К. ф.-м. н. **Г. Е. Беляев**, к. т. н. **М. С. Власкин**, **А. В. Григоренко**, д. ф.-м. н. **А. З. Жук** (ओ), **И. А. Липатова**, д. т. н. **Е. И. Школьников**

ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)», Москва, Россия

УДК 66.046.41;66.046.44

ПОВЫШЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ЭЛЕКТРОКОРУНДА ПУТЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОКАЛИВАНИЯ

Экспериментально продемонстрирована возможность повышения химической чистоты порошков электрокорунда путем высокотемпературного (~1750 °C) прокаливания в вакууме (~10⁻⁵ мм рт. ст.). Термообработаны три образца промышленного электрокорунда, отличающиеся гранулометрическим и примесным составом, после чего количество примесей снизилось в 10 раз: образцы были практически полностью очищены от примесей Na, Mg, K, Mn, Cu и Zn, а содержание железа снизилось в 8–10 раз. Установлено, что образцы представляют собой набор пористых гранул размером 16–60 мкм, сложенных из сплошных микрочастиц с характерным размером 0,4–0,7 мкм. Удельная площадь поверхности гранул лежит в диапазоне 2,8–3,3 см²/г.

Ключевые слова: электрокорунд, высокотемпературное прокаливание, пористая структура, диффузия примесей.

введение

Электрокорунд — огнеупорный и химически стойкий сверхтвердый материал на основе Al₂O₃. В России производят электрокорунд четырех видов: нормальный (93–96 % Al₂O₃), получаемый методом восстановительной плавки из боксита; белый (99 % Al₂O₃), выплавляемый из глинозема; легированный, получаемый при помощи плавки боксита или глинозема с введением элементов (хрома, титана, циркония), существенно изменяющих свойства корунда; монокорунд, получаемый в результате сплавления боксита с сернистым железом и последующего выделения монокристаллов корунда [1].

Белый электрокорунд состоит из α -Al₂O₃ (98–99 %) и примесей (1–2 %) в виде высокоглиноземистого алюмината натрия и других минералов. Производство белого электрокорунда представляет собой процесс дуговой плавки глинозема (Al₂O₃, предварительно полученного из природного боксита в процессе Байера или ему подобного), в результате чего γ -Al₂O₃ полностью преобразуется в α -Al₂O₃. Плавка глинозема производится непрерывным способом с периодическим выпуском расплава электрокорунда в специальные изложницы. Белый электрокорунд используется для обработки по-



верхностей твердых сплавов, в производстве керамических изделий (заполнитель), в литейном производстве для обеспечения антипригарного эффекта и в порошковой металлургии. Использование электрокорунда в качестве заполнителя позволяет получить огнеупоры повышенной прочности и с увеличенным сроком эксплуатации [2].

Химическая чистота электрокорунда является одним из основных свойств, определяющих его потребительские качества и рыночную стоимость. Электрокорунд повышенной химической чистоты используется для изготовления абразивных материалов, высокоплотных корундовых огнеупоров для ответственных узлов футеровки тепловых агрегатов, работающих в условиях переменной окислительно-восстановительной или восстановительной газовой среды, и в частности для реакторов производства технического углерода. Известно, что наиболее стойким огнеупором для работы при температурах до 1900 °C в агрессивных восстановительных газовых средах является высокочистый корундовый огнеупор (Al₂O₃ > 99 %) с минимальным содержанием нежелательных примесей, таких как Na₂O, SiO₂, Fe₂O₃ и др. [2, 3]. Высокотемпературное рафинирование Al₂O₃ лимитируется процессом диффузии примесей к поверхности сплошной микрочастицы и последующей сублимацией примеси с поверхности. Эффективность очистки тем выше, чем меньше размеры сплошных микрочастиц, больше поверхность испарения и меньше плотность пористых гранул. Результатом использования электрокорунда повышенной химической чистоты является повышение термостойкости, эрозионной устойчивости и прочности, уменьшение пористости, а также снижение брака в процессе нагрева огнеупора и последующего охлаждения во всем температурном интервале работы печи. Поэтому получение корунда повышенной химической чистоты является актуальной и практически значимой задачей.

