

УДК 621.9048:546.621

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/07>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ЭРОЗИИ АЛЮМИНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

©*Усарова С. О.*, SPIN-код: 3905-3048, *Ошский технологический университет*
им. акад. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, usulayka@mail.ru

©*Сатывалдиев А. С.*, SPIN-код: 7657-3677, *д-р хим. наук, Кыргызский государственный*
университет им. И. Арабаева, г. Бишкек, Кыргызстан

PRODUCT IDENTIFICATION SPARK EROSION OF ALUMINUM IN AQUEOUS MEDIUM

©*Usarova S.*, SPIN-code: 3905-3048, *Osh Technological University*
named after acad. M.M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, usulayka@mail.ru

©*Sativaldiev A.*, SPIN-code: 7657-3677, *Dr. habil., Kyrgyz State University*
named after I. Arabaev, Bishkek, Kyrgyzstan

Аннотация. Приведен сравнительный анализ методов получения нанопорошков оксида алюминия и идентифицированы продукты электроискровой эрозии алюминия в водной среде. На основании данных об уширении дифракционных отражений были произведены расчеты для оценки размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) частиц оксида алюминия, полученных при термической обработке продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде. В заключении делается вывод, что продуктом термической обработки основного продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде является нанодисперсный оксид алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Abstract. A comparative analysis of the methods for producing aluminum oxide nanopowders is presented and the products of electro spark erosion of aluminum in an aqueous medium are identified. Based on the data on the broadening of diffraction reflections, calculations were performed to estimate the sizes of the coherent scattering regions (CSRs) of alumina particles obtained by heat treatment of the product of electric spark dispersion of aluminum in water. In conclusion, it is concluded that the product of heat treatment of the main product of electro spark dispersion of aluminum in water is $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano dispersed aluminum oxide.

Ключевые слова: электроискровая эрозия, диспергирование, нанодисперсный, нанопорошки оксида алюминия.

Keywords: spark erosion, dispersion, nanodispersed, alumina nanopowders.

Метод электроискровой обработки токопроводящих материалов, разработанный супругами Б. Р. и Н. И. Лазаренко [1] еще в 30-х годах прошлого века, получил продолжение в работах У. А. Асанова и его сотрудников, которые разработали ряд установок и так называемую электроэрозионную технологию получения порошков соединений и металлов [2]. Далее в этом направлении были разработаны способы получения даже фуллереновых нанотрубок и наноалмазов — продуктов электроэрозии графита в дистиллированной воде [3].

Были исследованы возможности получения активного оксида алюминия ввиду его значимости как продукта химического рынка. Основная часть оксида алюминия используется для получения металлического алюминия, широка область применения оксида алюминия как

высокоэффективного катализатора многих процессов органического синтеза (дегидратация спиртов, изомеризация олефинов), термостойкого носителя катализаторов, высокоселективных сорбентов, модификаторов полимерных материалов, наполнителей и добавок в производстве высокопрочной конструкционной керамики и многого другого.

В настоящее время, век нанотехнологий и нанопродуктов, ведутся повсеместные исследования для разработки методов получения нанопродуктов, в том числе и нанопорошков оксида алюминия. Оксиды, нитриды и карбиды металлов, в том числе и алюминия, рассматриваются как возможные компоненты нанокристаллических материалов, на основе которых в будущем будут создаваться стабильно работающие в течение всего срока эксплуатации системы [4].

Ввиду многотоннажного спроса на оксид алюминия существует множество методов его получения, традиционных и сравнительно новых. Все методы, технологии получения нанопродуктов условно подразделяются на две группы: «снизу вверх» и «сверху вниз». Такое разделение базируется на ключевой стадии процесса, на которой образуется наноструктура. В первом случае наночастицы образуются из атомов и молекул (химические методы), во втором — наночастицы получают размельчением частиц и порошков (в основном, физические методы) [4].

Сравнение некоторых преимуществ и недостатков, в основном, преимуществ искрового разряда при физических и физико–химических методах синтеза веществ было сделано в [5], даны характеристики электроискрового диспергирования, электронной бомбардировки, плазмохимии, фотохимии и радиационной химии.

