

УДК 621.453

А. Ю. Крюков, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
С. Г. Ярушин, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРА- И НАНОДИСПЕРСНЫХ ОКСИДОВ И НИТРИДОВ МЕТОДОМ СЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСЕЙ МЕТАЛЛОВ

Приведены результаты решения задач по разработке принципиальных схем, определению параметров функционирования узлов установки получения ультрадисперсного оксида алюминия методом сжигания порошка металла в прямоточных камерах сгорания. Получены зависимости между параметрами рабочих процессов и элементов конструкции, предложены способы регулирования дисперсности целевого продукта.

Ключевые слова: сжигание металлов, оксид, порошок, воздух, смесь, система подачи, камера воспламенения, параметры конструкции и функционирования.

Одним из самых перспективных направлений исследований в современном материаловедении является получение ультра- и нанодисперсных порошков (УДП) соединений Si_3N_4 , AlN , Al_2O_3 , MgO , BN , других оксидов и нитридов металлов с размером частиц ~ 100 нм, актуальность и коммерческая ценность разработки технологий производства которых определяются высокой потребностью использования в технике и многих других областях [1]. Ведущее место среди методов получения таких материалов занимают процессы горения

аэровзвесей металлов, представляющие новый – «технологический» – аспект сжигания порошковых металлических горючих (ПМГ) [1, 2].

В данной работе по результатам исследований рабочих процессов получения УДП Al_2O_3 методом сжигания порошка металла в прямоточных камерах сгорания [3, 4] установлены физические и размерные связи между параметрами каждого из этапов получения оксида и конструктивными размерами соответствующих узлов опытно-промышленной установки, общая принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

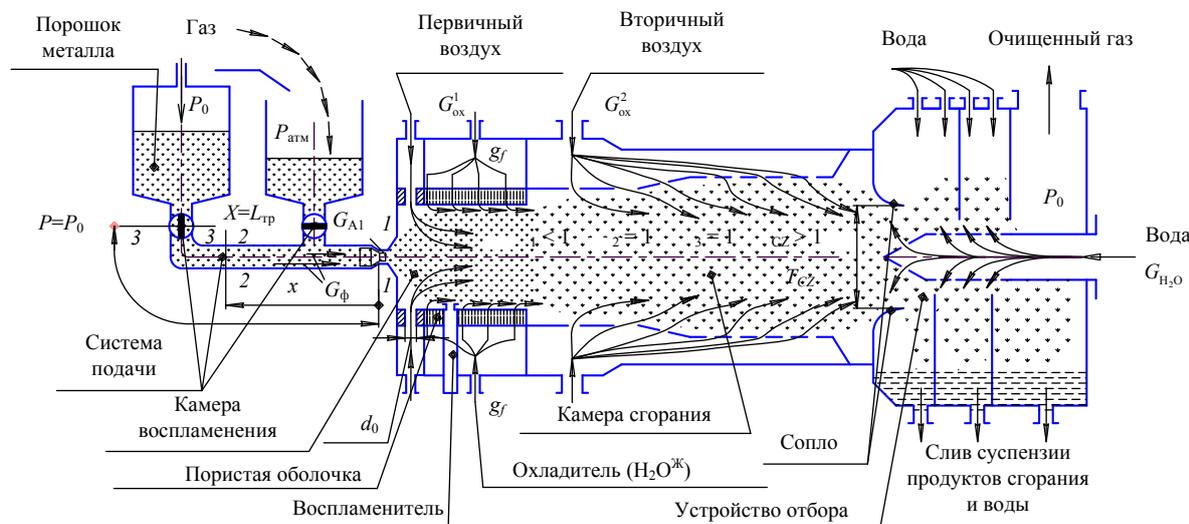


Рис. 1. Схема опытно-промышленной установки получения ультра- и нанодисперсных оксидов и нитридов, расчетная схема процесса подачи порошка в зону реакции

Функционирование установки происходит по следующей схеме. При помощи системы подачи исходный порошок алюминия под действием объемных сил сжатого газа транспортируется в камеру воспламенения (КВ), где смешивается с первичным потоком воздуха, воспламеняется и поступает в камеру сгорания (КС). В КС воспламенившаяся смесь смешивается с вторичным потоком воздуха, и частицы металла догорают. Высокотемпературный поток продуктов сгорания через сопло истекает в устрой-

ство отбора целевого продукта, где образуется суспензия целевого продукта – ультрадисперсного оксида алюминия – и воды. Воспламенитель служит для инициирования химической реакции в начале технологического процесса. Через пористую оболочку осуществляется процесс транспирационного охлаждения КВ. Подвод первичного воздуха в КВ осуществляется в одном сечении через радиальные отверстия, подвод вторичного воздуха в КС – распределенный, осуществляется в нескольких сече-

ниях через специальный распределитель и отверстия в графитовой оболочке, причем конструкция распределителя позволяет варьировать расход в каждом сечении, изменяя коэффициент избытка воздуха α по длине камеры.