В недавних работах ОИВТ РАН была продемонстрирована возможность очистки α -Al₂O₃ до уровня 99,997 % путем высокотемпературного прокаливания в вакууме [5, 6].

Цель данной работы — исследование возможности повышения химической чистоты промышленного белого электрокорунда методом высокотемпературного прокаливания в вакууме. Полученные результаты в целом согласуются с результатами предыдущих работ по рафинированию порошков Al₂O₃, полученного путем термообработки бёмита [4-6], и могут быть использованы для получения в промышленных масштабах абразивных и огнеупорных корундовых материалов повышенной чистоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах использовали образцы белого электрокорунда, отобранные из слитка, полученного в результате кристаллизации расплава



Рис. 1. Схема внутреннего устройства вакуумной печи: 1, 4, 6 — тепловые экраны; 2, 3 — наружные и внутренние стены; 5 — дно печи; 7 — несущая конструкция тигля; 8 — молибденовый тигель; 9 — блок подачи газа при работе в защитной атмосфере

электрокорунда в изложнице на производстве ОАО «РУСАЛ Бокситогорск». В процессе застывания расплава корунда в слитке формируется ряд областей, химический состав и структура которых существенно различаются [1]. Обычно примеси алюминатов в процессе остывания слитка концентрируются вблизи центра формирующегося слитка. В нижней части слитка образуются кристаллы оксида субмиллиметрового размера с микровкраплениями алюминатов, на боковых поверхностях — структуры дендритного типа.

В экспериментах исследовались три порошковых образца белого электрокорунда: образец I — корка, образовавшаяся на поверхности слитка электрокорунда в результате остывания; образец II — образец из средней части; образец III — образец из нижней части.

Вакуумную термообработку образцов проводили на установке НИКА-М60 производства ФГУП ЭЗАН, которая представляет собой высокотемпературную вакуумную печь с цилиндрическим вольфрамовым нагревателем и теплоизоляционными цилиндрическими молибденовыми экранами, размещенными внутри нагревателя. В пространстве между экранами установлен цилиндрический молибденовый тигель высотой 740 и диаметром 300 мм с толщиной стенки 10 мм (рис. 1, 2). Температуру тигля измеряли оптическим пирометром Кельвин Компакт Д2300. Визирование дна тигля осуществляли через кварцевое смотровое окно в верхней крышке вакуумной камеры (см. рис. 2) и центральное отверстие в тепловом экране 1 (см. рис. 1). Дополнительно температура тигля 8 контролировалась термопарой, которая была подведена к его дну через несущую конструкцию 7. При температурах выше 1000 °C показания термопары и пирометра отличались на величину менее одного градуса.



Рис. 2. Установка для термообработки НИКА-М60: 1 — стойка управления; 2 — вакуумная камера; 3 — регулятор мощности; 4 — система водяного охлаждения; 5 — вакуумная система

38

Методика получения электрокорунда повышенной чистоты

Каждый образец порошка электрокорунда массой 30 г помещали в отдельную молибденовую кювету прямоугольной формы и размещали на дне молибденового тигля печи НИКА-М60.

Параметры процесса вакуумной высокотемпературной обработки порошков электрокорунда были следующими (рис. 3): дегазация материала при 500-800 °С в вакууме под давлением (7-4)·10⁻⁵ мм рт. ст. в течение 2,5 ч; максимальная температура термообработки 1750 °С в вакууме под давлением (1,8-1,2)·10⁻⁵ мм рт. ст. в течение 2 ч; плавное охлаждение в течение 8-9 ч.