Традиционный, химический — осаждение (быстрое терморазложение тригидрата Байера до аморфного оксида алюминия, подкисление алюмината щелочного металла, нейтрализация солей алюминия, гидролиз алкоголята алюминия) метод синтеза нанокристаллических оксидных порошков алюминия представляет собой двухстадийный процесс, заключающийся в синтезе прекурсора (гидроксида алюминия) с последующей его термообработкой до нанокристаллического оксида [6]. Данный метод позволяет в широких пределах варьировать морфологию (размер и форму), кристаллическую структуру и химический состав получаемых частиц.

Известны еще электрохимический метод, метод сжигания металлогазовой смеси, импульсного электронно–лучевого испарения мишеней [7] и т. д.

Электрохимические методы получения наночастиц оксидов металлов, основанные на реакции электролиза, в которых анодом служит металлический алюминий позволяют получать значительно больший, чем химический, диапазон продуктов, в зависимости от электрических параметров, таких как плотность анодного тока и концентрация электролита, причем наблюдался рост микроагрегатов, образованных наночастицами при увеличении плотности тока и концентрации раствора электролита [7].

Полученные испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении, т. е. при помощи электронного пучка, нанопорошки в целом, ведут себя аналогично нанопорошкам полученным другими способами, но отличаются малым количеством поверхностных дефектов, ответственных за образование донорных центров [6, 8]. Электроискровое диспергирование алюминия, как сейчас называют электроискровую эрозию, в непроводящих жидких средах — сравнительно новый метод получения нанодисперсных соединений алюминия.

Общая процедура приготовления оксида алюминия заключается в получении геля гидроксида алюминия, его последующей сушке и прокаливании до оксидной формы [9–10]

Структура получаемого оксида алюминия закладывается на различных стадиях его получения и зависит от свойств предшественника — гидроксида алюминия. Гидроксиды алюминия существуют в нескольких модификациях, которые получают при определенных условиях осаждения из растворов солей — алюмината натрия или сернокислого алюминия. Наиболее известные модификации — аморфный тригидроксид, гиббсит, байерит, нордстрандит, диаспор, бемит и псевдобемит. В литературе упоминаются вновь открытые, но еще не полностью описанные туканит и тодит [11].

Практическое значение в качестве предшественников активного оксида алюминия имеют гиббсит, байерит, бемит и псевдобемит. При термической обработке гидроксидов алюминия образуются различные кристаллографические модификации оксида алюминия [7].

В связи с тем, что алюминий — многовалентный металл, его свойства, а также свойства его соединений, сильно зависят от среды и компонентов среды. Например, в системе алюминий — дихлорэтан можно ожидать образования полимерных продуктов, так как известно, что в присутствии катализаторов, скажем, безводного хлористого алюминия, дихлорэтан способен подвергаться дегидрохлорированию межмолекулярного характера при низких температурах и внутримолекулярного — при высоких [2].

Если исходить из особенности дихлорэтана, а именно, его способности образовывать в основном низшие хлориды, то таковые для алюминия представлены одним соединением — субхлоридом $AlCl$, который, однако, может существовать при температурах выше $400\text{ }^{\circ}C$, при температурах ниже этой, субхлорид преобразуется в трихлорид алюминия и металлический алюминий.

Рентгенографическими методами установлено, что в составе твердого продукта наряду с хлористым алюминием присутствует также и металлический алюминий с примесью карбида алюминия. При переходе к жестким параметрам искрового разряда содержание металлического порошка в продукте заметно растет [12]. Очевидно диспергируемые частицы металла при больших энергиях разряда не успевают взаимодействовать с компонентами диэлектрической среды и остывают в виде высокодисперсного порошка.

Твердые продукты после отделения от жидкой фазы фильтрацией при обработке водой образуют гидроксид алюминия в виде бемита. Это служит свидетельством возможного присутствия в продукте металлорганических или гидридных соединений алюминия. В Таблице 1 показаны данные по разрушаемости алюминия и соотношения образующихся компонентов его при электроискровой обработке ($U=200\text{ В}$) в 60 мл дихлорэтана [2].

Таблица 1.

