

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.47.09

УДК 621.547:660

Е.С. Земерев, В.И. Малинин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ПОРОШКОВО-ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В КОНИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ВЫПУСКНЫМ ОТВЕРСТИЕМ

Посвящено описанию процессов, происходящих при движении порошка в коническом канале системы подачи зернистого материала. Указанная система подачи применяется для подачи порошка в камеру сгорания установки синтеза дисперсных оксидов металлов. Кроме того, применение данной системы возможно для некоторых областей аэрокосмической, а также химической отраслей. Определены и рассмотрены зоны течения двухфазной среды. Выведено уравнение напряженно-деформированного состояния порошково-газовой среды для движения в коническом канале. Систематизированы этапы изменения напряженно-деформированного состояния при движении порошково-газовой среды в коническом канале. Сформулированы условия начала и окончания разуплотнения плотного слоя. В соответствии с этими условиями определены граничные сечения максимального и минимального (нулевого) значений напряженно-деформированного состояния зернистого материала. Рассмотрены предельные случаи течения порошково-газовой среды: плотный поток (предельно-неравновесное течение); разуплотненный поток (равновесное течение). При некотором диапазоне значений давления газовой фазы в коническом канале возникает три зоны течения: зона плотного, зона переходного и зона разуплотненного потоков. Изменяя давление газовой фазы, можно изменять режимы течения порошково-газовой среды в коническом канале, тем самым влияя на характеристики истекающей порошково-газовой смеси (порозность зернистого материала, скорость истечения материала и скорость газа).

Ключевые слова: система подачи сыпучих материалов, порошково-газовая среда, плотный и разуплотненный потоки, равновесное течение, предельно-неравновесное течение.

E.S. Zemerev, V.I. Malinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE POWDER-GAS FLOW IN A CONICAL CHANNEL WITH AN OUTLET HOLE

This work is devoted to description of processes occurring in motion of the powder in a conical flow channel of particulate material feed system. This feed system is used to supply powder to the combustion chamber of plant for synthesis of disperse oxides of metals. The use of this system is possible for some areas of aerospace and chemical industry. The regions of two-phase medium motion were identified and discussed. The equation for the stress-strain state of the powder-gas medium for motion in a conical channel was obtained. Stages of stress-strain state of the gas medium motion with powder in a conical channel were systematized. The conditions for the beginning and end of the decompression of the dense layer were formulated. In accordance with these conditions, the boundary sections of the

maximum and minimum (zero) values of the stress-strain state of the particulate material were determined. It was considered the limiting cases with powder flow of the gaseous medium: a dense layer (maximum non-equilibrium flow); decompressed flow (equilibrium flow). In a certain range of pressure values of the gas phase in a conical flow channel there are three zones: zone of dense, transition zone and decompressed flow area. Flow regimes of powder-gas medium in the conical channel can be controlled by varying pressure of gas phase, thus influencing on characteristics of the powder-gas mixture (porosity of the particulate material, gas velocity and velocity of outflowing material).

Keywords: bulk material feed system, powder-gas medium, dense and decompressed flows, equilibrium flow, maximum non-equilibrium flow.

Введение

Многие металлы при горении в активных газах образуют конденсированные продукты сгорания, обладающие высокой твердостью и тугоплавкостью. Если горение этих металлов происходит в виде газозвеси металлических частиц, то продукты их сгорания получают в газодисперсной форме. Изменяя условия горения (давление, температуру, состав газовой фазы, концентрацию дисперсной фазы), дисперсный и химический состав исходных порошков металлов, можно влиять на форму и структуру частиц продуктов сгорания, их размер, химический и фазовый состав [1–5]. Таким образом, сжигая распыленные в активном газе порошкообразные металлы, в технологической установке можно синтезировать новые порошковые материалы с заданными свойствами [1, 2, 6–9]. Важной задачей является создание благоприятных условий для сжигания исходного порошка металла путем его подачи и равномерного диспергирования по сечению реактора синтеза.

