

**ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РЕАКТОРА**

© Н.Б.Даниленко, Г.Г.Савельев, Н.А.Яворовский, Т.А.Юрмазова, А.И.Галанов, П.В.Балухтин

Научно-исследовательский институт высоких напряжений, Томск  
Томский политехнический университет

Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г.

*Изучены состав и кинетика образования продуктов эрозии в воде металлической загрузки (алюминий, железо) электроразрядного реактора, работающего при холостом напряжении 500–1000 В, максимальном токе импульса 250 А и энергии 0.5–1 Дж·импульс<sup>-1</sup>. Продукты диспергирования загрузки изучены электронномикроскопически и рентгенофазовым анализом. Химическим анализом определен энергетический выход продуктов эрозии, который в сотни раз превышает расчетные выходы электролиза. Изучена кинетика и рассмотрены механизмы эрозии.*

Электроразрядные методы очистки сточных вод, использующие электроэрозию (ЭЭ) электродов [1, 2], находят применение, так как за счет веществ, состав-ляющих электрод, можно обеспечить более широкий спектр химических процессов. Однако, если разряд происходит в воде, то выход эрозии электродов мал, а затраты энергии велики. Так, например, в работах [3, 4] найдено, что затраты энергии на эрозию металлов в этом режиме составляют от  $2.8 \cdot 10^6$  до  $5.6 \times 10^6$  кДж·моль<sup>-1</sup> ( $\sim 10^4$  кВт·ч·кг<sup>-1</sup>).

В случае электроконтактной эрозионной обработки энергозатраты составляют 1.2–12 кВт·ч·кг<sup>-1</sup> [5–10]. При этом используют реактор с массивными электродами, между которыми загружают металлы в виде гранул или стружек, которые в большей или меньшей степени изолированы друг от друга оксидными пленками или имеют точечные контакты. При пропускании электрического тока происходит пробой множества изолирующих промежутков и электрические взрывы на них или на проводящих микроконтактах.

Электроэрозия металлов в воде, по мнению авторов, происходила за счет пробоя оксидного слоя на поверхности электрода, расплавления и разбрызгивания металла [5, 6]. Эффективность такого процесса оказалась довольно высокой – 3–4 кВт·ч·кг<sup>-1</sup>. Подобные результаты получены в работах [9, 10]. В работе [7] была испытана система с активной нагрузкой в виде металлических стружек. В этом случае кривизна контактирующих поверхностей значительно больше и каждый импульс тока вызывает множество разрядов на случайно расположенных контактах. При этом происходит электроэрозия за счет разрушения током микроконтактов, а очистка воды связана не только с разрядом в воде, но и с химическими реакциями загрузки. Предварительными

опытами показано, что энергетическая эффективность по эрозии в этом случае может достигать 1.2 кВт·ч·кг<sup>-1</sup> [7]. Это указывает на перспективность метода, как для очистки питьевой воды, так и сточных вод, а также для синтеза различных материалов.

Настоящая работа посвящена исследованию энергетики, химического механизма и кинетики образования продуктов эрозии металлической (алюминий, железо) загрузки электроразрядного реактора.

**Экспериментальная часть**

Экспериментальная установка состояла из емкости, в которую помещали металлическую стружку (алюминий, железо) массой 200 г, используемую в качестве химически активной загрузки. В загрузку опускали электроды и заливали дистиллированную воду, объемом 950 мл. Электроды присоединяли к источнику импульсных токов с двухконтурной схемой со следующими характеристиками: длительность импульса  $t_{имп} = 10$  мкс, с частотой следования импульсов 100 Гц, напряжением  $U$  500–1000 В и током первого полупериода импульса  $I$  250–400 А.

Концентрацию ионов железа определяли фотоколориметрически [11]:  $Fe^{2+}$  с  $\alpha, \alpha$ -дипиридилем,  $\Sigma Fe$  с сульфосалициловой кислотой в щелочной среде,  $Fe^{3+}$  – по разности  $c(Fe^{3+}) = c(\Sigma Fe) - c(Fe^{2+})$ .

Удельную поверхность образующегося осадка измеряли методом БЭТ по термодесорбции аргона.

Исследования методом электронной микроскопии проводили на электронном микроскопе JEM-100 CXII, рентгенофазовый анализ – на дифрактометре Shimadzu XRD 6000.