Химический состав образцов электрокорунда до и после термообработки определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-MC, X-2 Thermo Scientific, США) с предварительным растворением вещества в смеси H₂SO₄ и H₃PO₄ [7]. Гранулометрический анализ образцов электрокорунда изучали методом лазерной дифракции с помощью Fritsch Analysette 22 с использованием полупроводникового лазера (λ = 650 нм, мощность 7 мВт). Диапазон измерений размера гранул порошков составлял 0,3-600 мкм. Относительная погрешность интегральных распределений составляла 5 %. Микроструктуру образцов исследовали на растровом электронном микроскопе [EOL JSM-7401F. Параметры пористой структуры гранул образцов находили методом лимитированного испарения адсорбата (бензол) [9-13]. На рис. 4 показаны дифференциальные распределения пор по радиусам (РПР) образца III до и после высокотемпературной обработки. Диапазон размеров пор в основном лежит в пределах 20-200 нм. В результате термообработки объем пор существенно уменьшился. При этом следует иметь в виду, что в измеряемый объем частично входит объем промежутков между гранулами, а также объем адсорбционной пленки в более мелких порах, который в рамках данного исследования не учитывался.

Для идентификации пор внутри гранул определяли общую пористость (удельный объем пор) гранул методом их насыщения смачивающей жидкостью (деканом) с последующим определением ее массы и пересчетом в объем, совпадающий с объемом пор. Средний характерный размер микрочастиц, составляющих гранулу, определяли комбинацией обоих методов (рис. 5). Отсекая на РПР объем, соответствующий общему удельному объему пор (из данных по насыщению деканом), находили диапазон пор внутри гранул и приходящееся на них максимальное значение удельной поверхности S. Далее, используя в данном случае сферическую модель формы частиц, оценивали характерный размер микрочастиц d, составляющих пористую гранулу, по выражению:

$$d = 6/(\rho \cdot S), \tag{1}$$

где ρ — истинная плотность α -Al₂O₃, равная 3,99 г/см³.



Рис. 3. Зависимости температуры и давления в вакуумной камере от времени



Рис. 4. Дифференциальные РПР образца III до (1) и после (2) высокотемпературной обработки



Рис. 5. Кумулятивные распределения объемов пор и удельной поверхности по радиусам пор образца III до высокотемпературной обработки (рисунок иллюстрирует алгоритм расчета размеров частиц корунда)

Результаты химического анализа образцов электрокорунда до и после высокотемпературной обработки в вакууме приведены в табл. 1. Общее содержание примесей уменьшилось примерно в 10 раз, а чистота электрокорунда превысила 99,91 %.

Таблица 1. Содержание примесей, мкг/г, в образцах электрокорунда до и после термообработки в вакууме*

Элемент	ПО, мкг/г	Образец I	Образец II	Образец III		
Na	5	<u>1513/< ПО</u>	<u> </u>	<u> </u>		
K	6	$464 / < \Pi O$	$1225 / < \Pi O$	961/<∏O		
Zn	1	59,3/<ПO	20,2 / < ПO	13,6/<ПО		
Cu	1	20,1 / < ПО	5,2/<ПО	< NO / < NO		
Mg	1	19,4 / < ∏O	27,4/3,9	18,0/<∏O		
Mn	0,3	18,5/<ПО	87,4/1,2	81,9/1,2		
Со	0,2	0,28/<∏O	0,61 / < ∏O	0,26/<∏O		
Ca	16	235 / 207	474/474	351/353		
Ga	0,2	118 / 86,9	133/103	124/114		
Cr	1	2,5 / 1,8	10,4 / 9,5	4,7/3,8		
Fe	6	1720 / 255	2131/283	1077/90		
Сумма		4180,5 / 557,6	8055,9 / 885,1	5709,8 / 568,6		
* В числителе привелены значения по термообработки в						

* В числителе приведены значения до термообработки, в знаменателе — после термообработки. ПО — порог обнаружения для элемента в данном анализе, мкг/г.



Рис. 6. Распределения по размерам частиц электрокорунда в образцах до (1) и после термообработки (2) по результатам оптических измерений в образцах I (*a*), II (*б*) и III (*в*)

На рис. 6 показаны распределения по размерам гранул трех исследованных порошков электрокорунда до и после термообработки, найденные оптическим методом. Параметры пористой структуры гранул образцов представлены в табл. 2.

Установлено, что гранулы имеют пористую структуру и сложены из микрочастиц с характерным размером порядка 0,5 мкм. Термообработка образцов сопровождается спеканием, что приводит к уменьшению пористости и удельной поверхности образцов (см. табл. 2, рис. 6, 7).