Данная работа посвящена описанию процессов, происходящих при движении порошка в коническом канале системы подачи зернистого материала. Указанная система подачи применяется для подачи порошка в камеру сгорания установки синтеза дисперсных оксидов металлов. Кроме того, применение данной системы возможно для некоторых областей аэрокосмической, а также химической отраслей [10–11].

Для понимания физики процесса истечения зернистого материала большое значение имеет исследование процессов течения зернистого материала перед выпускным отверстием.

Зоны течения порошково-газовой смеси

Одна из основных особенностей зернистых материалов состоит в том, что они способны качественно изменять свои реологические ха-

рактические характеристики при изменении пористости. Покажем на графике зоны течения (изменения) состояния порошка при движении и истечении из отверстия. Для этого запишем уравнения неразрывности потока для дисперсионной среды и дисперсной фазы:

$$\varepsilon \rho_g v_g F_c = g_g F_n, \quad (1)$$

$$\rho_m (1 - \varepsilon) v_m F_c = g_m F_n, \quad (2)$$

где ε – порозность порошка; ρ_g, ρ_m – плотность газа и материала соответственно; v_g, v_m – скорости газа и материала соответственно; F_c – проходная площадь канала, по которому движется порошок; g_g, g_m – удельные (отнесенные к единице площади форсунки) расходы газа и материала соответственно; F_n – проходная площадь форсунки.

Разделим уравнение (1) на уравнение (2):

$$\frac{\rho_g}{\rho_m} \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \frac{v_g}{v_m} = \frac{g_g}{g_m} = A_0,$$

$$\frac{v_g}{v_m} = \frac{v_m + v_{gm}}{v_m} = 1 + \frac{v_{gm}}{v_m},$$

$$\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \left(1 + \frac{v_{gm}}{v_m} \right) = A_0 \frac{\rho_m}{\rho_g} = A,$$

$$A = \frac{g_g}{g_m} \frac{\rho_m}{\rho_g} = \frac{v_g}{v_m},$$

где A и A_0 – параметры.

На рис. 1 представлена качественная зависимость зон течения двухфазной среды при движении.

Представленную на рис. 1 зависимость можно условно разделить на четыре зоны:

- 1 – зона недостижимого уплотнения;
- 2 – зона пневмотранспорта в заторможенном плотном слое;
- 3 – переходная зона;
- 4 – зона пневмотранспорта в разуплотненном потоке.

При взаимодействии порошка со стенками канала после преодоления переходной зоны происходит резкое разуплотнение порошка

и переход на линию равновесного течения потока, где объемные силы, уплотняющие зернистый материал (силы давления газа на частицы порошка), уравниваются объемными силами инерции.

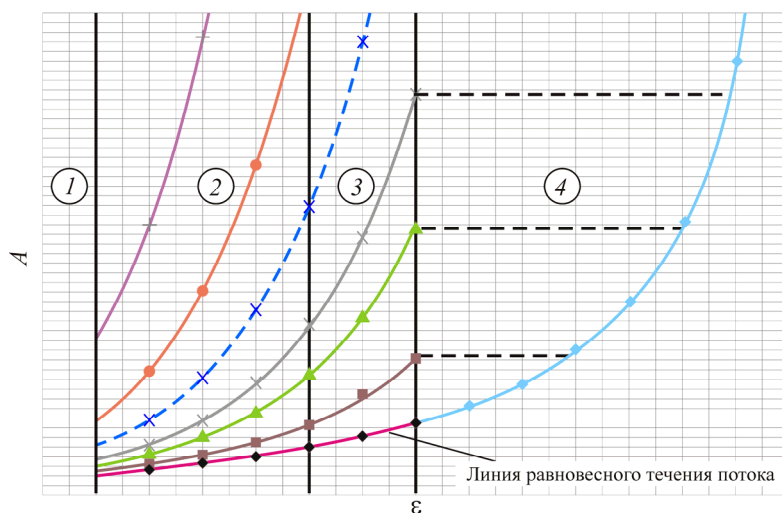


Рис. 1. Качественная зависимость зон течения двухфазной среды

Следует отметить, что в определенном интервале ε в переходной зоне наблюдается своеобразный фазовый переход, который характеризуется изменением свойств зернистой среды (твердое тело \rightarrow жидкость).

