

УДК 536.46:621.762:662.612

**Ф.Н. Чернов, В.И. Малинин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **ВЫДЕЛЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНОГО ОКСИДА ИЗ СУСПЕНЗИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ МЕТАЛЛОГАЗОВОЙ СМЕСИ**

Рассматривается модель осаждения частиц в слабоконцентрированной суспензии, которая учитывает влияние броуновского движения. Определяется критерий необходимости учета броуновского движения ( $A$ ) при осаждении дисперсного оксида: для равновесного распределения в слое суспензии при  $A \gg 1$  весь объем частиц находится у самого дна емкости, при  $A \leq 1$  частицы распределяются по всей высоте столба жидкости. Рассчитываются параметры гравитационного осаждения и распределения наночастиц по высоте слоя суспензии. Расчет показывает невозможность выделения методом гравитационного отстоя частиц диаметром менее 50 нм. Сократить время осаждения наночастиц и избавиться от влияния броуновского движения предлагается с помощью применения эффекта электрофореза. Рассчитываются параметры осаждения частиц дисперсного оксида с помощью электрофореза. Сравнительный анализ показывает, что применение электрического поля позволяет сократить время осаждения частиц размером менее 100 нм при толщине слоя 5 см приблизительно в 900 раз и значительно уменьшить влияние броуновского движения, что делает целесообразным применение электрофореза для промышленного выделения наночастиц.

**Ключевые слова:** наноультрадисперсный оксид, слабоконцентрированная стабильная суспензия, броуновское движение, наночастицы, интегральное распределение, электрофорез, параметр Дебая, электрокинетический потенциал.

**F.N. Chernov, V.I. Malinin**

Perm National Research Polytechnic University

## **EXTRACTION OF THE NANODISPERSE OXIDE FROM SUSPENSION OF COMBUSTION PRODUCTS OF THE METAL GAS MIXTURE**

It is considered the model of sedimentation of particles in weak suspension which considers influence of Brownian motion. In sedimentation of disperse oxide the criterion of need of the accounting of Brownian motion is defined: for equilibrium distribution at  $A \gg 1$  all volume of particles is in a suspension layer at the bottom of capacity; at  $A \leq 1$  particles are distributed on all height of liquid column. Parameters of gravitational sedimentation and distribution of nanoparticles on height of suspension layer are calculated. Calculation shows impossibility of extraction of particles with diameter less than 50 nanometers by a method of gravitational sedimentation. To reduce time of nanoparticles sedimentation and to get rid of influence of Brownian motion it is offered to apply the electrophoresis effect. Parameters of nanoparticles sedimentation of disperse oxide by means of an electrophoresis are calculated. The comparative analysis shows that application of electric field allows to reduce time of sedimentation

of particles less than 100 nanometers in size at a thickness of layer of 5 cm approximately by 900 times and considerably to reduce influence of Brownian motion that does expedient the application of electrophoresis for industrial extraction of nanoparticles.

**Keywords:** nanosuperdispersed oxide, weak stable suspension, Brownian motion, nanoparticles, integral distribution, electrophoresis, Debye's parameter, electrokinetic potential.

Развитие современных технологий основывается на производстве высококачественных порошковых материалов, обладающих высокой химической чистотой продукта, требуемым фазовым и дисперсным составом, сферической формой частиц, высокой твердостью и тугоплавкостью, окислительной и коррозионной стойкостью и в некоторых случаях особыми электрическими и оптическими характеристиками. Порошки, обладающие такими свойствами, находят применение в производстве машиностроительной керамики, композиционных материалов, в электронике, химической промышленности и других областях [1, 2]. Одним из наиболее востребованных для современных технологий является наноультрадисперсный порошок (НУДП). Общий недостаток используемых методов получения НУДП состоит в низкой производительности и невозможности их применения для промышленного производства. В научно-исследовательских работах [3, 4] был предложен новый высокопроизводительный метод получения высокодисперсных порошков оксидов металлов – метод сжигания металлгозовой смеси, который позволяет получать продукты высокого качества при большой производительности. Недостатком данного метода является необходимость выделения дисперсной фракции из суспензии продуктов сгорания.

