes it indispensable for the manufacture of composite materials: construction mixtures, paints, rubber, adsorbents, etc. In the process of studying the properties of dust formed in the production of silicon, it was established that practically all of the quartzite carried away in the form of a fine dust phase into the gas removal*

*and gas cleaning system is represented by spheroidized micro- and nanoparticles of SiO<sub>2</sub> with a carbon impurity that is invariably present also in the finely dispersed state. One of the ways to extract carbon and amorphous silicon oxide from the dust cyclone is flotation. As a result of flotation, 29% of the sand fraction, 40% of the foam product enriched carbon, and 31% of the chamber product enriched SiO<sub>2</sub> were obtained. It is shown that the target nanofraction of amorphous silica from the chamber product after flotation can be extracted by electrocoagulation. The dependence of the mass of the coagulum on the current density on aluminum electrodes was obtained during electrocoagulation of the chamber product. It is established that under the action of current on the system under investigation, the metal of the cathode and the anode dissolve. The mechanism of electrocoagulation is shown. The chamber product is a stable finely dispersed SiO<sub>2</sub> suspension with a pH of 8-9. Since the surface of the silica is hydrophilic, OH<sup>-</sup> is adsorbed on it and the surface of the dispersed particle is charged negatively. As a result of electrochemical and chemical dissolution of aluminum electrodes, the aluminum hydroxide formed has a positive charge. The different particles stick together, as a result of which their dimensions increase, coagulation takes place, and then precipitation occurs.*

**Key words:** spheroidal micro silica, flotation, chamber product, flocculation, electrocoagulation, current density

**Для цитирования:**

Петровская В.Н., Кондратьев В.В., Петровский А.А. Механизм электрокоагуляции камерного продукта после флотации пыли циклона кремниевого производства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 10. С. 68–74

**For citation:**

Petrovskaya V.N., Kondrat'ev V.V., Petrovskiy A.A. Mechanism of electrocoagulation of chamber product after flotation of cyclone dust of silicon production. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 10. P. 68–74

**ВВЕДЕНИЕ**

Аморфный кремнезем является многоцелевым материалом и применяется в различных отраслях промышленности. Особого внимания заслуживает сфероидальный микрокремнезем, который обладает большой удельной поверхностью. Это делает его незаменимым в производстве композитных материалов: строительных смесей, красок, резин, адсорбентов и др. [1, 2].

В процессе исследования свойств пыли, образующейся при производстве кремния, установлено, что практически весь кварцит, уносимый в виде тонкой пылевой фазы в систему газоудаления и газоочистки, представлен сфероидизированными микро- и наночастицами SiO<sub>2</sub> (52,55%). Состав ис-

следуемой пыли определен рентгенофлуоресцентным методом на приборе S-4 Pioneer (табл. 1).

В результате флотации получили 29% песковой фракции, 40% пенного продукта, обогащенного углеродом, и 31% камерного продукта, обогащенного SiO<sub>2</sub>. Химический состав камерного продукта после флотации, определенный на приборе S-4 Pioneer, представлен в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что камерный продукт содержит в своем составе 75,12% SiO<sub>2</sub> и 22,04% углерода.

На рис. 1 представлена микрочастица камерного продукта, которая состоит из наночастичек кремнезема. Фото получено на сканирующем электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500.

**Таблица 1**

**Состав исходной пыли циклона кремниевого производства, % (масс.)**

**Table. 1. The composition of the initial dust of cyclone of silicon production, % (mass.)**

C	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
44,59	52,55	0,086	0,165	0,295	0,059	0,947	0,255	0,841	0,01	0,0172	0,157

**Таблица 2**

**Химический состав камерного продукта, % (масс.)**

**Table. 1. The chemical composition of the chamber product, % (mass.)**

C	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
22,04	75,12	0,252	0,182	0,746	0,061	0,238	0,017	0,209	0,448	0,0064	0,015	0,629