В зависимости от реологических свойств порошка диапазон (ширина полосы) каждой зоны изменяется.

Переход течения от напряженно-деформированного состояния к разуплотненному

Пневмотранспорт в плотном слое может осуществляться как при предельной упаковке зернистого материала, когда порозность материала является минимальной для данного типа порошка, так и при не-предельной упаковке. Для оценки условий, которые влияют на упаковку материала, рассмотрим уравнение состояния дисперсной фазы (компрессионной характеристики) [12]

$$\varepsilon = \frac{A}{(\sigma + c)^{1/b}},$$

качественный график которой представлен на рис. 2, где σ – уплотняющее напряжение; A , b и c – эмпирические константы.

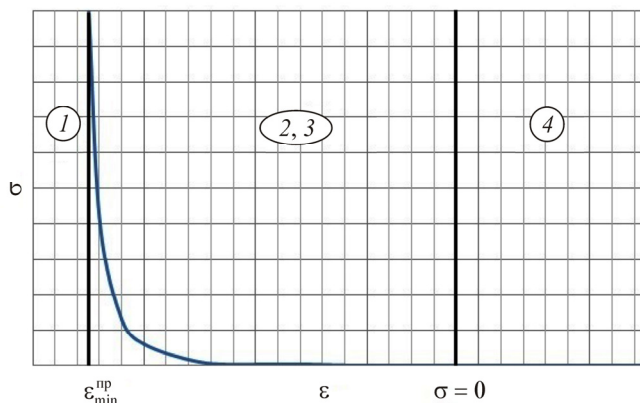


Рис. 2. Качественный график компрессионной характеристики с расставленными зонами течения двухфазной среды

Анализ данного уравнения позволяет сделать следующий вывод: при постепенном увеличении напряжения в дисперсной фазе $d\sigma > 0$ (за счет движения порошка в канале) порозность ϵ данного сыпучего материала плавно уменьшается вплоть до определенного предельного значения $\epsilon_{\min}^{\text{np}}$, меньше которого порошок уплотниться не может. При дальнейшем увеличении напряжения порозность материала остается предельной. Еще один вывод: при уменьшении напряжения сыпучей среды $d\sigma < 0$ происходит разуплотнение (увеличение порозности (зона 2, 3)) вплоть до полного разряжения потока ($\sigma = 0$ (зона 4)).

Таким образом, условие начала разуплотнения

$$d\sigma = 0. \quad (3)$$

Учитывая всё вышеуказанное, можно сделать вывод, что порошок при движении по каналу проходит несколько различных этапов, схематично изображенных на рис. 3.

Приведенная схема разделена на две части: первая описывает этапы, относящиеся к идеально сыпучим материалам, вторая – к связным (здесь и далее не рассматриваются).

Рассмотрим конический канал (насадок) с углом сужения ϕ . На рис. 4 приведены силы, действующие на элементарный слой.