Наиболее целесообразным способом выделения оксида с заданными свойствами из конденсированных продуктов сгорания является осаждение свободных частиц из слабоконцентрированной суспензии. Этот метод основан на существенном различии времен оседания крупных и мелких частиц [5].

В работе [5] осаждение ультрадисперсных частиц рассматривалось только как движение по вертикали под действием сил тяжести и вязкого трения (частицы двигаются, не сталкиваясь между собой) и рассчитывалось по формуле Стокса. Однако ввиду своей малости нанодисперсные частицы в суспензии ведут себя подобно молекулам жидкости. Они участвуют в броуновском движении, беспорядочно двигаясь и сталкиваясь между собой. Таким образом, движение нанодисперсных частиц представляет собой совокупность оседания под

действием силы тяжести и броуновского движения. Исходя из этого необходимо исследовать влияние броуновского движения на оседание частиц в слабоконцентрированной стабильной суспензии, определить характер распределения наночастиц по высоте столба жидкости и найти способы влияния на время оседания наночастиц и на их распределение в слое суспензии.

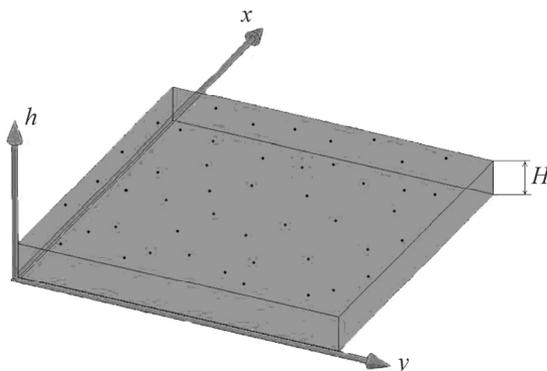


Рис. 1. Слой слабоконцентрированной стабильной суспензии

На рис. 1. изображен слой слабоконцентрированной стабильной суспензии высотой  $H$ . Рассматриваемая задача обладает плоской симметрией (во внимание принимается движение частиц только по вертикали):

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial n}{\partial y} = 0.$$

Рассматриваемые наноультрадисперсные частицы находятся в среде жидкости и участвуют в сложном движении. Их поведение описывается уравнением Эйнштейна – Колмогорова в частных производных [6]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial h} \left( D \frac{\partial n}{\partial h} + bF \right), \quad (1)$$

где  $n$  – количество частиц на высоте  $h$ ;  $t$  – время;  $D$  – коэффициент диффузии;  $b$  – подвижность частицы;  $F$  – результирующая всех сил действующих на частицу полей.

$$D = bkT, b = (3\pi d\eta)^{-1}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – температура суспензии;  $d$  – диаметр сферической частицы;  $\eta$  – вязкость среды (жидкости).

Введем новую безразмерную величину  $z$  вместо  $h$  – высоты столба жидкости:

$$z = \frac{h}{H}. \quad (3)$$

Тогда уравнение Эйнштейна – Колмогорова примет вид

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{D}{H^2} \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + \frac{bF}{H} \frac{\partial n}{\partial z}, \quad (4)$$

где  $\frac{H}{bF} = \frac{H}{v} = \tau_F$  – время оседания частиц; здесь  $v$  – скорость оседания частиц;

$$\frac{H^2}{D} = \tau_D \text{ – время диффузии частиц.} \quad (6)$$

Запишем уравнение с вновь введенными параметрами:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{\tau_D} \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + \frac{1}{\tau_F} \frac{\partial n}{\partial z}. \quad (7)$$

Как было сказано выше, движение наноультрадисперсных частиц в суспензии состоит из двух составляющих: броуновского движения и оседания под действием силы тяжести. Броуновское движение характеризуется временем диффузии частиц  $\tau_D$ , а свободное оседание – временем оседания  $\tau_F$ .