По характеру выхода примеси электрокорунда можно разделить на три группы. Первая группа элементов (см. табл. 1) — Na, K, Fe. В исходных образцах их концентрация была относительно высока (500-1700 мкг/г). После вакуумной термообработки их содержание снизилось более чем в 7 раз. Ко второй группе относятся элементы, содержание которых в исходных образцах относительно невелико (20-60 мкг/г) — Cu, Mg, Mn и Zn. После термообработки их содержание снизилось до порога обнаружения. К третьей группе элементов относятся Ca и Ga. В исходных образцах содержание этих элементов было достаточно велико (235 и 118 мкг/г), а после термообработки их концентрация изменились крайне незначительно.

Наблюдаемые в экспериментах особенности выхода основных примесей (первая и вторая группы) могут быть интерпретированы с помощью хорошо известных моделей, описывающих сублимацию примесей в многокомпонентных смесях и кнудсеновскую диффузию газа в пористых средах [7, 17, 18].

Процесс высокотемпературного сублимационного рафинирования пористого Al₂O₃ состоит из четырех основных этапов: диффузия примесей к поверхности сплошной микрочастицы; испарение примеси с поверхности микрочастицы; кнудсеновская диффузия примесей внутри гранулы к ее поверхности; кнудсеновская диффузия примесей через слой гранул к внешней поверхности порошкового образца.

Интенсивность выхода примеси из образца определяется скоростями диффузии и испарения примесей с поверхности микрочастицы. Ин-

Таблица 2. Свойства гранул*

Свойства	Образец I	Образец II	Образец III			
Средний размер	16/25	32 / 32	64 / 65			
гранул, мкм						
Удельный объем пор,	0,10 / 0,11	0,14 / 0,09	0,11 / 0,06			
СМ ³ /Г						
Удельная поверхность	2,8 / 2,5	2,2 / 2,5	3,3 / 1,3			
образцов, 104 см²/г						
Характерный размер	0,53 / 0,60	0,68 / 0,60	0,46 / 1,27			
микрочастиц, состав-						
ляющих гранулу, мкм						
* В числителе приведены значения до термообработки, в						
знаменателе — после термообработки.						

40

тенсивность испарения процесса определяется величинами равновесного давления пара примеси при заданной температуре и текущей концентрацией примеси на поверхности микрочастицы.

Характерное время диффузии в сплошной микрочастице можно оценить по формуле

$$x \sim \sqrt{Dt},\tag{2}$$

где х — характерный размер микрочастицы; t — характерное время диффузии; D — коэффициент диффузии примеси в Al₂O₃ при 1750 °C.

Коэффициент кнудсеновской диффузии D_k оценивается по формуле

$$D_k = (d/3)\sqrt{8RT/\pi m},\tag{3}$$

где *d* — характерный диаметр поры; *R* — универсальная газовая постоянная; *T* — температура; *m* — молекулярная масса газа [18].

Процесс сублимации в бинарной смеси описывается уравнением Лэнгмюра [7, 17]. Поток частиц примеси с единицы поверхности *J**:

$$J^{*} = \frac{P_{\rm Fe}}{v_{\rm T}}, v_{\rm T} = \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}}, P_{\rm Fe} = P^{*}_{\rm Fe} \frac{\rho^{*}}{\rho_{\rm Al_{2}O_{3}}}, \tag{4}$$

где $P_{\rm Fe}^*$ — равновесное давление пара примеси при температуре *T*; $P_{\rm Fe}$ — давление пара примеси при плотности примеси в оксиде ρ^* ; ν_T — тепловая скорость частиц; $\rho_{\rm Al_2O_3}$ — плотность оксида; k — постоянная Больцмана.

По данным обзора [19] можно оценить коэффициенты диффузии при температуре эксперимента и характерное время диффузии на расстоянии порядка диаметра микрочастицы (0,5 мкм). Для Na $D = 7,4\cdot10^{-8}$ см²/с, $t \sim 30$ с, для Fe $D = 6\cdot10^{-13}$ см²/с, $t \sim 1,1$ ч.