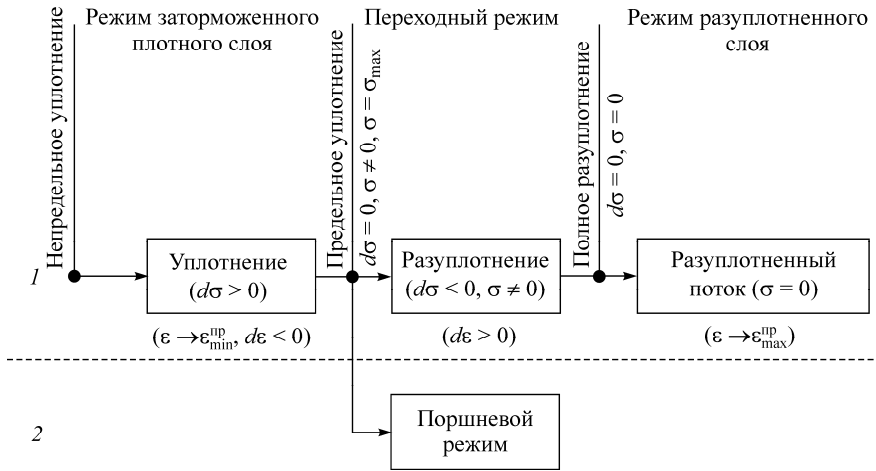


Рис. 3. Этапы изменения напряженно-деформированного состояния порошка при пневмотранспорте в плотном слое

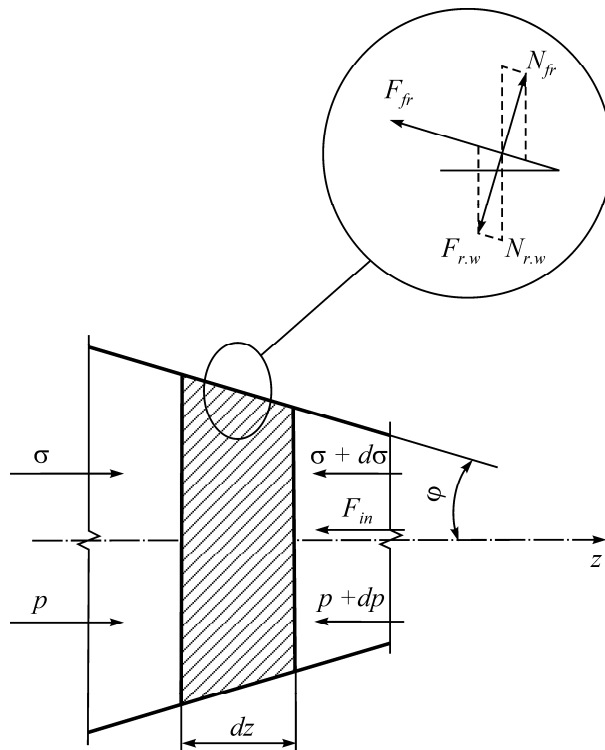


Рис. 4. Схема сил, действующих на элементарный слой сужающегося плотного потока сыпучего материала

Запишем силы, действующие на элементарный слой сужающегося плотного потока сыпучего материала:

$$\sigma F + pF - \left[\left(\sigma + \frac{d\sigma}{dz} dz \right) F + \left(p + \frac{dp}{dz} dz \right) F \right] - dF_{zfr} - dF_{zr.w} - dF_{in} = 0,$$

преобразовав, получим

$$\frac{d\sigma}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \frac{\frac{dF_{zfr}}{dz}}{F} - \frac{\frac{dF_{zr.w}}{dz}}{F} - \frac{\frac{dF_{in}}{dz}}{F}, \quad (4)$$

где p – давление газовой фазы; dF_{zfr} – проекция силы трения на ось z ; $dF_{zr.w}$ – проекция силы реакции стенки на ось z ; dF_{in} – сила инерции; F – площадь канала. Рассмотрим каждую составляющую проекции силы в отдельности.