Сделаем безразмерным время  $t$ :

$$\tau = \frac{t}{\tau_D}. \quad (8)$$

Уравнение Эйнштейна – Колмогорова в частных производных с безразмерными параметрами запишется в виде

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + A \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (9)$$

где параметр  $A$  определяет отношение времени диффузии ко времени оседания:

$$\tau_D = \frac{H^2}{D} = \frac{H^2}{bkT}, \quad \tau_F = \frac{H}{bF} = \frac{H}{v}, \quad A = \frac{\tau_D}{\tau_F} = \frac{HF}{kT}. \quad (10)$$

При времени, стремящемся к бесконечности ( $\tau \rightarrow \infty$ ), значения параметров рассматриваемой системы стремятся к установившимся (постоянным) значениям, значения функции  $p$  к значениям равновесной функции  $p_e$ :

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = 0,$$

а плотность потока  $j$  функции  $p$  равна нулю:

$$j = \frac{\partial p}{\partial z} + Ap = 0.$$

Уравнение (9) для равновесной функции  $p_e$  запишется в виде

$$\frac{\partial^2 p_e}{\partial z^2} + A \frac{\partial p_e}{\partial z} = 0.$$

Решение этого уравнения дает равновесную дифференциальную функцию распределения вероятностей нахождения частиц по безразмерной высоте  $z$ , которая показывает вероятность нахождения частицы на заданной высоте:

$$p_e = B e^{-Az}, \quad (11)$$

где коэффициент  $B$  получаем из условия нормировки функции  $p_e$ :

$$\int_0^1 p_e dz = 1, \quad B = \left( \int_0^1 e^{-Az} dz \right)^{-1} = \frac{A}{1 - e^{-A}}, \quad (12)$$

и равновесную интегральную функцию, показывающую вероятность нахождения частиц в диапазоне высот (от нуля до заданной):

$$P_e(z) = \int_0^z p_e dz = \frac{B}{A} (1 - e^{-Az}). \quad (13)$$

На рис. 2 представлена зависимость функций  $p_e$  и  $P_e$  от  $z$  для конкретных значений параметра  $A$ .

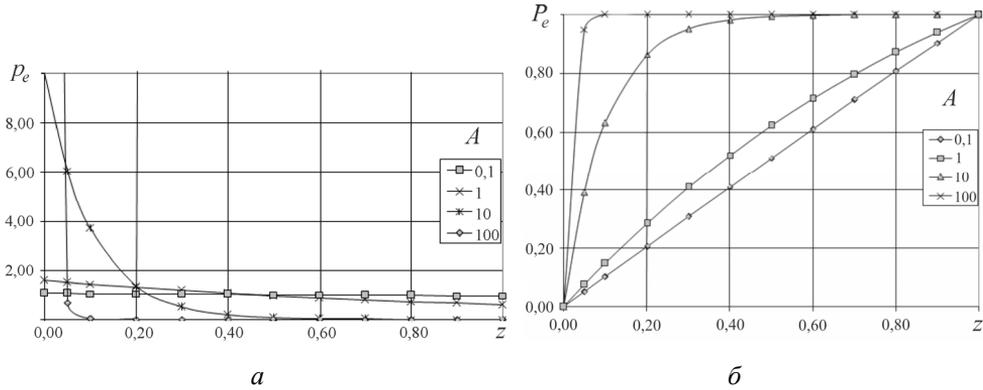


Рис. 2. Дифференциальное (а) и интегральное (б) равновесное распределение вероятностей нахождения наноультрадисперсных частиц по безразмерной высоте  $z$  при заданных значениях параметра  $A$

В зависимости от соотношения временных параметров (диффузии и оседания) параметры  $A$  и  $B$ , функции  $p_e$  и  $P_e$  принимают следующие значения:

1-й случай:  $\tau_D \rightarrow \infty$  или  $\tau_D \gg \tau_F$ :  $A \gg 1, B \gg 1$

1.1.  $z \rightarrow 0, p_e \gg 1, P_e = 0$ ;

1.2.  $z \rightarrow 1, p_e \rightarrow 0, P_e = 1$ .

2-й случай:  $\tau_F \rightarrow \infty$  или  $\tau_F \gg \tau_D$ :  $A \ll 1, B \approx 1$

1.1.  $z \rightarrow 0, p_e \approx 1, P_e = 0$ ;

1.2.  $z \rightarrow 1, p_e \rightarrow 1, P_e = 1$ .