Для определения затрат энергии на очистку воды были получены осциллограммы импульсов тока и

напряжения с помощью осциллографа С8-17. Энергия импульса была рассчитана интегрированием осциллограмм тока и напряжения, в результате получены значения  $E$  0.5–1.0 Дж·имп<sup>-1</sup>. Кроме того, была измерена температура воды при действии электрического разряда (ЭР) на железную загрузку; при  $E=0.5$  Дж·имп<sup>-1</sup> ее повышение составило  $0.53 \text{ град} \times \frac{V}{\text{мин}}$ .

При действии электрических импульсов в загрузке, залитой водой, наблюдаются электрические разряды в виде искр по всему видимому объему. После обработки железной загрузки в течение нескольких десятков секунд становится заметным появление взвеси *черного цвета, которая при хранении частично меняет окраску на коричневую*. В случае алюминиевой загрузки образуется взвесь светло-серого цвета, белесая при хранении.

Спектрографические исследования и рентгенофазовый анализ (РФА) продуктов диспергирования загрузки, показали, что в результате реакции металлических частиц с водой образуются как гидроксиды, так и оксиды, которые, имеют развитую поверхность и волокнистую структуру для алюминия (рис. 1,



Рис. 1. Типичные ЭМ фотографии твердых продуктов ЭР в воде.  
Загрузка: а – алюминиевая, б – железная.

Данные о накоплении продукта эрозии железной загрузки в различных формах ( $\text{Fe}^0$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) в воде

t, с	$\text{Fe}^0$ $\text{Fe}^{2+}$ $\text{Fe}^{3+}$		
	мг·л <sup>-1</sup>		
0	0	0	0
10	47	18	65
30	109	37	146
60	252	78	330
180	441	130	571
360	699	299	998
600	1086	445	1531
1800	1454	1221	2675

а) несколько форм (пластины, иглы, изометрические кристаллы; рис. 1, б) – для железа. Диаметр волокон продуктов эрозии алюминия составляет 5–10 нм, размеры пластин для железа по диагонали – около 100 нм. Эти структуры обладают большой удельной поверхностью (удельная поверхность продукта эрозии железной загрузки после сушки при 110°C равна  $105 \pm 5 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ , а для алюминиевой –  $293 \pm 5 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ ).

РФА продуктов эрозии электродов показал, что в случае железной загрузки полученные продукты после сушки содержат в основном кристаллическое вещество со структурой, близкой  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , в случае алюминиевой – бемит  $\text{AlOOH}$ .

Для исследования динамики накопления продуктов эрозии железной загрузки в различных формах в воде – через определенное время обработки ЭР анализировали образующуюся суспензию в целом и фильтрат – в отдельности. Данные по накоплению железа в различных формах в составе твердых продуктов представлены в таблице. (номер таблицы не указан)

Полученные экспериментальные данные были обработаны, и построены зависимости в логарифмических координатах (рис. 2, 3). Суммарное количество железа ( $\text{мг} \cdot \text{с}^{-1}$ ), удаляемого с электродов (загрузки) в зависимости от времени действия разряда, описывается эмпирическими соотношениями:

$$\lg c_{\text{Fe}} = 0.72 \lg t + 1.1331, \text{ или } c_{\text{Fe}} = 13.6 t^{0.72}. \quad (1)$$

Соотношение между различными формами железа в суспензии показано на рис. 3, из которого видно, что содержание  $\text{Fe}^{+3}$  проходит через минимум.

Изменение концентрации ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в фильтрате при обработке воды с железной загрузкой в ЭР, не подчиняется определенной закономерности и их содержание примерно в 1000 раз меньше, чем в твердом продукте – от 0.187 до  $2.347 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

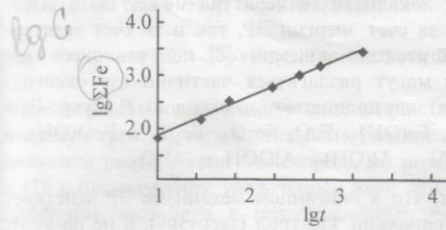


Рис. 2. Зависимость концентрации ионов железа  $\Sigma Fe$  ( $mg \cdot \kappa l^{-1}$ ) в продуктах эрозии (в суспензии) от времени обработки  $t$  (с).

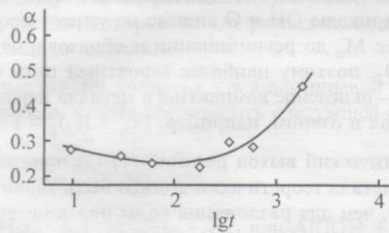


Рис. 3. Зависимость доли полностью окисленного железа  $\alpha_{Fe^{3+}} = c_{Fe^{3+}}/c_{\Sigma Fe}$  от времени эрозии  $t$  (с).