Проекция силы трения

$$dF_{zfr} = K_6 f_{тр} \pi D \sigma \cos^2 \varphi dz,$$

где K_6 – коэффициент бокового давления; $f_{тр}$ – коэффициент трения; D – диаметр канала.

$$\frac{\frac{dF_{zfr}}{dz}}{F} = \frac{4K_6 f_{тр} \cos^2 \varphi}{D} \sigma,$$

$$D = \frac{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi}{2},$$

где r_0 – начальный радиус сужающегося канала; z – текущая координата, таким образом,

$$\frac{\frac{dF_{zfr}}{dz}}{F} = \frac{2K_6 f_{тр} \cos^2 \varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} \sigma. \quad (5)$$

Проекция силы реакции стенки

$$dF_{zr.w} = K_6 \pi D \sigma \cos \varphi \sin \varphi dz.$$

$$\frac{dF_{zr.w}}{dz} = \frac{K_6 \sin 2\varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} \sigma. \quad (6)$$

Проекция силы инерции

$$dF_{in} = G_{pwd} dv_{pwd} = \rho_d (1 - \varepsilon) v_{pwd} F dv_{pwd},$$

где G_{pwd} – расход порошка; v_{pwd} – скорость частиц порошка; ρ_d – плотность дисперсной фазы.

$$\frac{dv_{pwd}}{v_{pwd}} = \frac{dF}{F},$$

$$dF_{in} = -\rho_d (1 - \varepsilon) v_{pwd}^2 dF,$$

$$\frac{dF_{in}}{F} = \rho_d (1 - \varepsilon) v_{pwd}^2 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi}. \quad (7)$$

Потери давления определим с помощью уравнения Дарси:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\mu}{k} v_f, \quad (8)$$

где μ – динамическая вязкость газа; k – коэффициент газопроницаемости; v_f – скорость фильтрации.

На основе вышеприведенных рассуждений окончательно запишем уравнение напряженно-деформированного состояния порошково-газовой среды (4) в конусе с учетом выражений (5)–(8):

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{\mu}{k} v_f - \frac{2K_6 f_{\text{тр}} \cos^2 \varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} \sigma - \frac{K_6 \sin 2\varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} \sigma - \rho_d (1 - \varepsilon) v_{pwd}^2 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi}.$$

Данное выражение в случае движения в цилиндрическом канале ($\varphi = 0$) вырождается в известное уравнение, приведенное в работе [12].

Подставив $v_f = \varepsilon (v_g - v_{pwd}) = \varepsilon v_{pwd} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right)$ и исключив слагаемое,

учитывающее силу трения, ввиду малости данного слагаемого относительно остальных, получим

$$\frac{d\sigma}{dz} = \varepsilon \frac{\mu}{k} v_{pwd} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right) - \frac{K_6 \sin 2\varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} \sigma - \frac{G_{pwd}}{F} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r_0 - z \operatorname{tg} \varphi} v_{pwd}.$$

Для упрощения выражения примем угол сужения конического канала $\varphi = 45^\circ$:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \varepsilon \frac{\mu}{k} v_{pwd} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right) - \frac{K_6}{r_0 - z} \sigma - \frac{G_{pwd}}{F} \frac{1}{r_0 - z} v_{pwd}, \quad (9)$$

тогда процесс начала разуплотнения при соблюдении условия (3) определяется зависимостью

$$\sigma = \frac{\left[\frac{\mu}{k} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right) \varepsilon r - \frac{G_{pwd}}{F} \right] v_{pwd}}{K_6}, \quad (10)$$

где $r_0 - z = r$.

Определим условие, при котором происходит процесс полного разуплотнения плотного слоя ($d\sigma = 0$, $\sigma = 0$):

$$\frac{\mu}{k} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right) \varepsilon r = \frac{G_{pwd}}{F}, \quad (11)$$

откуда

$$r_2 = \frac{\frac{G_{pwd}}{F}}{\frac{\varepsilon \mu}{k} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right)}, \quad (12)$$

где r_1 – радиус сужающегося канала, при котором начинается разуплотнение; r_2 – радиус, при котором происходит полное разуплотнение плотного слоя; g_{pwd} – удельный расход порошка, $g_{pwd} = \frac{G_{pwd}}{F}$.

$$z_2 = r_0 - \frac{\frac{G_{pwd}}{F}}{\frac{\varepsilon\mu}{k} \left(\frac{v_g}{v_{pwd}} - 1 \right)}, \quad (13)$$

где z_1 – координата сужающегося канала, при которой начинается разуплотнение; z_2 – координата полного разуплотнения плотного слоя (рис. 5).