Если известны конкретные значения  $P_e^*$ , то из формулы (13) можно найти значения высот, соответствующих конкретным значениям функции:

$$z^* = -\ln\left(1 - \frac{P_e^* A}{B}\right) / A. \quad (14)$$

По формуле (14) выводим конкретную зависимость  $z^*$  от параметра  $A$ , представленную на рис. 3 в логарифмическом масштабе.

Анализ рис. 3 показывает, что, варьируя параметр  $A$ , можно изменять высоту  $z^*$ , по которой равномерно распределены частицы. При значениях  $A$ , достигающих второго и третьего порядка, весь объем частиц находится у самого дна емкости с суспензией. При постепенном уменьшении  $A$  увеличивается высота  $z^*$ , а при значениях  $A \leq 1$  частицы распределяются по всей высоте столба жидкости ( $A \rightarrow 0, z^* \rightarrow 1$ ).

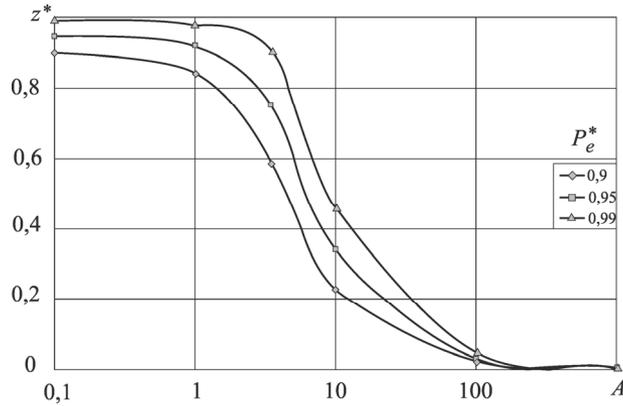


Рис. 3. Зависимость высоты  $z^*$  от параметра  $A$  при заданном равновесном распределении частиц по высоте

По формулам (10) и (14) были рассчитаны параметры осаждения (время оседания  $\tau_F$  и диффузии наночастиц  $\tau_D$ ) и распределения наночастиц по высоте (параметр  $A$  и высота  $z^*$  при заданном интегральном распределении  $P_e^*$ ) [7]. Результаты расчета занесены в таблицу. В табл. 1 показано, каким образом будут оседать частицы заданных размеров, т.е. приведена зависимость этих параметров от размера частиц (диаметра частицы  $d_p$ ).

Значения параметров получены при высоте водяного столба  $H = 5$  см и  $H = 1$  см, плотности воды  $\rho_l = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициенте вязкости воды  $\mu = 1002 \cdot 10^{-6}$  Па·с [8], плотности частиц оксида алюминия  $\rho_p = 3600$  кг/м<sup>3</sup> (оксид алюминия  $\gamma$ -модификации).

Таблица 1

Расчет процесса осаждения НУДП

$d$ , нм	$\tau_F$ , ч	$\tau_D$ , ч	$A$	$z^*$ ( $P_e = 0,9$ )	$z^*$ ( $P_e = 0,99$ )
$H = 5$ см					
200	$2,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
100	$9,9 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
50	$3,9 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^1$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$
$H = 1$ см					
200	$4,9 \cdot 10^1$	$1,3 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^2$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
100	$1,9 \cdot 10^2$	$6,4 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^1$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
50	$7,9 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^3$	4	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$

На основе сопоставления полученных значений времен оседания частиц (см. табл. 1) и аналогичных результатов в работе [9] можно сде-

лать вывод: по мере уменьшения размера наночастиц броуновское движение начинает оказывать все большее влияние на их осаждение. Имеется прямая зависимость между размером частиц и параметром  $A$ : параметр  $A$  существенно уменьшается при уменьшении размера частицы ( $d \rightarrow 0, A \rightarrow 0, z^* \rightarrow 1$ ).