Величина D_k (3) для диаметра поры около 0,2 мкм (см. рис. 5) составляет: для Fe ~ 0,6·10⁻⁸ см²/с, для Na — 1,35·10⁻⁸ см²/с.

*D*_k для Fe на 5 порядков выше коэффициента диффузии в сплошном оксиде. Следовательно, скорость выхода примеси Fe лимитируется диффузией в сплошной микрочастице и скоростью сублимации с поверхности микрочастицы. Наибольший выход Fe наблюдался для образца III с наиболее развитой поверхностью (см. табл. 1, 2). Следовательно, выход примеси Fe в условиях данных экспериментов лимитирован процессом сублимации с поверхности микрочастиц оксида алюминия.

Для характерной длины диффузии, соответствующей размеру гранулы (порядка 10 мкм), время диффузии для примеси Fe будет порядка 100 ч. Следовательно, достаточно интенсивный выход примеси Fe наблюдается вследствие того, что гранула корунда сложена из микрочастиц субмикронного размера и характерное время диффузии в сплошной микрочастице оказывается сравнимым со временем эксперимента.

D_k для Na имеет тот же порядок величины, что и коэффициент диффузии в сплошном оксиде.



Рис. 7. Микрофотографии образца I до (*a*) и после (*б*) термообработки

Таким образом, скорость диффузии Na в образцах Al_2O_3 достаточно велика, и выход примеси Na лимитируется скоростью испарения с поверхности микрочастиц. Можно предположить, что подобная картина наблюдается и для примесей K, но необходимых литературных данных для оценок диффузии K в Al_2O_3 нет.

D_k для Си и Mg больше коэффициента диффузии Fe [19, 20]. Следовательно, механизмом, лимитирующим выход этих элементов, является сублимация.

Отсутствие влияния термообработки на концентрацию Са и Ga (третья группа элементов) объясняется тем, что эти элементы находятся в корунде в составе тугоплавких оксидов. Температура плавления CaO 2570 °C, Ga₂O₃ в кристаллической решетке корунда не менее 1806 °C [21], т. е. существенно выше температуры термообработки 1750 °C. В работах [22, 23] исследовали химический состав корундов, синтезированных из гидроксидов алюминия, полученных растворением металла в натриевой щелочи. В исходных образцах натрий находился в виде алюминатов. Существенный выход натрия наблюдался при температурах, превышающих температуру плавления алюмината 1650 °C [24]. Известно, что коэффициент диффузии в кристаллах пропорционален амплитуде колебаний атомов и в соответствии с критерием Линдемана, должен заметно возрастать вблизи температуры плавления. Вблизи температуры плавления резко

Таблица 3. Химический состав корунда после вакуумной термообработки

				(
Элемент	Температура термообработки, °С					
	1600 (2 ч)	1600 (10 ч)	1750 (2 ч)	1900 (1 ч)		
Na	< 2,00	< 2,00	2,40	2,80		
Mg	< 9,00	< 9,00	3,70	7,80		
K	< 2,00	< 2,00	< 1,00	< 1,00		
Mn	1,10	< 0,20	< 0,10	< 0,10		
Fe*	169,00	33,10	13,60	49,10		
Co	< 0,04	< 0,04	< 0,30	< 0,10		
Ni	< 0,70	< 0,70	1,70	1,30		
Cu	< 3,00	< 3,00	< 0,20	< 1,00		
Zn	< 0,20	< 0,20	< 0,30	< 1,00		
* Исходная концентрация железа около 500 мкг/г.						

возрастает концентрация вакансий, что также способствует ускорению диффузии [25].

Повышение температуры термообработки пористого корунда активирует два конкурирующих процесса. Увеличение температуры сопровождается ростом скорости диффузии и сублимации, и благодаря самодиффузии активизируется процесс спекания, что приводит к росту размеров микрочастиц и уменьшению удельной поверхности. Это, в свою очередь, увеличивает диффузионный путь примесей и уменьшает площадь поверхности, с которой происходит их испарение.