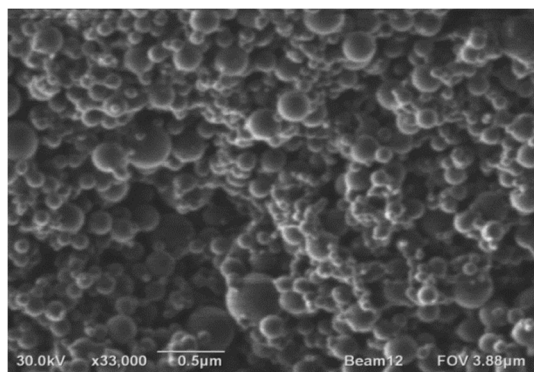


Рис. 1. Камерный продукт (нанопартики кремнезема)  
Fig. 1. Camer product (silica nano balloons)

Осаждение взвеси наночастиц в обычных условиях требует значительных временных затрат и объемных емкостей. Слив неотстаивающихся пульп в систему канализации вследствие высокого канцерогенного действия наночастиц на растительность и живые организмы приводит к высокой вероятности экологических и санитарно-эпидемиологических штрафов. Доказана взаимосвязь между мутациями растений и возникновением раковых заболеваний у живых организмов при наличии в потребляемой воде взвесей наночастиц [1].

Предметом исследования в настоящей работе является камерный продукт после флотации пыли циклона и шлама кремниевого производства.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Одним из способов извлечения углерода и аморфного оксида кремния из пыли циклона является флотация [3]. Флотация – процесс разделения мелких твердых частиц, основанный на различии их поверхностных свойств.

Гидрофобные (плохо смачиваемые водой) частицы избирательно закрепляются на границе раздела фаз, обычно газа и воды, и отделяются от гидрофильных (хорошо смачиваемых водой) частиц. При флотации пузырьки газа или капли масла прилипают к плохо смачиваемым водой частицам и поднимают их к поверхности (пенный продукт) а гидрофильные частицы оседают (камерный продукт) [3].

В практике потери агрегативной устойчивости добиваются с помощью процесса коагуляции (слипания). Коагуляция дисперсных систем может происходить под действием ряда факторов (старения системы, изменения состава дисперсной системы, изменения температуры, механических воздействий, добавления электролитов, действия электрического тока и т. д.). Коагуляция под действием электрического тока – электрокоагуляция.

Электрокоагуляция как метод превращения примесей коллоидной (нанодисперсной) степени дисперсности до грубодисперсного состояния основывается на множестве физико-химических процессов, протекающих в жидкости под воздействием электрического тока. Процесс электрокоагуляции подчиняется законам Фарадея [4, 5].

После флотационного разделения пыли циклона кремниевого производства камерный продукт содержит 100-125 г/дм<sup>3</sup> твердой фазы и представляет собой устойчивую тонкодисперсную взвесь (золь) с рН=8,74-8,36, время жизни которой несколько месяцев.

Целью настоящего исследования является изучение процесса электрокоагуляции при осаждении камерного продукта.

Работу проводили на установке, изображенной на рис. 2.

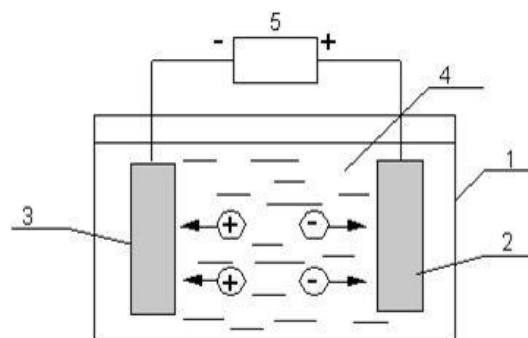


Рис. 2. Схема установки: 1 – ячейка; 2 – анод; 3 – катод; 4 – межэлектродное пространство; 5 – источник постоянного тока GwinstekGPD -73303D  
Fig. 2. Set up diagram: 1 – cell; 2 – anode, 3 – cathode, 4 – inter electrode gap; 5 – DC source GwinstekGPD -73303D

Ячейкой служил пластмассовый стакан объемом 100 мл. Electroдами – алюминиевые пластины (технический алюминий) с рабочей поверхностью 4 см<sup>2</sup>, расстояние между электродами составляло 1см. Обработка током проводилась в течение 10 мин. Electroды перед каждым опытом взвешивали. После проведения электролиза скоагулированную взвесь оставляли на 60 мин, при этом на аноде наблюдали рыхлый осадок (рис. 3). Electroд с осадком сушили при 150 °С, затем взвешивали на аналитических весах, отмывали осадок мягкой губкой, промывали дистиллированной водой, вновь сушили и взвешивали. После 60 мин седиментации отделяли условно чистый слой от коагулята. Коагулят помещали в чашку, сушили и взвешивали.