Исследования рабочих процессов в системе подачи металла [1] проводились на основе анализа транспортирования порошка под действием объемных сил сжатого воздуха. Элементы расчетной схемы представлены на рис. 1. Газ при открытии выпускного отверстия фильтруется через слой порошка и истекает вместе с металлом в камеру воспламенения установки.

Математическая модель основана на уравнении Дарси и учитывает некоторые эмпирические зависимости [1]:

$$G_{\phi} = -\frac{kP(x)S_{\text{тр}}}{\mu RT} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (1)$$

где x – координата, отсчитываемая от выходного сечения $I-I$ трубопровода; G_{ϕ} – расход фильтрующегося газа, кг/с; P – давление воздуха в трубопроводе с порошком, кг/м²; μ – динамическая вязкость газа, кг·с/м²; R – универсальная газовая постоянная, м/К; T – температура, К; $S_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубопровода подачи, м²; k – газопроницаемость порошка алюминия, м².

Рассмотрены две составляющие движения воздуха в трубопроводах системы подачи: 1) фильтрация через слой движущегося порошка; 2) перенос воздуха, запасенного в порах, вместе с транспортируемым порошком.

В результате интегрирования уравнения (1) получена обобщенная универсальная диаграмма (рис. 2) зависимости давления во входном сечении трубопровода P_0 и перепада давлений между крайними сечениями ΔP от q_p (удельного расхода порошка – на единицу площади поперечного сечения трубопровода) и $L_{\text{тр}}$ (длины трубопровода) [1]. Использование диаграммы позволяет учитывать расход металла

и два геометрических параметра конструкции при заданном рабочем давлении.

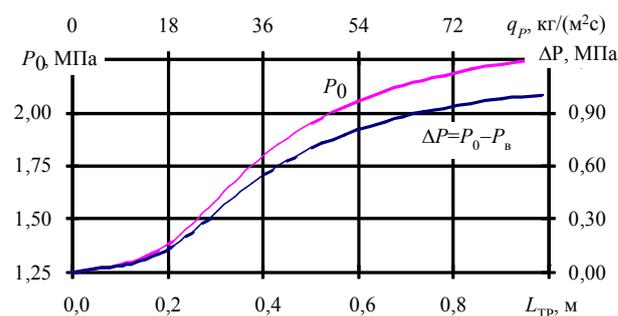


Рис. 2. Обобщенная диаграмма зависимостей между рабочими параметрами системы подачи и основными геометрическими размерами трубопроводов

Для расчетов процесса воспламенения порошка алюминия [1] была использована математическая модель, представленная в работе [2], где наиболее полно учтены особенности горения газозвесей частиц алюминия. Рассматривается одномерный поток полифракционной аэрозвеси сферических частиц алюминия (рис. 4) с переменной скоростью, температурой, плотностью газа, давлением, концентрацией кислорода и продуктов испарения металла.

Основными результатами расчетов являются зависимости (рис. 4): между удельным расходом воздуха G_{0g} (расходом на единицу площади отверстия) и расстоянием, на котором воспламеняются частицы всех фракций алюминия L_{ign} , при различных коэффициентах избытка воздуха α , позволяющие рационально выбирать размеры конструкции при заданных расходах металла и воздуха.

Для анализа транспирационного охлаждения использована модель, построенная на совместном анализе процессов теплообмена и фильтрации с описанием вязкого трения и инерционных эффектов при движении охладителя [4].