ДАННЫЕ ПО РАЗРУШАЕМОСТИ АЛЮМИНИЯ
 И СООТНОШЕНИЯ ОБРАЗУЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ

Энергия искрового разряда, имп.	Количество выделенных веществ, г		
	<i>Al общий</i>	<i>Al металлический</i>	$AlCl_3$
2×10^4	0,2	0,12	0,16
4×10^4	0,4	0,23	0,21
6×10^4	0,5	0,3	0,22
8×10^4	0,58	0,32	0,21
10×10^4	0,6	0,34	0,25

Согласно представленным данным, видно, что при больших значениях энергии электрического импульса эрозия металла сильно замедлена и наблюдается тенденция к прекращению этого процесса. Ряд экспериментов показал, что большая длительность обработки ведет к прекращению разрушения металла, причиной чего являются образующиеся в жидкой среде электропроводящие компоненты. Эти данные согласуются с

данными С. П. Бардаханова, в работе, которой сравнивались электрофизические свойства нанопорошков оксида алюминия фирмы Degussa (Германия), полученного химическим путем, и Сибирского химического комбината (г. Северск Томской области), полученного плазмохимическим способом. Было установлено, что хотя оксид алюминия является диэлектриком, нанопорошок оксида алюминия Сибирского химкомбината обладает проводящими свойствами, но является не совсем типичным проводником по ряду параметров [13].

А. М. Мадиярова, А. С. Сатывалдиев описывают результаты электроискрового диспергирования металлов в различных жидких средах: углеводородах, спиртах и дистиллированной воде [12]. В двух первых случаях исключается влияние на процесс воздуха и влаги, и отмечается такой интересный факт как высокоскоростная закалка частиц металла в жидкой среде, обусловленная самой природой искрового заряда — возникновения при нем температуры до 1000 °С и ударной волны. Под влиянием этого металл «закипает» и «выбрасывается» в жидкую среду.

Методом рентгенофазового анализа были идентифицированы продукты электроискрового диспергирования: в случае с гептаном и этанолом это были карбид алюминия и металлический алюминий, в случае с водой — металлический алюминий и гидроксид алюминия. Так как именно гидроксид является прекурсором в процессе получения оксида алюминия, интерес представляет изучение возможности получения нанодисперсного оксида алюминия из продуктов электроискрового диспергирования алюминия в воде. Ранее было доказано, что продукт, полученный в воде, состоит из гидроксида алюминия и металлического алюминия [12].

Для проведения диспергирования алюминия в условиях искрового разряда была использована установка, разработанная У. Асановым и его сотрудниками и предназначенная для проведения химического синтеза [14], а в качестве электродов — стержни из алюминия с размерами 30×7×1,5 мм. Энергия единичного разряда составляла 0,05 Дж. В качестве жидкой среды использована дистиллированная вода. Продукт, полученный в водной среде, промывался спиртом–ректификатом и высушивался при комнатной температуре, затем продукт помещался в муфельную печь и нагревался в атмосфере воздуха при температурах 400 °С и 900 °С в течение 30 мин [14].

Выбор температур прогрева кажется произвольным, но 400 °С — это температура возможного окисления сажи, следы которой обязательны в составе продукта диспергирования, а 900 °С — температура возможного окисления металлического алюминия в составе продукта диспергирования. В результате нагревания в воздухе гидроксид алюминия и металлический алюминий, находящиеся в составе продукта диспергирования в результате реакций дегидратации и окисления, соответственно, преобразуются в оксид алюминия, а точнее в его γ -модификацию.

Прокаленный при вышеуказанных температурах продукт исследован методом рентгенофазового анализа, его дифрактограммы, снятые на дифрактометре RINT-2500 HV, представлены на Рисунке. Результаты расчета дифрактограмм продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде после высушивания, после дальнейшего прокаливания при 400 °С и 900 °С даны в Таблицах 2, 3 и 4 соответственно.