Таким образом, можно сформулировать ключевой вывод, проиллюстрированный на рис. 5: в сечении 1–1 соблюдаются условия начала разуплотнения, в сечении 2–2 – условия полного разуплотнения плотного потока. Изменяя значение давления p , можно осуществлять смещение сечения начала / полного разуплотнения плотного слоя вплоть до граничных значений (начала сужающегося канала 0–0 или критического (выходного) сечения $cr-cr$).

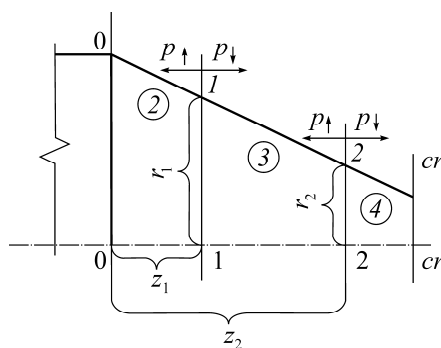


Рис. 5. Графическое изображение условия разуплотнения плотного слоя

Следует отметить, что зоны течения (см. рис. 1) соответствуют зонам течения, отмеченным на рис. 5.

Оценка равновесного критического отношения давлений

Для осуществления анализа истечения двухфазной среды необходимо оценить изменение равновесного критического отношения давлений (π_{cr}^e) на основном диапазоне работы системы подачи при

отношении удельных расходов $\frac{g_{pwd}}{g_g} = 0,2...5\%$ [13, 14].

Для этого запишем уравнение определения π_{cr}^e через равновесный показатель адиабаты двухфазной среды [15]:

$$\pi_{cr}^e = \left(\frac{2}{k_e + 1} \right)^{\frac{k_e}{k_e - 1}},$$

$$k_e = k_g \frac{1 + \left(\frac{g_{pwd}}{g_g} \right) \left(\frac{c_{pwd}}{c_{pg}} \right)}{1 + k_g \left(\frac{g_{pwd}}{g_g} \right) \left(\frac{c_{pwd}}{c_{pg}} \right)},$$

где π_{cr}^e – критическое равновесное отношение давлений; c_{pwd} – удельная теплоемкость дисперсной фазы; c_{pg} – удельная изобарная теплоемкость дисперсионной среды; k_g – показатель адиабаты газа; k_e – равновесный показатель адиабаты двухфазной среды.

График функции $\pi_{cr}^e = f\left(\frac{g_{pwd}}{g_g}\right)$ приведен на рис. 6.

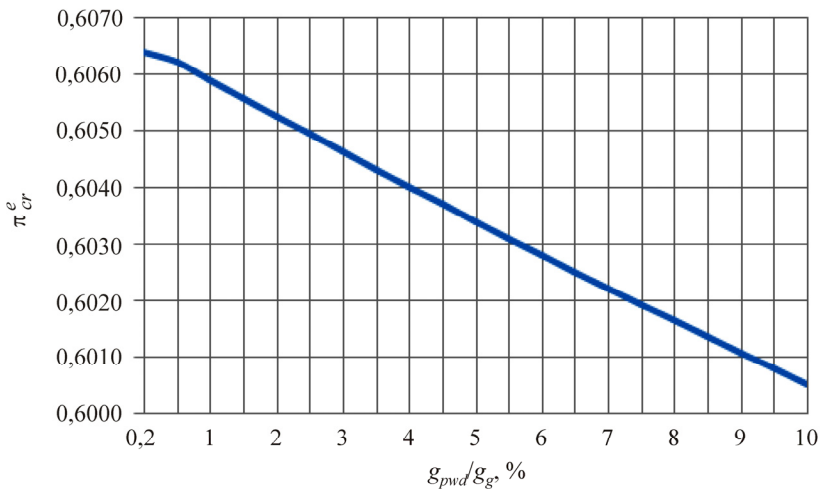


Рис. 6. Зависимость равновесного критического отношения давлений от отношений удельных расходов