Таким образом, контролировали вес электродов до и после опыта, массу осадка на аноде и массу коагулята.



Рис. 3. Осадок на алюминиевом аноде  
Fig. 3. Precipitate on aluminum anode

В табл. 3 представлен состав рыхлого осадка, образующегося на поверхности анода при электролизе.

Таблица 3

Элементный состав осадка на алюминиевом аноде, % (масс.)

Table 3. The elemental composition of the precipitate on the aluminum anode, % (mass.)

Al	C	O	Si	Cu	Au	Mg	Mn	Ag	Fe
71,88	10,89	7,35	1,77	2,91	3,24	0,40	0,53	0,85	0,18

Состав осадка определяли на сканирующем электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500 с помощью энергодисперсионного детектора X-max 80 мм<sup>2</sup> фирмы OXFORD INSTRUMENTS, снабженного дополнительной установкой анализатора EDS (энергодисперсионный рентгеновский спектрометр).

Основным компонентом этого осадка является алюминий (71,88 % (масс.)). Это количество алюминия не принимает участие в коагуляции.

Черный цвет осадка определяется присутствием углерода (рис. 3). Наличие Cu и Au связано с техническими особенностями электронной микроскопии (медный столик, напыление пробы золотом).

Время обработки током определяли экспериментально. В нашем случае оно составило 10 мин. При большем времени происходило разогревание системы до 50 °С.

На рис. 4 представлена зависимость силы тока от напряжения. При напряжении выше 40 В начинается заметный рост величины тока. Это, вероятнее всего, свидетельствует о том, что при этих условиях происходит разрушение оксидного слоя и становится возможным химическое взаимодействие алюминия с водой. Проявляется отрицательный дифференц – эффект (ОДЭ) – увеличение скорости растворения алюминиевого анода по сравнению с теоретической при анодной поляризации вследствие химического взаимодействия алюминия с водой после разрушения защитной оксидной

пленки или перехода его в раствор в низших степенях окисления с последующим химическим доокислением [6].

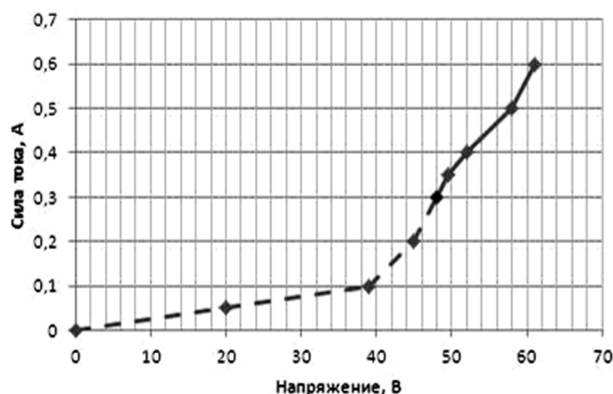


Рис. 4. Зависимость силы тока от напряжения  
Fig. 4. The dependence of the current on the voltage

Плотность тока является мерой скорости электродных процессов. Зависимость массы коагулята на аноде от плотности тока представлена на рис. 5.

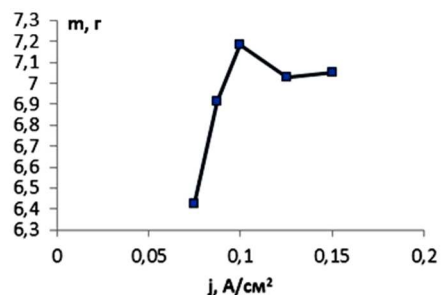


Рис. 5. Зависимость массы коагулята от плотности тока  
Fig. 5. The dependence of the coagulate mass on current density

Эта зависимость экстремальна. Максимум массы коагулята приходится на плотность тока, равную 0,1 А/см<sup>2</sup>, этой же плотности тока соответствует максимальное количество растворенного анода – 0,0502 г (табл. 4). В рыхлом осадке содержится 71,88% (масс.) алюминия (табл. 3), который не участвует в процессе коагуляции. В единицах массы это составит 0,0502·0,7188 = 0,0361 г. Коагуляцию вызывает Al(OH)<sub>3</sub>. В процессе коагуляции будет участвовать 0,0502 – 0,0361 = 0,0141 г алюминия, который, согласно стехиометрии, превратится в 0,0408 г Al(OH)<sub>3</sub> и в форме взвеси будет участвовать в коагуляции кремнезема.