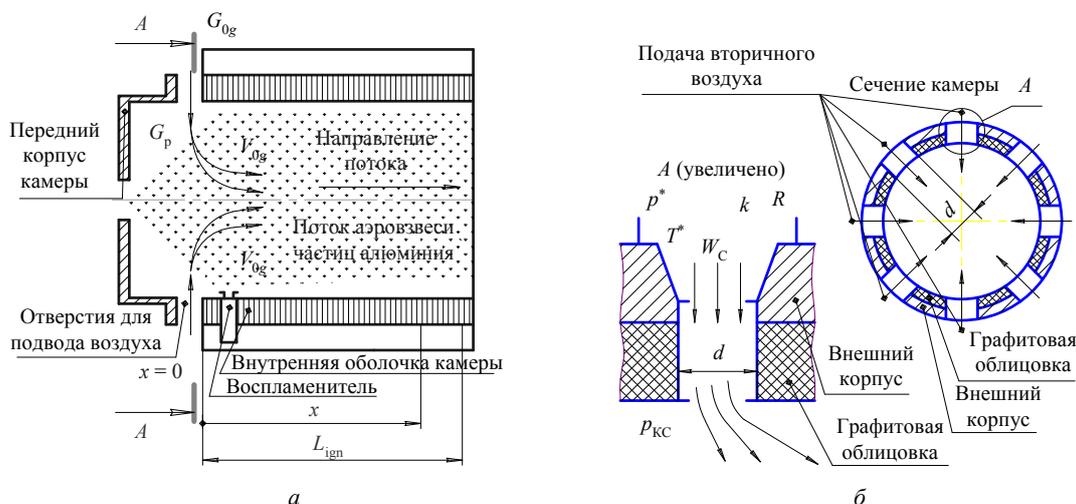


Рис. 3. Схема расчета процесса воспламенения аэрозвеси порошка алюминия: V_{0g} – скорость газа на входе в камеру (а); схема газодинамического расчета отверстий подвода воздуха в КС (б)

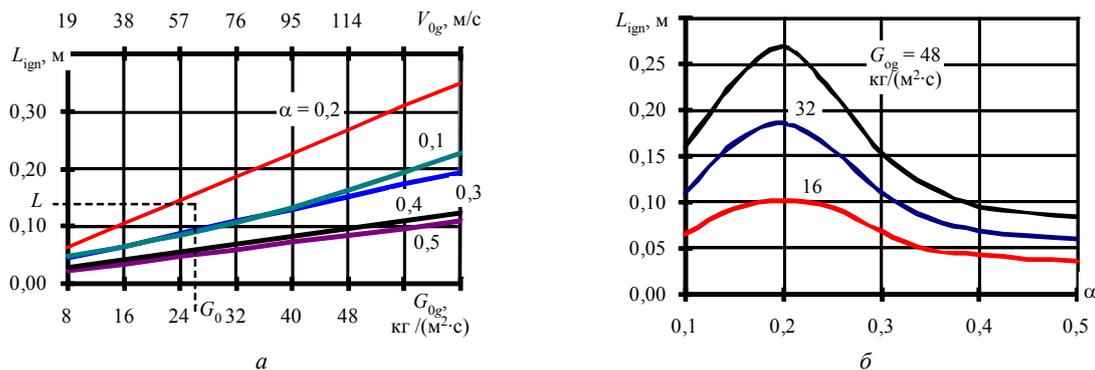


Рис. 4. Зависимость расстояния от входа в камеру, на котором воспламеняются частицы всех фракций исходного порошка («длины воспламенения») L_{ign} : от начального удельного расхода газа G_{0g} (а) при различных α и от коэффициента избытка воздуха α при различных начальных удельных расходах газа G_{0g} (б)

Жидкий охладитель [4] с начальной температурой t_0 прокачивается с удельным массовым расходом g_f через пористую стенку навстречу действующему на ее внутреннюю поверхность тепловому потоку q (рис. 5). На расстоянии L от входа охладитель достигает состояния насыщения, после чего происходит его испарение на участке LK и далее перегрев пара на участке $K\delta$. Участок LK разделен на области I и II с разными режимами движения охладителя: в области I температура проникаемой матрицы возрастает

и достигает при координате Z^* величины T^* перегрева жидкости до завершения ее полного испарения с образованием двухфазного потока перегретого пара с каплями жидкости (область II).

На основании математической модели [4] по методике, представленной в [1], получены зависимости (рис. 5, б) удельного расхода охладителя от его теплоемкости и материала оболочки при заданной толщине δ для параметров процесса, при которых температура стенки T_w не превышает 350°C (623 K) [6].