В табл. З представлены результаты химического анализа корунда, полученного кальцинацией бёмита [5]. При 1600 °С для существенного снижения концентрации железа требуется около 10 ч. Скорость диффузии при этой температуре относительно мала. После термообработки при 1900 °С концентрация железа оказалась выше, чем после нагрева до 1750 °С. Микрочастицы оксида алюминия спекаются, и выход оказывается заметно ниже, несмотря на экспоненциальный рост коэффициента диффузии и

Библиографический список

1. *Гаршин, А. П.* Абразивные материалы и инструменты. Технология производства / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. — 1009 с.

2. **Bezlepkin, V. A.** Improving (perfecting) the composition of a corundum-based refractory / V. A. Bezlepkin, O. Y. Leizerenok, V. Y. Veselova // Refractories. — 1989. — Vol. 30, № 7. — P. 417–418.

3. *Стрелов, К. К.* Структура и свойства огнеупоров / *К. К. Стрелов.* — М. : Металлургия, 1982. — С. 166–168.

4. **Берш, А. В.** Исследование процессов генерации пароводородной смеси в реакторе гидротермального окисления алюминия для энергетических установок / А. В. Берш, А. В. Лисицын, А. И. Сороковиков [и др.] // ТВТ. — 2010. — Т. 48, № 6. — С. 908.

5. *Zhuk, A. Z.* Synthesis of high-purity α -Al₂O₃ from boehmite by high temperature vacuum treatment / *A. Z. Zhuk, M. S. Vlaskin, A. V. Grigorenko* [et al.] // Journal of Ceramic Processing Research. — 2016. — Vol. 17, N $_{2}$ 9. — P. 910–918.

рост парциальных давлений компонентов вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность повышения химической чистоты белого электрокорунда путем его термической обработки в вакууме. Суммарное содержание примесей в образцах электрокорунда после вакуумно-термической обработки уменьшилось в десять раз. Чистота электрокорунда изменилась с 99,2–99,6 до 99,95–99,91 %. Представленные результаты могут быть использованы для получения электрокорунда повышенной химической чистоты в промышленных масштабах.

Установлено, что гранулы исследованных порошковых образцов имеют пористую структуру и сложены из микрочастиц с характерным размером около 0,5 мкм.

Высокотемпературное рафинирование Al₂O₃ лимитируется процессом диффузии примесей к поверхности сплошной микрочастицы и последующей сублимацией примеси с поверхности микрочастицы. Эффективность очистки тем выше, чем меньше размеры сплошных частиц, больше поверхность испарения и меньше плотность пористых гранул. Интенсивный выход примесей наблюдается вследствие того, что гранула корунда сложена из микрочастиц субмикронного размера и характерное время диффузии в сплошной микрочастице оказывается сравнимым со временем эксперимента.

* * *

Авторы выражают благодарность за предоставленные образцы белого электрокорунда управляющему директору ОАО «РУСАЛ Бокситогорск» А. А. Голованову.

6. *Kislenko, S. A.* Diffusion of cation impurities by vacancy mechanism in α -Al₂O₃: effect of cation size and valence / *S. A. Kislenko, M. S. Vlaskin, A. Z. Zhuk //* Solid State Ionics. — 2016. — Vol. 293. — P. 1–6.

7. **Бокштейн, С. З.** Структура и свойства металлических сплавов : монография / С. З. Бокштейн. — М. : Металлургия, 1971. — 496 с.

8. *Khvostikov, V. A.* Analysis of α-alumina samples by mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation / V. A. Khvostikov, V. K. Karandashev, Z. P. Burmii // Inorganic Materials. — 2015. — Vol. 51, № 14. — P. 1410–1415.

9. Школьников, Е. И. Получение изотерм десорбции паров без измерения давления / Е. И. Школьников, В. В. Волков // Доклады РАН. Физическая химия. — 2001. — Т. 378, № 4. — С. 507-510.

10. **Shkolnikov, E. I.** Estimation of pore size distribution in MCM-41-type silica using a simple desorption technique / *E. I. Shkolnikov, E. V. Sidorova, A. O. Malakhov* [et al.] // Adsorption. — 2011. — Vol. 17, № 6. — P. 911–918.

42

11. **Янилкин, И. В.** Пористая структура и электрическая емкость углей из древесины в водном и органическом электролите / И. В. Янилкин, А. А. Саметов, И. Н. Атаманюк [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2015. — Т. 88, № 7. — С. 36-46.