При увеличении плотности тока уменьшается выход по току и масса коагулята. Вероятнее всего, это связано с тем, что при повышении плотности увеличивается скорость выделения кислорода и идет пассивация анода. Об этом же свидетельствует уменьшение выхода по току (табл. 4),

который становится меньше 1, и уменьшение массы осадка на аноде и массы коагулята.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электрокоагуляция основана на законах электролиза. В свою очередь электролиз состоит в выделении вещества из электролита на электроде, в растворении вещества электрода и в изменении состава электролита вблизи поверхности электрода. Для количественных оценок необходимы следующие электрохимические данные [7]:

$m_1$  – масса электрода до коагуляции,

$m_2$  – масса электрода после коагуляции,

$m_{\text{теор}}$  – масса растворенного алюминия, рассчитанная по закону Фарадея,

$$m = \frac{M}{z \cdot F} I \cdot t,$$

$m_{\text{эспер}}$  – разность между массой электрода до и после коагуляции,

$m_{\text{коаг}}$  – масса коагулята,

$\sum m$  – суммарная масса, растворенного катода и анода,

$m_{\text{ос}}$  – масса осадка на алюминиевом аноде,

$I$  – сила тока, А

$i$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>

$z$  – количество электронов, участвующих в электродном процессе,

$M$  – молярная масса,

$F$  – число Фарадея, равное 96500 Кл·моль<sup>-1</sup>

$\eta$  – выход по току,

$$\eta = \frac{m_{\text{эспер}}}{m_{\text{теор}}}$$

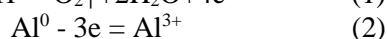
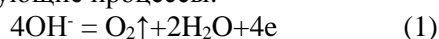
Данные, характеризующие процессы, протекающие на аноде и катоде, представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Электрохимические данные для анодного процесса  
Table 4. Electrochemical data for the anodic process

№	I, А	i, А/см <sup>2</sup>	$m_1$ , г	$m_2$ , г	$m_{\text{экс}}$ , г	$m'_{\text{теор}}$ , г	$\eta$ , д.е.	$m_{\text{коаг}}$ , г	$m_{\text{ос}}$ , г
1	0,30	0,0750	3,2306	3,2109	0,0197	0,0167	1,173	6,4254	0,0358
2	0,35	0,0875	3,2109	3,1873	0,0236	0,0195	1,204	6,9158	0,0407
3	0,40	0,1000	3,1873	3,1371	0,0502	0,0223	2,242	7,1820	0,1053
4	0,50	0,1250	3,1371	3,1123	0,0248	0,0279	0,886	7,0303	0,0161
5	0,60	0,1500	3,1123	3,0818	0,0305	0,0335	0,908	7,0530	нет

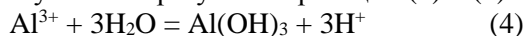
Согласно литературным данным [5, 6], на алюминиевом аноде в водных щелочных растворах протекают следующие процессы:



Высокий выход по току  $\eta > 1$  (табл. 4) – проявление ОДЭ. Отсутствие фарадеевского соответствия между количеством продуктов растворения и прошедшим через электродную систему количеством электричества в условиях анодной поляризации в водных средах сопровождается процессом саморастворения металла с выделением водорода [7]. Наряду с электрохимическим процессом (реакция 2) также происходит химическое взаимодействие алюминия с водой с выделением водорода (реакция 3).



Тогда гидроокись алюминия в анодном пространстве получается в результате реакций (3) и (4).



В табл. 5 представлены электрохимические данные для катодного процесса.