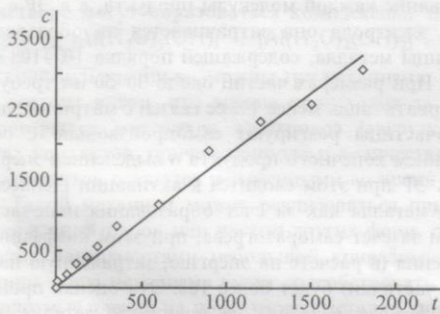


Рис. 4. Зависимость концентрации ионов алюминия  $c$  ( $mg \cdot \kappa l^{-1}$ ) в продуктах эрозии (в суспензии) от времени воздействия ЭР  $t$  (с).

Исследована кинетика эрозии алюминиевой загрузки (рис. 4). В отличие от железной загрузки спрямление зависимости концентраций в суспензии и фильтрате от времени воздействия происходит в координатах  $c-t$  [концентрация  $Al^{3+}$  ( $mg \cdot l^{-1}$ )—время обработки ЭР (с)].

Количество алюминия, удаляемого с электродов (загрузки) в зависимости от времени действия разряда, описывается эмпирическим соотношением:

$$c_{Al^{3+}} = 1.82 t. \quad (II)$$

В принятом варианте установки наблюдается значительный разброс рабочих характеристик, который связан со структурой и составом загрузки, размера-

ми реакционной зоны и ее геометрии. Ниже в качестве примера приведены результаты определения затрат энергии в одном из опытов.

В этом опыте частота следования импульсов была 100 Гц, энергия, выделяемая в одном импульсе,  $E = 0.5$  Дж, масса воды 950 г, масса железной загрузки 200 г и масса переходящего в суспензию железа (в виде оксида)  $0.33$  г·мин<sup>-1</sup>. Отсюда можно подсчитать, что энергетический выход железа составил  $7.0$  моль·(кВт·ч)<sup>-1</sup>, расход энергии —  $2.54$  кВт·ч·кг<sup>-1</sup> ( $0.142$  кВт·ч·моль<sup>-1</sup>) диспергированного железа.

Баланс электрической и тепловой энергии при этом выглядит следующим образом: без учета потерь тепла экспериментально определяемому поглощению электрической энергии  $3$  кДж·мин<sup>-1</sup> соответствует повышение температуры на  $0.714$  град·мин<sup>-1</sup>. Кроме того, за счет химических реакций может выделяться: при окислении железа водой  $16.5$  кДж·моль<sup>-1</sup>, что может дать повышение температуры на  $0.01$  град·мин<sup>-1</sup>, однако более вероятно окисление Fe растворенным кислородом —  $376$  кДж·моль<sup>-1</sup> ( $0.297$  град·мин<sup>-1</sup>). Суммарное повышение температуры может составить  $1.0$  град·мин<sup>-1</sup>. Эта величина больше, чем экспериментально найденная ( $0.53$  град·мин<sup>-1</sup>), что может быть связано как с тепловыми потерями, так и с неполнотой окисления железа до  $Fe^{3+}$ .

Полученный в данной работе расход энергии заметно больше, чем сообщалось ранее [7] ( $0.067$  кВт·ч·моль<sup>-1</sup>), что связано с изменением геометрических и других параметров установки.

Расход энергии при ЭЭ алюминия составил в сравнимых условиях  $0.046$  кВт·ч·моль<sup>-1</sup>. Если механизм ЭЭ состоит в плавлении и разбрызгивании расплава, то соответствующие затраты на нагревание до температур плавления ( $30$  и  $9$  кДж·моль<sup>-1</sup>) и на отрыв частиц от основы (теплоты атомизации  $354$  и  $302$  кДж·моль<sup>-1</sup>) могут обусловить понижение затрат энергии.

Интересно сравнить энергетический выход продукта электроэрозии с радиационнохимическим и электрохимическим выходами реакций в растворах и при электролизе проволоки [12–14].

Так, например, для цепных радиационно-химических процессов энергетический выход продукта обычно находится в пределах  $0.01$ – $10$  молекул на  $100$  эВ. Приведенное выше значение выхода железа —  $7.0$  моль·(кВт·ч)<sup>-1</sup> соответствует  $19$  молекул на  $100$  эВ, а в работе [7] получено значение  $40$ .