Продукт электроискрового диспергирования алюминия в дистиллированной воде состоит из гидроксида алюминия β -Al(OH)₃ и металлической фазы (Рисунок, Таблица 2). Главной фазой продукта является гидроксид алюминия, образующийся вследствие взаимодействия металла электрода и продуктов разложения жидкой среды, воды в данном случае. Результаты расчета дифрактограмм термически обработанного в воздухе при

температурах 400 °С и 900 °С продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде показывают, что при нагревании в воздухе гидроксид алюминия и металлический алюминий, находящиеся в составе продукта, в результате реакций, соответственно, дегидратации и окисления, переходят в «γ» модификацию оксида алюминия, который имеет кубическую решетку (Таблица 2–3).

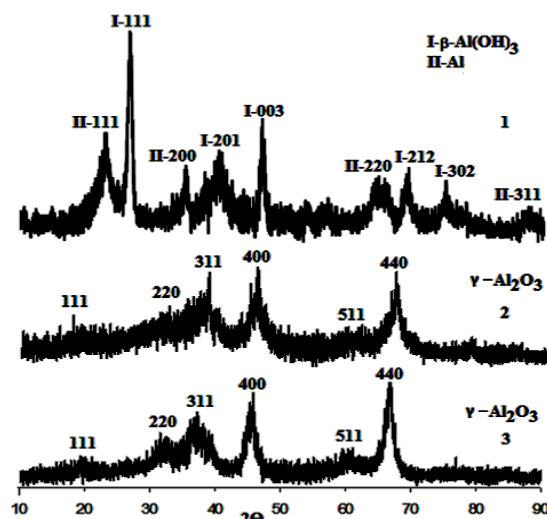


Рисунок. Дифрактограммы продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде: 1 — высушенного, до термической обработки; 2 — после термической обработки его в воздухе при 400 °С; 3 — после термической обработки его в воздухе при 900 °С.

Таблица 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОСЛЕ ВЫСУШИВАНИЯ

Экспериментальные данные		Фазовый состав			
<i>I</i>	<i>d, Å</i>	<i>β-Al(OH)3</i>		<i>Al</i>	
		<i>hkl</i>	<i>d, Å</i>	<i>hkl</i>	<i>a, Å</i>
53	2,3523	002	2,34	111	4,074
100	2,2251	111	2,21		
17	2,0272			200	4,054
36	1,9770	201	1,97		
44	1,8497	003	1,83		
60	1,7241	112	1,71		
19	1,6007	202	1,59		
19	1,5497	211	1,55		
33	1,4551	300	1,45		
28	1,4324			220	4,051
37	1,3960	212	1,39		
31	1,3340	302	1,33		
18	1,2201			311	4,047

Данные соответствуют межплоскостным расстояниям и интенсивностям линий на рентгенограммах образцов оксида алюминия, данных Липпенсом и Стегердом. Систематическая европейская классификация окисей алюминия, переработанная Липпенсом [12], основывается на температуре, при которой оксиды образуются, и делит оксиды на:

–низкотемпературные состава $Al_2O_3 \cdot n H_2O$, где $n \geq 1$, при температурах не превосходящих 600 °С, так называемой γ-группы;

–высокотемпературные оксиды алюминия (почти безводные), получаемые при температурах от 900 °С до 1000 °С, так называемой δ-группы.

Так что выбор температур сушки продукта электроискровой обработки алюминия в водной среде можно считать оправданным, хотя наши расчеты не вполне совпадают с данными вышеуказанной классификации.

Таблица 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРИ 400 °С

Экспериментальные данные		Фазовый состав	
<i>I</i>	<i>d, Å</i>	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	
		<i>hkl</i>	<i>a, Å</i>
18	4,5609	111	7,900
35	2,7902	220	7,892
84	2,3824	311	7,901
100	1,9772	400	7,908
15	1,5198	511	7,897
91	1,3985	440	7,911

Таблица 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРИ 900 °С

Экспериментальные данные		Фазовый состав	
<i>I</i>	<i>d, Å</i>	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	
		<i>hkl</i>	<i>a, Å</i>
28	4,5610	111	7,900
44	2,7914	220	7,895
68	2,3800	311	7,893
75	1,9733	400	7,885
35	1,5213	511	7,904
91	1,3996	440	7,917

На основании данных об уширении дифракционных отражений были произведены расчеты для оценки размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) частиц оксида алюминия, полученных при термической обработке продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде [14].