На катоде в щелочных растворах, где концентрация  $\text{H}_3\text{O}^+$  ничтожно мала, разряд протекает непосредственно из молекул воды по схеме:

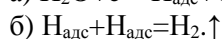
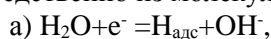


Таблица 5

Электрохимические данные для катодного процесса  
Table 5. The data for the cathodic electrochemical process

№	I, А	i, А/см <sup>2</sup>	$m_1$	$m_2$	$m_{\text{эспер}}$	$\sum m$
1	0,30	0,0750	3,3125	3,3091	0,0034	0,0231
2	0,35	0,0875	3,3091	3,3072	0,0019	0,0255
3	0,40	0,1000	3,3072	3,2974	0,0098	0,0600
4	0,50	0,1250	3,2974	3,2848	0,0126	0,0374
5	0,60	0,1500	3,2848	3,2669	0,0179	0,0484

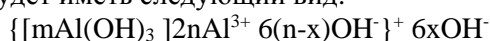
Из табл. 5 следует, что масса алюминиевого катода тоже уменьшается. В результате подщелачивания прикатодного оксидного слоя становится возможным химическое взаимодействие катодного алюминия с водой [6].

Из представленных данных видно (табл. 4 и табл. 5), что анод и катод теряют вес. Потеря массы анода – закономерный электрохимический процесс, а потерю массы катода, вероятнее всего, необходимо связывать с химическим растворением катода.

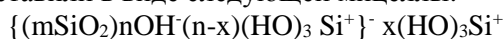
Суммарная масса растворенного алюминия (электрохимически и химически) представлена в табл. 5. Наибольшая масса растворенного алюминия приходится на плотность тока 0,1 А/см<sup>2</sup>. Этой же плотности тока соответствует самый высокий анодный выход по току ( $\eta = 2,242$ ), и самая высокая коагулирующая способность (наибольшая масса коагулята).

При повышении плотности тока, вероятнее всего, лимитирующей становится реакция (1), в результате которой увеличивается количество кислорода, выделяющегося на аноде. Это приводит к пассивации его и, соответственно, к уменьшению скорости растворения алюминия. При этом прекращается химическое растворение анода. Свидетельством этого факта является уменьшение массы осадка на алюминиевом аноде и резкое уменьшение выхода по току ( $\eta < 1$ ) (табл. 4).

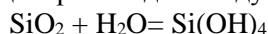
Выше рассмотрены механизмы образования  $Al(OH)_3$  в катодном и анодном пространстве. Известно, что гидроокись алюминия нерастворима в воде и частицы гидроокиси алюминия заряжены положительно. Тогда мицелла гидроокиси алюминия будет иметь следующий вид:



Камерный продукт представляет устойчивую тонкодисперсную взвесь  $SiO_2$  с pH 8-9. Структура этой дисперсной системы в щелочной среде мы представили в виде следующей мицеллы:



По данным Айлера [9] на поверхности дисперсной частицы происходит следующая реакция:



В процессе диссоциации:



Поскольку поверхность кремнезема гидрофильна, на ней будут адсорбироваться  $OH^-$  и заряжать поверхность дисперсной частицы отрицательно. Таким образом, заряд нашей дисперсной фазы отрицателен.

Образующаяся в результате электрохимического и химического растворения алюминиевых электродов гидроокись алюминия имеет положительный заряд. Происходит слипание разноименных частиц, вследствие чего увеличиваются размеры частиц, происходит коагуляция, а затем и осаждение.

Исследуемый камерный продукт содержит  $100 \text{ г/дм}^3$  твердой фазы, в  $100 \text{ см}^3$  содержится  $10 \text{ г}$  твердой фазы. После электрокоагуляции масса коагулята составляет  $7,18 \text{ г}$  (рис. 5), т. е. извлечение составляет  $71,8\%$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черных А.Е., Зельберг Б.И., Школьников А.Р., Гринберг А.И., Баймашев Д.З., Школьников М.Р., Пологов Е.Ю., Громов С.Б. Справочник металлурга. Производство кремния. СПб.: Изд-во МАНЭБ. 2004. 555 с.
2. Иванчик Н.Н., Петровская В.Н., Кондратьев В.В., Немаров А.А. Исследование и разработка процессов выделения целевых продуктов из мелкодисперсных отходов кремниевого производства. *Системы. Методы. Технологии*. 2015. Т. 26. № 2. С. 133-137.

В табл. 6 представлен элементный состав коагулята, выполненный на электронном микроскопе.

Таблица 6

Элементный состав коагулята, % (масс.)