Из сопоставления результатов расчетов, представленных в табл. 1 и на рис. 3, следует, что частицы размером около 50 нм никогда не осядут на дно из-за броуновского движения. Таким образом, в условиях, описанных в справочнике [9], методом седиментации невозможно выделить частицы размером менее 50 нм. Для снижения времени оседания частиц на дно емкости можно уменьшить высоту слоя суспензии. Однако даже при высоте слоя 1 см время оседания частиц размером 50 нм достигает значения 800 ч (см. табл. 1), что превышает 1 мес. Реально же, с учетом броуновского движения, они практически никогда не осядут на дно емкости ( $z^*(P_e^* = 0,99) = 0,89$ , см. рис. 1).

Наиболее действенный способ увеличения параметра  $A$  и одновременного уменьшения времени – увеличение результирующей силы  $F$ , действующей на частицу. Гравитационную составляющую увеличить нельзя, но возможно приложить к емкости с суспензией силу электрического поля, направленную так же, как и сила тяжести, и таким образом увеличить результирующую силу  $F$  [10].

Для ускорения процесса седиментации предлагается использовать электрофорез – движение частиц дисперсной фазы относительно дисперсионной среды под действием внешнего электрического поля.

Экспериментально электрофорез обнаруживается по выделению дисперсной фазы на одном из электродов или в приэлектродном пространстве по смещению границы раздела коллоидная система – дисперсионная среда к одному из электродов (макроэлектрофорез), а также путем наблюдения за перемещением отдельных частиц с помощью микроскопа (микроэлектрофорез).

Для скорости электрофореза получена следующая формула [11]:

$$v = \frac{2\zeta\varepsilon\varepsilon_0 E}{3\eta} f \frac{\chi d}{2}, \quad (15)$$

где  $v$  – скорость электрофореза;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость жидкости;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал частицы;  $\chi$  – параметр Дебая.

Из (15) сила электрического поля, действующего на частицу,

$$F_e = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0\xi dU}{H} f\left(\frac{\chi d}{2}\right), \quad (16)$$

где  $U$  – напряжение;  $H$  – высота столба жидкости.

На основе данных, представленных в работе [11], выполнен расчет зависимости функции  $f$  от диаметра частиц оксида при параметре Дебая  $\chi = 6,7 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ;  $15 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ;  $30 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  (обеспечивается за счет приготовления необходимой концентрации NaCl в суспензии, табл. 2). График этой зависимости представлен на рис. 4 в логарифмическом масштабе.

Таблица 2

Расчет зависимости функции  $f$  от диаметра частицы

$\chi \cdot \frac{d}{2}$	$f$	$d$ , нм
1	1,0267	13
3	1,1005	40
5	1,1630	67
10	1,2500	133
20	1,3400	267
50	1,4200	667
100	1,4580	1333

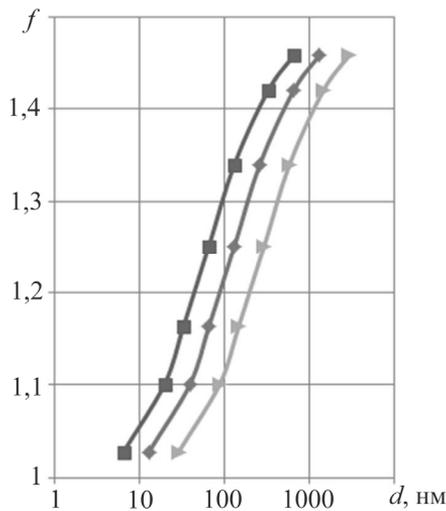


Рис. 4. Зависимость функции  $f$  от диаметра частицы:  
 $\blacktriangle$   $x = 6,7 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ;  $\blacklozenge$   $x = 15 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ;  $\blacksquare$   $x = 30 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

Результаты расчета процесса осаждения НУДП оксида под действием электрического поля представлены в табл. 3. Значение  $\zeta$ -потенциала для оксида алюминия  $\gamma$ -модификации, полученного при температуре 1150 °С, принимается равным 20 мВ [12], напряжение  $U = 50$  В, диэлектрическая проницаемость воды  $\varepsilon = 81$ , диэлектрическая постоянная  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Таблица 3