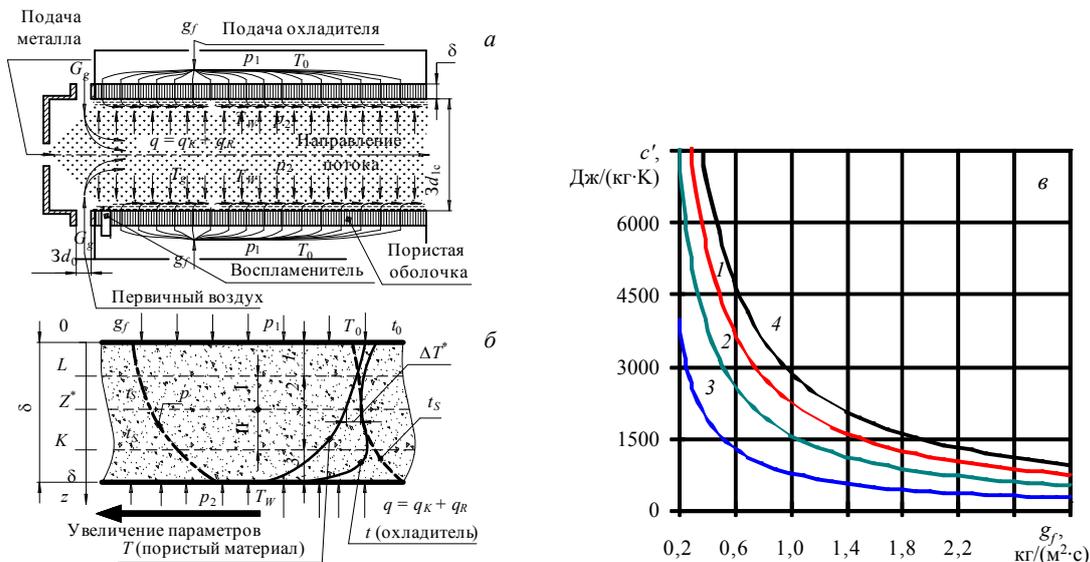


Рис. 5. Принципиальная схема камеры воспламенения промышленной установки получения ультрадисперсного оксида алюминия (а) и физическая модель процесса испарительного охлаждения пористой стенки (б); зависимость удельного расхода охладителя от его теплоемкости: с учетом теплофизических свойств стенки камеры – для высокопористых ячеистых материалов на основе W и Mo (1), высокопористых проникаемых алюмосиликатов (2) и пористых углеродных материалов (3); без учета теплофизических свойств стенки – (4): $\delta = 0,01\text{ м}$ (б)

Одним из важных режимов технологического процесса, влияющих на дисперсность образующегося УДП, является изменение коэффициента избытка воздуха α по длине камеры сгорания (рис. 1). Воздух в камеру сгорания подводится через радиальные отверстия (рис. 3, б). Варьирование α по длине камеры может осуществляться путем изменения диаметра отверстий d .

Воздух подводится в КС с перепадом давления выше критического, поэтому полнота сгорания по-

рошка АСД-4 при рабочем давлении (около $0,2\text{ МПа}$) приближается к 1 (рис. 6, а). Площадь отверстий в стенке КС много меньше площади ее поверхности; давление p^* воздуха и температура T^* на выходе из компрессора равны параметрам торможения. При движении через отверстие давление изменяется от p^* до рабочего $p_{кс}$, скорость потока изменяется от нуля до W_C . Скорость W_C на выходе (скорость подвода) оценивалась по отношению давлений $p_{кс}/p^*$ [5]. Для обеспечения критической скорости $p_{кс}/p^* < 0,528$.

На основании уравнения расхода в газодинамической форме [5] можно получить функцию зависимости d от α :

$$d(\alpha) = \left(\frac{4\chi\alpha G_p \cdot \sqrt{T^*}}{N\phi m^* q(\lambda)\pi} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Здесь χ – стехиометрическое соотношение металла и воздуха; G_p – расход порошка, кг/с; ϕ – коэффициент расхода; газодинамическая функция расхода $q(\lambda) = 1$; m – постоянный для данного газа коэффициент.