Table 6. Elemental composition of coagulate, % (mass.)

O	Si	C	Al	Fe	Au	Ca	Mg	Cu	K
51,82	34,07	6,53	1,86	1,09	3,52	0,47	0,16	0,34	0,15

В коагуляте содержится  $34,07\%$  (масс.) Si (табл. 6), что в пересчете на окисел составит  $73,0\%$  (масс.)  $SiO_2$ . Следовательно, электрокоагуляцией можно извлекать не менее  $52,41\%$  (масс.) сфероидального микрокремнезема. В исходном продукте, с которым проводились исследования, содержалось  $52,55\%$  (масс.)  $SiO_2$ . По данным [2] в зависимости от технологических особенностей производства может содержаться до  $85\%$  (масс.)  $SiO_2$ .

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, целевые нанодисперсии аморфного кремнезема из камерного продукта после флотации можно извлекать с помощью электрокоагуляции. Получена зависимость массы коагулята от плотности тока на алюминиевых электродах при электрокоагуляции камерного продукта. Установлено, что при действии тока на исследуемую систему происходит растворение металла катода и анода. Показан механизм электрокоагуляции.

Установлено, что электрокоагуляцией можно извлекать не менее  $52,41\%$  (масс.) сфероидального микрокремнезема.

*Статья подготовлена 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.*

#### REFERENCES

1. Chernykh A.E., Zel'berg B.I., Shkol'nikov A.R., Grinberg A.I., Baiymashev D.Z., Shkol'nikov M.R., Pologov E.Yu., Gromov S.B. Handbook of the Metallurgist. The production of silicon. SPb.: Publishing house of MANEB. 2004. 555 p. (in Russian).
2. Ivanchik N.N., Petrovskaya V.N., Kondrat'ev V.V., Nemarov A.A. Research and development of targeting processes for fine waste of silicon production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2015. V. 26. N 2. P. 133-137 (in Russian).

3. **Кондратьев В.В., Немаров А.А., Иванов Н.А., Карлина А.И., Иванчик Н.Н.** Теория и практика процессов флотационного обогащения наноразмерных сред: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2015. 160 с.
4. **Фролов. Ю.Г.** Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия. 2009. 464 с.
5. **Яковлев С.В., Краснобородко И.Г., Рогов В.М.** Технология электрохимической очистки воды. Л.: Стройиздат. 1987. 312 с.
6. **Жук Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgy. 1976. 472 с.
7. **Стромберг А.Г., Семченко Д.П.** Физическая химия. М.: Высш. шк. 1988. 496 с.
8. **Колотыркин Я.В., Флорианович Г.М.** Аномальные явления при растворении металлов. *Итоги науки и техники. Электрохимия*. 1971. Т. VII. С. 5-64.
9. **Тайлер Р.** Химия кремнезема. Ч. 2. М.: Мир. 1982. 712 с.
3. **Kondrat'ev V.V., Nemarov A.A., Ivanov N.A., Karlina A.I., Ivanchik N.N.** Theory and practice of the process of flotation enrichment of nanoscale environments: monograph. Izd-vo IRNITU. 2015. 160 p. (in Russian).
4. **Frolov. Yu.G.** Course of colloid chemistry. Surface phenomena and dispersion system. M.: Khimiya. 2009. 464 p. (in Russian).
5. **Yakovlev S.V., Krasnoborodko I.G., Rogov V.M.** Technology of electrochemical water treatment. L.: Stroyizdat. 1987. 312 p. (in Russian).
6. **Zhuk N.P.** Course of the theory of corrosion and protection of metals. M.: Metallurgy. 1976. 472 p. (in Russian).
7. **Stromberg A.G., Semchenko D.P.** Physical chemistry. M.: Vyssh. shkola. 1988. 496 p. (in Russian).
8. **Kolotyrkin Ya.V., Florianovich G.M.** Anomalous phenomena in the dissolution of metals. *Itoги науки i tekhniki. Elektrokhiymya*. 1971. V. VII. P. 5-64 (in Russian).
9. **Tyler R.** The chemistry of silica. Part 2. M.: Mir. 1982. 712 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 29.11.2016  
Принята к опубликованию 27.07.2017*

*Received 29.11.2016  
Accepted 27.07.2017*