При чисто электрохимическом окислении железа, затраченная энергия:

$$W = znUF = 3 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 97500 = 1.4 \cdot 10^8 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}, \text{ или } 714 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (III)$$

где  $z$  – заряд иона,  $n$  – число эквивалентов металла,  $F$  – постоянная Фарадея,  $U$  – разность потенциалов.

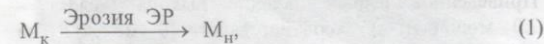
Если затратить 2.54 кВт·ч на окисление железа до трехзарядного состояния, то при напряжении 500 В можно окислить всего 3.6 г железа. Так как в действительности при этом окисляется 1 кг, то коэффициент усиления составляет более 275 раз, по данным работы [7] – 550 раз.

Сравнение с процессом диспергирования металлов электровзрывом проволоочки [12] (ЭВП) можно провести по отношению величины энерговклада к энергии сублимации соответствующего металла. Для ЭЭ железа эта величина составила в данной серии измерений от 0.68 до 1.44, для алюминия – от 0.27 до 0.55. Обычно получение порошков металлов методом ЭВП производят при  $E/E_c \sim 0.8-2.5$ . Если ЭВП производят в атмосфере химически активных газов, то энерговклад может быть  $\sim 0.6$  и меньше.

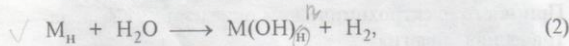
Таким образом, эффективность электроэрозии значительно больше, чем эффективности процессов, в которых воздействию подвергается каждый атом (молекула) реагента. Это является свидетельством коллективного или цепного механизма, в котором энергия используется на диспергирование материала не путем его испарения, а на отрыв частиц, содержащих большое число связанных атомов, либо в процессе используется энергия окисления материала водой и кислородом. Более всего ЭЭ похожа на электровзрыв металлической проволоочки в атмосфере кислорода [13, 14].

В случае действия импульсов тока на металлическую загрузку энергия импульса вероятно в основном воздействует на металл: при этом происходит нагревание и отрыв от основы частичек металла. Конкретный механизм отрыва и размеры частичек будут зависеть от величины удельного энерговклада и скорости подвода энергии. Это может быть испарение металла, его плавление и разбрызгивание, механический отрыв наночастиц. При использованных параметрах ЭР в первичном процессе наиболее вероятно образование частиц металла за счет разбрызгивания и отрыва.

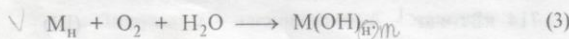
Основные стадии процесса, очевидно, можно представить следующей схемой ( $M_k$  – компактный металл,  $M_n$  – наночастицы металла):



восстановление воды металлом



окисление металлических частиц растворенным кислородом

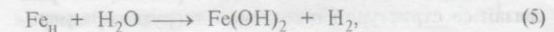


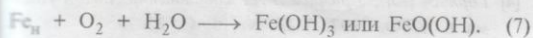
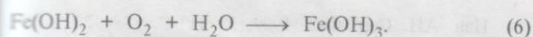
Так как локальная температура может быть высокой как за счет энергии ЭР, так и за счет экзотермической реакции окисления [8], получающиеся гидроксиды могут разлагаться частично (до оксогидроксидов) или полностью (до оксидов). В случае  $Fe - Fe(OH)_2, Fe(OH)_3, FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4$  и  $FeO(OH)$ , в случае  $Al - Al(OH)_3, AlOOH$  и  $Al_2O_3$ .

Отметим, что в описанном механизме ЭР действует на металлический электрод (загрузку), а не на воду. В альтернативном механизме рассматривается действие ЭР на воду. Он включает реакции образования радикалов  $O, OH$  и молекул  $H_2O_2, O_3$  в ЭР с последующим окислением ими компактного металла. При этом радикалы  $OH$  и  $O$  видимо не успеют прореагировать с  $M_n$  до рекомбинации и образования  $H_2O_2, O_3$  и  $O_2$ , поэтому наиболее вероятный путь в этом случае – окисление компактного металла пероксидом водорода и озоном, например:  $Fe_k + H_2O_2 = Fe(OH)_2$ .