Yanilkin, I. V. Porous structure and electrical capacitance of charcoals in aqueous and organic electrolytes / *I. V. Yanilkin, A. A. Sametov, I. N. Atamanyuk* [et al.] // Russian Journal of Applied Chemistry. — 2015. — Vol. 7. — P. 1157–1167.

12. **Вервикишко, Д. Е.** Влияние режимов синтеза активированного угля из древесины на его пористую структуру и удельные характеристики двойнослойных суперконденсаторов с электролитом на основе серной кислоты / Д. Е. Вервикишко, Е. И. Школьников, И. В. Янилкин, Ю. Г. Чирков, В. И. Ростокин // Электрохимия. — 2017. — Т. 53. — Вып. 5. — С. 1–11.

13. Школьников, Е. И. Влияние пористой структуры электродов из активированного угля на характеристики двойнослойных суперконденсаторов / Е. И. Школьников, Е. А. Киселева, Д. Е. Вервикишко [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2017. — Т. 90, № 4. — С. 449-454.

14. *Chapman, S.* The mathematical theory of nonuniform gases ; 3rd edition / *S. Chapman, T. G. Cowling.* — Cambridge University Press, 1990. — P. 88.

15. **Drowart, J.** Inorganic chemistry division / J. Drowart, C. Chatillon, J. Hastie, D. Bonnell // Pure Appl. Chem. — 2005. — Vol. 77, № 4. — P. 683–737.

16. **Белов, Г. В.** Моделирование равновесных состояний термодинамических систем с использованием ИВТАНТЕРМО для Windows / *Г. В. Белов, В. С. Иориш, В. С. Юнгман //* Теплофизика высоких температур. — 2000. — Т. 38, № 2. — С. 191–196.

17. *Powell, A.* Analysis of multicomponent evaporation in electron beam melting and refining of titanium alloys / *A. Powell, J. Van Den Avyle, B. Damkroger* [et al.] // Metall. Mater. Trans. — 1997. — 38B. — P. 1227–1239.

18. *Malek, K.* Knudsen self- and Fickian diffusion in rough nanoporous media / *K. Malek, M. O. Coppens* // The Journal of Chemical Physics. — 2003. — Vol. 119, № 5. — P. 2801–2811.

19. **Doremus, R. H.** Diffusion in alumina / *R. H. Doremus* // J. Appl. Phys. — 2006. — Vol. 100, № 10. — Article № 101301.

20. *Harding, J. H.* Experiment and theory of diffusion in alumina / *J. H. Harding, K. J. W. Atkinson, R. W. Grimes* // J. Am. Ceram. Soc. — 2003. — Vol. 86, № 4. — P. 554–559.

21. **Маслов, В. Н.** Монокристаллы β-Ga₂O₃, выращенные из расплава оксидов галлия и алюминия / В. Н. Маслов, В. М. Крымов, Е. В. Калашников, В. И. Николаев // Физика и механика материалов. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 194–199.

22. *Ambaryan, G. N.* Advanced manufacturing process of ultrahigh-purity α -Al₂O₃ / *G. N. Ambaryan, M. S. Vlaskin, O. A. Buryakovskaya* [et al.] // Sustainable Materials and Technologies. — 2018. — Vol. 17. — Article № e00065. — 6 p. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993718300708.

23. **Ambaryan, G. N.** Technology for high pure aluminum oxide production from aluminum scrap / G. N. Ambaryan, M. S. Vlaskin, E. I. Shkolnikov, A. Z. Zhuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 250, \mathbb{N} 1. — P. 012044.

24. **Волков, А. И.** Большой химический справочник / А. И. Волков, И. М. Жарский. — Минск : Современная школа, 2005. — 608 с.

25. **Жирифалько, Л.** Статистическая физика твердого тела / Л. Жирифалько. — М. : Мир, 1975. — 382 с. ■

Получено 24.07.18 © Г. Е. Беляев, М. С. Власкин, А. В. Григоренко, А. З. Жук, И. А. Липатова, Е. И. Школьников, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