Результаты расчета размера ОКР частиц оксида алюминия приведены в Таблице 5.

Таблица 5.

ПАРАМЕТРЫ РЕШЕТКИ (*a*) И РАЗМЕРЫ ОКР (*d*) ОКСИДА АЛЮМИНИЯ,
 ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПРОДУКТА
 ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ В ВОДЕ

Температура нагрева, °С	<i>a, Å</i>	<i>d, нм</i>
400	7,901	4,5
900	7,901	6,2

ОКР используется для оценки размеров кристаллитов в поликристаллах и нанокристаллических порошках, и размер ОКР, как правило, отождествляют со средним размером кристаллитов. По результатам анализов [14] продуктов термической обработки продукта электроискровой эрозии (диспергирования) алюминия в воде можно сделать выводы о том, что продуктом термической обработки основного продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде является нанодисперсный оксид алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Список литературы:

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка металлов. М.: Госэнергоиздат, 1950.
2. Асанов У. А. Синтез соединений металлов в условиях низковольтного искрового разряда в жидких диэлектриках. Фрунзе: Илим, 1978.
3. Asanov U. A., Sulaimankulova S. K., Jasnakunov J. K., Omurzak uulu E. Phase composition of the product of graphite destruction in impulse plasma in liquid // Вестник Кыргызского Национального Университета имени Жусупа Баласагына. 2004. №3 (1).
4. Ремпель А. А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов // Успехи химии. 2007. Т. 76. №5. С. 474-500.
5. Лямина Г. В., Илела А. Э., Качаев А. А., Амантай Д., Колосов П. В., Чепрасова М. Ю. Получение нанопорошков оксида алюминия и циркония из растворов их солей методом распылительной сушки // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 33. №2. С. 119-124.
6. Бардаханов С. П., Володин А. М., Зобов К. В., Кенжин Р. М., Лысенко В. И. Исследование методом электронного парамагнитного резонанса нанопорошков оксида алюминия и других, полученных испарением электронным пучком // Вестник Новосибирского государственного университета. 2010. Т. 5. №1. С. 97-101.
7. Петрова Е. В., Дресвянников А. Ф., Цыганова М. А. Наноразмерные частицы гидроксидов и оксидов алюминия, полученные электрохимическим и химическим способами // Вестник Казанского технологического университета. 2008. №5. С. 301-310.
8. Ильвес В. Г., Медведев А. И., Мурзакаев А. М., Соковнин С. Ю., Спирина А. В., Уймин М. А. Физические характеристики нанопорошков $Al_2O_3-Al(Cu)$, полученных электронно-лучевым испарением мишени // Физика и химия обработки материалов. 2011. №2. С. 65-70.
9. Цой А. Д., Асанов У. А. Способ получения гидроокиси алюминия. Авторское свидетельство №624430, 1976.
10. Сатывалдиев А. С., Асанов У. А. Электроэрозионный синтез соединений переходных металлов. Бишкек: КГНУ, 1995. 187 с.
11. Липпенс Б. К., Стеггерд Й. Й. Активная окись алюминия // Структура и свойства адсорбентов и катализаторов. М.: Мир, 1973. С. 190.
12. Мадиярова А. М., Сатывалдиев А. С. Зависимость фазового состава продуктов электроискрового диспергирования алюминия от природы жидкой среды // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2017. №4. С. 40-42.
13. Бардаханов С. П., Завьялов А. П., Зобов К. В., Лысенко В. И., Немоев А. В., Обанин В. В., Труфанов Д. Ю. Исследование электрофизических свойств наноразмерных порошков диоксида кремния, оксида алюминия и никеля // Вестник Новосибирского государственного университета. 2009. Т. 4. №1. С. 75-79.
14. Усарова С. О., Сатывалдиев А. С., Бейшекеева Р. К. Получение нанодисперсного оксида алюминия из продукта электроискрового диспергирования алюминия в воде // Известия вузов Кыргызстана. 2017. №11. С. 16-18.

References:

1. Lazarenko, B. R., & Lazarenko, N. I. (1950). Elektroiskrovaya obrabotka metallov. Moscow. (in Russian).
2. Asanov, U. A. (1978). Sintez soedinenii metallov v usloviyakh nizkovol'tnogo iskrovogo razryada v zhidkikh dielektrikakh. Frunze. (in Russian).