## Расчет процесса осаждения НУДП с помощью электрофореза

$d$ , нм	$\tau_F$ , ч	$\tau_D$ , ч	$A$	$z^* (P_e = 0,9)$	$z^* (P_e = 0,99)$
$H = 5$ см					
200	1,1	$3,2 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
100	1,2	$1,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
50	1,3	$8,1 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
$H = 1$ см					
200	0,22	$1,3 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
100	0,24	$6,5 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
50	0,26	$3,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$

Сравнительный анализ данных из табл. 1 и 2 позволяет сделать вывод, что с помощью силы электрического поля, действующего на частицы оксида в суспензии, возможно значительно сократить время их осаждения. Так, время осаждения частиц оксида алюминия размером 100 нм при толщине слоя суспензии 5 см без применения электрофореза составляет 990 ч ( $\sim 42$  сут). При тех же значениях размеров частиц и высоте столба жидкости и при приложенной разности потенциалов 50 В время осаждения снижается до 1,1 ч.

Таким образом, использование эффекта электрофореза позволяет сократить время осаждения частиц оксида алюминия более чем в 900 раз. Параметр  $A$  увеличивается в 875 раз, а значение безразмерной высоты  $z^*$  уменьшается в 823 раза, что говорит о значительном снижении влияния броуновского движения на процесс осаждения. Сокращение времени оседания частиц под действием электрического поля, увеличение параметра  $A$  и уменьшение высоты  $z^*$  делает целесообразным применение эффекта электрофореза для промышленного получения НУДП [13, 14].

### Библиографический список

1. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. – М.: Наука, 2007. – 169 с.
2. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. III. Реология дисперсных систем и технологии функциональной магнитной керамики / В.Н. Анциферов, В.Г. Андреев, А.В. Гончар, А.Н. Дубров, Л.М. Летюк, С.А. Попов, А.И. Сатин. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. – 147 с.
3. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 41–51.
4. Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах / А.Н. Золотко, Я.И. Вовчук, Н.И. Полетаев, А.В. Флорко, И.С. Альтман // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 24–34.
5. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: Изд-во УрО РАН, 2006. – 262 с.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – 4-е изд., испр. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
7. Животков А.В., Чернов Ф.Н. Влияние броуновского движения наночастиц  $Al_2O_3$  на их седиментацию в слабоконцентрированной суспензии // Современная техника и технологии: XV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2009. – С. 488–490.
8. Малинин В.И., Животков А.В., Чернов Ф.Н. Исследование распределения наночастиц по высоте в слое слабоконцентрированной стабильной суспензии // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2009: XI Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 98–100.
9. Григорьев И.С., Мейлихов Е.С. Физические величины: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
10. Выделение нано- и ультрадисперсных оксидов из конденсированных продуктов сгорания аэрозвесей металлических порошков / В.И. Малинин, Б.Ф. Потапов, И.С. Антипин, Ф.Н. Чернов // Научные исследования и инновации. Научный журнал. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – Т. 2, № 4. – С. 10–21.
11. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. – М.: Наука, 1976. – 332 с.
12. Козьмина З.П., Кожина И.И. Исследование зависимости электрокинетического потенциала окиси алюминия от условий ее получения // Электроповерхностные явления в дисперсных системах. – М., 1972. – С. 16–20.

13. Малинин В.И., Чернов Ф.Н., Шатров А.В. Опытное-промышленное оборудование для получения наноультрадисперсных порошков оксидов металлов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 3. – С. 409–414.

14. Чернов Ф.Н., Малинин В.И. Автоматизация процесса промышленного выделения наноультрадисперсных порошков из слабоконцентрированной стабильной суспензии // Новые материалы, наносистемы и нанотехнологии: всерос. молодеж. интернет-конф. – Ульяновск, 2010.

### References

1. Alymov M.I. *Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskih materialov* [Powder metallurgy of nanocrystalline materials]. Moscow: Nauka, 2007. 169 p.

2. Antsiferov V.N., Andreev V.G., Gonchar A.V., Dubrov A.N., Letyuk L.M., Popov S.A., Satin A.I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya. III. Reologiya dispersnykh sistem i tekhnologii funktsionalnoy magnitnoy keramiki* [Problems of powder materials science. Part III. Rheology of disperse systems and technology of functional magnetic ceramics]. Ekaterinburg: Uralskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 2003. 147 p.

3. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. *Vosplamnenie i gorenie aerovzvesi alyuminiya v reaktore vysokotemperaturnogo sinteza poroshkoobraznogo oksida alyuminiya* [Ignition and burning of an aero suspension of aluminum in the reactor of high-temperature synthesis of powdery oxide of aluminum]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 41-51.

4. Zolotko A.N., Vovchuk Ya.I., Poletaev N.I., Florko A.V., Altman I.S. *Sintez nanooxidov v dvukhfaznykh laminarnykh plamenakh* [Synthesis of nanooxides in a two-phase laminar flames]. *Fizika goreniya i vzryva*, 1996, vol. 32, no. 3, pp. 24-34.

5. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskih goryuchikh* [Intrachamber processes in plants with the powdery metal fuels]. Ekaterinburg; Perm: Uralskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 2006. 262 p.

6. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1972. 735 p.

7. Zhivotkov A.V., Chernov F.N. *Vliyaniye brounovskogo dvizheniya nanochastits  $Al_2O_3$  na ikh sedimentatsiyu v slabokontsentrirrovannoy suspenzii* [Influence of Brownian motion of nanoparticles of  $Al_2O_3$  on their sedimentation in low-concentrated suspension]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. Tomsk, 2009, pp. 488-490.

8. Malinin V.I., Zhivotkov A.V., Chernov F.N. *Issledovanie raspredeleniya nanochastits po vysote v sloe slabokontsentrirrovannoy stabilnoy suspenzii* [Research of distribution of nanoparticles on height in a layer of low-concentrated stable suspension]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii*

*i innovatsii. Permskiy natsionalniy issledovatel'skiy polytekhnicheskiy universitet*, 2009, pp. 98-100.

9. Grigorev I.S., Meylikhov E.S. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference book]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.

10. Malinin V.I., Potapov B.F., Antipin I.S., Chernov F.N. *Vydelenie nano- i ultradispersnykh oksidov iz kondensirovannykh produktov sgoraniya aerovzvesey metallicheskiykh poroshkov* [Extraction of nanodisperse and ultradisperse oxides from the condensed products of combustion of aero suspensions of metal powders]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii. Permskiy natsionalniy issledovatel'skiy polytekhnicheskiy universitet*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 10-21.

11. Dukhin S.S., Deryagin B.V. *Elektroforez* [Electrophoresis]. Moscow: Nauka, 1976. 332 p.

12. Kozmina Z.P., Kozhina I.I. *Issledovanie zavisimosti elektrokineticheskogo potentsiala okisi alyuminiya ot usloviy ee polucheniya* [Research of dependence of electrokinetic potential of aluminum oxide from conditions of its production]. *Elektropoverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh*. Moscow, 1972, pp. 16-20.

13. Malinin V.I., Chernov F.N., Shatrov A.V. *Opytno-promyshlennoe oborudovanie dlya polucheniya nanoultradispersnykh poroshkov oksidov metallov* [Experimental-industrial equipment for production of nano-ultradisperse powders of metal oxides]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.N. Tupoleva*, 2010, no. 3, pp. 409-414.

14. Chernov F.N., Malinin V.I. *Avtomatizatsiya protsessa promyshlennogo vydeleniya nanoultradispersnykh poroshkov iz slabokontsentrirrovannoy stabilnoy suspenzii* [Automation of process of industrial extraction of nano-ultradisperse powders from low-concentrated stable suspension]. *Novye materialy, nanosistemy i nanotekhnologii*. Ulyanovsk, 2010.

### Об авторах

**Чернов Федор Николаевич** (Пермь, Россия) – соискатель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: thechernovs2009@yandex.ru).

**Малинин Владимир Игнатьевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: malininvi@mail.ru).

### **About the authors**

**Chernov Fedor Nikolaevich** (Perm, Russian Federation) – Doctoral candidate in Technical Sciences, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: thechernovs2009@yandex.ru).

**Malinin Vladimir Ignatevich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malin-invi@mail.ru).

Получено 25.07.2013