Энергетический выход реакций (1)–(3) при действии ЭР на металл теоретически должен быть значительно больше, чем для разложения воды под действием ЭР с образованием  $O_3$  и  $H_2O_2$  (без образования и участия частиц железа). Это связано с тем, что в последнем случае электрическая энергия расходуется на образование каждой молекулы продукта, а в ЭР с эрозией электрода она затрачивается на образование частицы металла, содержащей порядка  $10^7-10^8$  атомов. При размерах частиц около 30–50 нм требуется разорвать лишь менее 1% ее связей с матрицей; далее наночастицы реагируют самопроизвольно с образованием конечного продукта и выделением энергии. Роль ЭР при этом сводится к активации (депассивации) металла как за счет образования наночастиц, так и за счет саморазогрева, при этом коэффициент усиления (в расчете на энергию, затраченную на отрыв частички) будет более 100. Эта оценка произведена без учета затрат на плавление металла; этот учет уменьшит коэффициент усиления. Вычисленное из экспериментальных данных значение больше ожидаемого (из приведенных соображений) в 2–3 раза, что может быть связано с активацией взаимодействия воды с матрицей металла в месте отрыва частицы или с меньшими затратами энергии на диспергирование металла путем разбрызгивания.

Значение затрат энергии при электроимпульсной эрозии железа  $0.067-0.142$  кВт·ч·моль<sup>-1</sup> (Fe) заметно меньше, чем затраты на электроразрядное получение молекул  $H_2O_2$  и радикалов  $OH$  в воде (0.12 молекулы на 100 эВ соответствует  $22.34$  кВт·ч·моль<sup>-1</sup> [15]), поэтому реакции типа (1)–(3) более вероятны; в случае железной загрузки их можно конкретизировать:

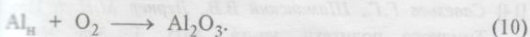
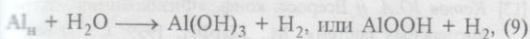
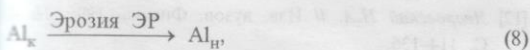




Доля полностью окисленного железа проходит через минимум (рис. 3), что может быть связано с расходом растворенного кислорода по реакциям (6) и (7), с последующим увеличением этой доли за счет диффузии кислорода к недоокисленным частицам.

В случае алюминиевой загрузки происходящие процессы проще: образующиеся в результате электроразряда частицы алюминия взаимодействуют с водой и кислородом по реакциям (2), (3) с образованием гидроксида, который может разложиться до оксидгидроксида и оксида.

Основные стадии процесса для алюминиевой загрузки, вероятно, можно представить следующей схемой:



В растворе могут образоваться комплексные ионы, например,  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$ ,  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2]^+$ .

Для кинетики эрозии возможны три механизма. Первый состоит в том, что эрозия происходит за счет микровзрывов материала электродов (загрузки) в местах контактов, причем природа и количество таких контактов остаются неизменными во время эрозии. Такой механизм может реализоваться при нагрузке в виде шаров или частиц других форм, обладающих поверхностями небольшой кривизны. Реализации этого механизма будут способствовать тонкие плотные пленки на поверхности металла, пробой которых вызывает эрозию, а также низкая температура плавления металла и его низкая твердость. Этот случай видимо реализуется для алюминиевой загрузки, так как скорость эрозии постоянна (рис. 4).

Второй механизм характерен для железной загрузки и состоит в том, что эрозия происходит на неровностях, имеющих большую кривизну поверхностей (малые радиусы кривизны). При электроразряде происходит уменьшение высоты выступов и количества неровностей, снижение их высоты вызывает рост сопротивления пробойных промежутков и уменьшение доли энергии, идущей на распыление материала.

Зависимость скорости эрозии от времени в этом случае в общем виде можно представить как

$$\frac{dc}{dt} = k c^{\frac{1}{n}}, \quad \text{VV} \quad (IV)$$

где  $c$  – концентрация диспергированного металла в

суспензии,  $n$  – показатель степени, зависящий от геометрии электродов:  $n=3$ , если эрозии подвергаются выступы, так что объем диспергируемого металла пропорционален высотам выступов;  $n=2$ , если продукты эрозии изолируют или как либо уменьшают активную площадь электродов;  $n=1$ , если степень эрозии зависит от объема удаленного при эрозии материала (например, при уменьшении проводимости жидкости, что маловероятно).

После интегрирования получим

$$c_{\text{Fe}} = \frac{n+1}{n} k t^{\frac{n}{n+1}} = k_n t^{\frac{n}{n+1}} \quad (V)$$

Сравнение экспериментально полученных зависимостей выхода эрозии от времени [рис. 2, формула (I)] показывает, что  $\nu=0.72$ . Это значение соответствует  $1/n=0.38$ , что несколько больше теоретического значения  $1/n=0.33$ , относящегося к случаю эрозии выступов.