Температура T^* определяется для адиабатического процесса сжатия воздуха с температурой T_0 от атмосферного давления $p_0 = 10^5$ Па до $p^* = 0,7$ МПа. На рис. 6, б представлен график зависимости (2) для расхода порошка $G_p = 0,15$ кг/с. По аналогичным зависимостям можно подбирать конструктивные

параметры камеры, обеспечивающие требуемое распределение α по координате x .

С помощью программы АСТРА.4 [6] установлено, что в равновесном составе продуктов сгорания, попадающих в устройство отбора, в опасном количестве присутствуют оксиды азота NO и NO₂. Подача воды позволяет снизить их содержание [1]. На рис. 7 представлена зависимость отношений расхода воды к расходу алюминия от коэффициента α , позволяющая определять параметры подачи воды, при которых концентрации NO и NO₂ не превышают допустимых.

Таким образом, для рациональных интервалов расходов воздуха и металла [1] установлены диапазоны основных параметров внутрикамерных процессов в установке (табл. 1). Способы регулирования дисперсности оксида металла (табл. 2) выявлены при анализе работ А. Я. Лукина и А. М. Степанова [3].

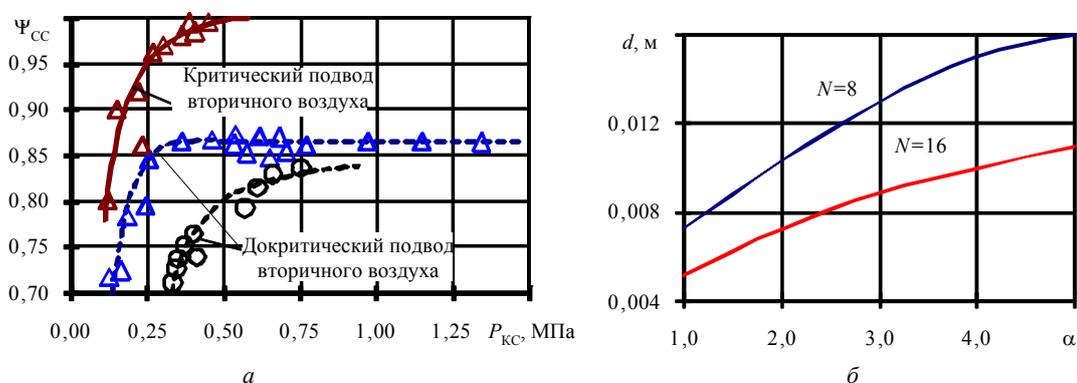


Рис. 6. Зависимость коэффициента полноты сгорания порошков алюминия от давления [3]: \circ – АСД-1, Δ – АСД-4 (а) и диаметра отверстий для подвода вторичного воздуха в КС от α и числа N отверстий в сечении (б)

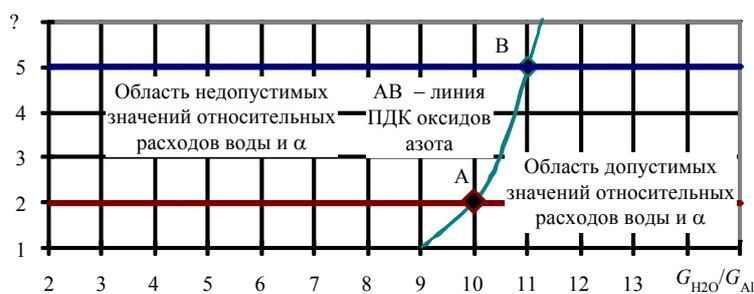


Рис. 7. Области допустимых и недопустимых значений относительных расходов воды и коэффициента избытка воздуха α

Таблица 1. Основные параметры рабочих процессов в установке получения УДП Al₂O₃

Узел установки	Параметры рабочих процессов	Значение параметров
Система подачи	1. Расход исходного порошкообразного материала, кг/с	0,05...0,10
	2.* Давление, МПа	1,25...2,5
Камера воспламенения	1.** Скорость подвода первичного воздуха	дозвуковая
	2.** Коэффициент избытка воздуха α	0,1...0,5
	3.** Расход первичного воздуха, кг/с	0,05...0,2
	4.** Давление, МПа	0,15...0,25
	5. Температура (равновесная), К	2500...3000
	6. Скорость потока, м/с	5...100
	7. Давление охладителя (воды) на входе в пористую оболочку, МПа	0,5...0,6
	8. Расход охладителя (воды), кг/с	0,05...0,1
	9. Скорость фильтрации охладителя (воды), м/с	0,05...0,1