3. Asanov, U. A., Sulaimankulova, S. K., Jasnakunov, J. K., & Omurzak, uulu E. (2004). Phase composition of the product of graphite destruction in impulse plasma in liquid. *Vestnik kyrgyzskogo natsional'nogo universiteta*, 3(1). (in Russian).
4. Rempel, A. A. (2007). Nanotekhnologii, svoistva i primeneniye nanostrukturirovannykh materialov. *Uspekhi khimii*, 76(5). (in Russian).
5. Lyamina, G. V., Ilea, A. E., Kachaev, A. A., Amantai, D., Kolosov, P. V., & Cheprasova, M. Yu. (2013). Poluchenie nanoporoshkov oksida alyuminiya i tsirkoniya iz rastvorov ikh soli metodom raspylitel'noi sushki. *Butlerovskie soobshcheniya*, 33(2), 119-124. (in Russian).
6. Bardakhanov, S. P., Volodin, A. M., Zobov, K. V., Kenzhin, R. M., & Lysenko, V. I. (2010). Issledovanie metodom elektronnoy paramagnitnoy rezonansy nanoporoshkov oksida alyuminiya i drugikh, poluchennykh ispareniem elektronnykh puchkov. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta*, 5(1), 97-101. (in Russian).
7. Petrova, E. V., Dresvyannikov, A. F., & Tsyganova, M. A. (2008). Nanorazmernye chastitsy gidroksidov i oksidov alyuminiya, poluchennyye elektrokhimicheskimi i khimicheskimi sposobami. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, (5), 301-310. (in Russian).
8. Ilves, V. G., Medvedev, A. I., Murzakaev, A. M., Sokovnin, S. Yu., Spirina, A. V., & Uimin, M. A. (2011). Fizicheskiye kharakteristiki nanoporoshkov $Al_2O_3-Al(Cu)$, poluchennykh elektronno-luchevym ispareniem misheni. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, (2), 65-70. (in Russian).
9. Tsoi, A. D., & Asanov, U. A. (1976). Sposob polucheniya gidrookisi alyuminiya. Avtorskoe svidetel'stvo no. 624430. (in Russian).
10. Satyvaldiev, A. S., & Asanov, U. A. (1995). Elektroerozionnyi sintez soedinenii perekhodnykh metallov. Bishkek. (in Russian).
11. Lippens, B. K., & Steggerd, I. I. (1973). Aktivnaya okis' alyuminiya. In: *Stroenie i svoistva adsorbentov i katalizatorov. Moscow*. (in Russian).
12. Madiyarova, A. M., & Satyvaldiev, A. S. (2017). Zavisimost' fazovogo sostava produktov elektroiskrovogo dispergirovaniya alyuminiya ot prirody zhidkoi sredy. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana*, (4), 40-42. (in Russian).
13. Bardakhanov, S. P., Zavyalov, A. P., Zobov, K. V., Lysenko, V. I., Nemoev, A. V., Obanin, V. V., & Trufanov, D. Yu. (2009). Issledovanie elektrofizicheskikh svoystv nanorazmernykh poroshkov dioksida kremniya, oksida alyuminiya i nikelya. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta*, 4(1), 75-79. (in Russian).
14. Usarova, S. O., Satyvaldiev, A. S., Beishekeeva, R. K. (2017). Poluchenie nanodispersnogo oksida alyuminiya iz produkta elektroiskrovogo dispergirovaniya alyuminiya v vode. *Izvestiya vuzov Kyrgyzstana*, (11), 16-18. (in Russian).

Работа поступила
в редакцию 16.11.2019 г.

Принята к публикации
21.11.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Усарова С. О., Сатывалдиев А. С. Идентификация продуктов электроискровой эрозии алюминия в водной среде // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №12. С. 61-68. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/07>

Cite as (APA):

Usarova, S., & Sativaldiev, A. (2019). Product Identification Sparks Erosion of Aluminum in Aqueous Medium. *Bulletin of Science and Practice*, 5(12), 61-68. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/07> (in Russian).