Третий механизм состоит в том, что после первичной эрозии, например по механизму 2, в местах поврежденной иницируется самопроизвольная топохимическая реакция. Если она быстро прекращается (быстрое образование защитной пленки), то брутто кинетика может соответствовать формуле (V). Если же удельная скорость реакции в месте отрыва частицы будет оставаться постоянной, то вид кинетического уравнения усложнится:

$$\frac{dc}{dt} = k_1 c^{\frac{1}{n}} - k_2 c^m, \quad (VI) \quad \text{VV}$$

где  $n$  – показатель геометрии для первичной эрозии;  $m$  – показатель топохимической реакции, зависящий от геометрии реакционной зоны;  $k_1$  и  $k_2$  – эффективные константы скорости первичной эрозии и топохимической реакции.

Интегрирование этого выражения в общем виде дает довольно сложные и неудобные для анализа формулы. Однако в некоторых частных случаях получают достаточно простые, например, для  $n=3$  и  $m=1$ :

$$t = \frac{3}{4k_2} \left( k_1 + k_2 c^{\frac{4}{3}} \right). \quad (VII)$$

Такой механизм возможен, например, в присутствии катализатора.

### Выводы

1. Показано, что действие на металлическую нагрузку импульсных электроразрядов вызывает ее эрозию с последующей реакцией окисления образующихся микро- и наночастиц. При этом происходит образование осадков, имеющих различную морфологию:

для Al – волокнистую, для Fe – смешанную (пленки, иглы, нанокристаллы) морфологию.

2. Энергетические затраты составляют  $0.142 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{моль}^{-1}$  атомов для Fe, что в 275 раз меньше, чем при электролитической эрозии. Для алюминиевой загрузки затраты энергии примерно в 3 раза меньше, что связано с меньшей температурой плавления алюминия.

3. Кинетический анализ показал, что при электроэрозии загрузки в виде железных стружек торможение эрозии происходит из-за диспергирования выступов (острий) с постепенным их сглаживанием; электроэрозия алюминия в подобных условиях, по крайней мере при временах порядка 30 минут, идет с постоянной скоростью, что, вероятно связано с большей пластичностью и меньшей температурой плавления алюминия и особыми свойствами поверхностной оксидной пленки.

#### Список литературы

- [1] А.с. 70000 СССР. Способ получения порошков и устарейство для его осуществления.
- [2] Намитов К.К. // Физические основы электронской обработки металлов. М.: Наука, 1966. С. 86–108.
- [3] Горячев В.Л., Коробочко В.Ю., Кулишевич А.И. и др. // Изв. АН. Сер. Физ. 1999. № 11. С. 2294–2297.
- [4] Горячев В.Л., Уфимцев А.А., Ходаковский А.М. // Письма в ЖТФ. 1997. Т.23. № 10. С. 25–29.
- [5] Фоминский Л.П. // Электронная обработка материалов. 1980. № 1. С. 46–49.
- [6] Зубенко А.А., Юцишина А.Н. // Электронная обработка материалов. 2001. № 6. С. 60–65.
- [7] Шаманский В.В., Даниленко Н.Б., Гулак Н.В. // Основные водохозяйственные проблемы и пути их решения. К 100-летию Томского водопровода: Материалы научно-практ. конф. Томск: ОАО «Томскводоканал». 2005. С. 40–42.
- [8] Ляшко А.П., Медвинский А.А., Савельев Г.Г. и др. // Кинетика и катализ. 1990. Т. 31. № 4. С. 967–972.
- [9] Байрамов Р.К. // ЖПХ. 2003. Т. 76. № 5. С. 771–773.
- [10] Байрамов Р.К. // ЖПХ. 2003. Т. 76. № 7. С. 1067–1070.
- [11] Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю.Лурье. М.: Химия, 1973. 263 с.
- [12] Яворовский Н.А. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 4. С. 114–136.
- [13] Котов Ю.А. // Всеросс. конф. «Физикохимия ультрадисперсных систем». М.: МИФИ. 1999. С. 60–66.
- [14] Савельев Г.Г., Шаманский В.В., Лернер М.И. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2005. Т. 308. № 1. С. 97–102.
- [15] Пискарев И.М. // ЖФХ. 2000. Т. 74. № 3. С. 546–551.