Окончание табл. 1

Узел установки	Параметры рабочих процессов	Значение параметров
Камера сгорания	1. Скорость подвода вторичного воздуха 2.** Коэффициент избытка воздуха α 3.** Расход вторичного воздуха, кг/с 4.** Давление, МПа 5. Температура (равновесная), К 6. Скорость потока, м/с	критическая 2...5 0,3...0,8 0,1...0,2 1700...3000 50...200
Устройство отбора целевого продукта	1.- Расход дистиллированной воды, кг/с 2. Температура (равновесная), К 3. Скорость потока, м/с 4. Давление, МПа	2...5 350...370 5...10 0,1
Управляющие параметры процесса получения УДП Al_2O_3 : * – для производительности; ** – для регулирования свойств целевого продукта; *** – для температуры в устройстве отбора и содержания оксидов азота в продуктах реакции		

Таблица 2. Способы регулирования дисперсности УДП оксида (размер частиц – $D_{ч}$)

Параметр, влияющий на дисперсность Al_2O_3	Закон регулирования	Способ регулирования
1. Давление в камере сгорания P_{KC}	$D_{ч} \sim P_{KC}^{1/3}$	1. Изменение площади критического сечения сопла: $S_{KP} \downarrow \Rightarrow P_{KC} \uparrow$ и $D_{ч} \uparrow$ $S_{KP} \uparrow \Rightarrow P_{KC} \downarrow$ и $D_{ч} \downarrow$ 2. Пропорциональное изменение расходов воздуха и порошка при $\alpha = \text{const}$: $G_{Al} \uparrow$ и $G_B \uparrow \Rightarrow P_{KC} \uparrow$ и $D_{ч} \uparrow$ $G_{Al} \downarrow$ и $G_B \downarrow \Rightarrow P_{KC} \downarrow$ и $D_{ч} \downarrow$
2. Температура в зоне конденсации УДП T_{CZ}	$D_{ч} \sim T_{CZ}$	Изменение расхода вторичного воздуха в зоне конденсации, т.е. изменение α_{CZ} : $\alpha_{CZ} \uparrow \Rightarrow T_{CZ} \downarrow$ и $D_{ч} \downarrow$ < $\alpha_{CZ} \downarrow \Rightarrow T_{CZ} \uparrow$ и $D_{ч} \uparrow$
3. Размер частиц исходного порошка алюминия d_{Al}	$D_{ч} \sim d_{Al}^{1/3...2/3}$	Применение исходного алюминиевого порошка с требуемым размером частиц: $d_{Al} \uparrow \Rightarrow D_{ч} \uparrow$ < $d_{Al} \downarrow \Rightarrow D_{ч} \downarrow$

Результаты исследований позволяют выполнять оценку совершенства разрабатываемых технических решений по промышленным установкам получения нанодисперсных материалов с точки зрения технической возможности их реализации в заданных пределах изменения величины рабочих параметров и габаритов элементов конструкции.

Библиографические ссылки

1. Крюков А. Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра- и нанодисперсных материалов : монография. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 236 с.

2. Малинин В. И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург ; Пермь : УрО РАН, 2006. – 262 с.

3. Лукин А. Я., Степанов А. М. Теоретическое исследование процессов образования конденсированных продуктов при горении частиц металла // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – № 4. – С. 45–49.

4. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкции летательных аппаратов / В. М. Поляев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988. – 168 с.

5. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика : учебник для авиационных вузов. – М. : Машиностроение, 1981. – 264 с.

6. Трусов Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4). – Препринт МГТУ, 1991. – 30 с.

A. Yu. Kryukov, PhD in Engineering, Perm National Research Polytechnic University
S. G. Yarushin, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University

Definition of Functioning Parameters of Units of Ultra- and Nano-Dispersed Oxides and Nitrides Obtaining by Method of Metals Gas Suspensions Combustion

The results of tasks solution on schematic circuits development and on definition of functioning parameters of units of installation intended for manufacture of ultrafine alumina by a metal powder incineration in a straight flow chamber are given. The dependences of characteristics of operating processes on construction parameters are obtained. The methods of desired product dispersion control are offered.

Key words: metal combustion, oxide, powder, air, mixture, supply system, incineration chamber, parameters of construction and functioning.