Особенностью данного графика является то, что на всем диапазоне применения системы форсуночной подачи порошка металла $\left(\frac{g_{pwd}}{g_g} = 1 \dots 5 \%\right)$ равновесное критическое отношение давлений меняется крайне незначительно и в данном случае может быть принято равным 0,6.

Анализ предельных случаев истечения порошково-газовой среды

Проанализируем два предельных случая истечения порошково-газовой среды согласно анализу, приведенному выше.

1. При $p \rightarrow \infty$ сечения 1-1 и 2-2 смещаются к началу сужающегося канала ($z_2 \rightarrow 0$, рис. 7), так как при $p \rightarrow \infty$ $G_{pwd} \rightarrow \infty$, а $r_2 \rightarrow r_{\max}(r_0)$ (13). Вследствие этого на всем протяжении данного канала устанавливается режим разуплотненного слоя (см. рис. 3). В таком случае в сужающемся канале течение стремится к равновесному, следовательно, порозность зернистого материала стремится к максимально предельной ($\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\max}^{np}$), а скорость порошка стремится к скорости газа ($v_{pwd} \rightarrow v_g$). Учитывая, что в сечении 0-0 при высоких давлениях $v_{pwd} \rightarrow v_g$, принимаем, что от сечения 0-0 до сечения $cr-cr$ устанавливается равновесное течение. Фактически устанавливается квазиравновесное течение (близкое к равновесному). Далее по тексту к этому состоянию применяется термин «равновесное».

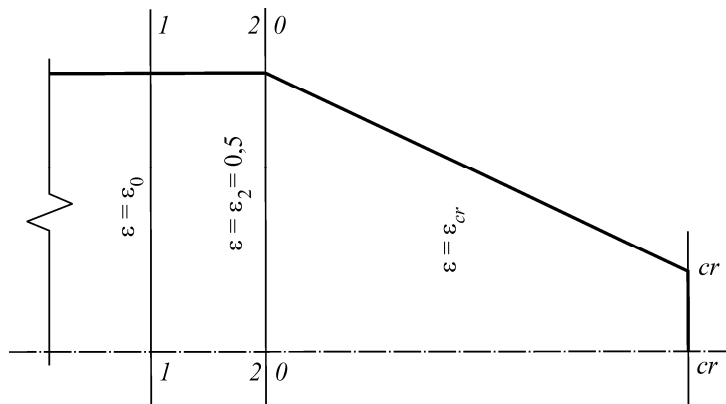


Рис. 7. Графическое изображение анализа предельных случаев истечения порошково-газовой среды

Отношение удельных расходов на входе в канал и на выходе из него остается неизменным:

$$\left(\frac{g_{pwd}}{g_g} \right)_2 = \left(\frac{g_{pwd}}{g_g} \right)_{cr},$$

или более подробно:

$$\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \frac{v_{pwd1}}{v_{g1}} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_0} RT = \frac{1-\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cr}} \frac{v_{pwd.cr}}{v_{g.cr}} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_{cr}} RT,$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа. Масса газа намного меньше массы порошка, и в связи с высоким коэффициентом теплообмена между дисперсной фазой и дисперсионной средой температура газа примерно равна температуре порошка, которая постоянна, следовательно, температуру газа принимаем постоянной. Скорости порошка и газа в сечениях 0–0 и cr – cr также будут примерно равны, следовательно,

$$\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{1}{\rho_0} = \frac{1-\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cr}} \frac{1}{\rho_0 \pi_{cr}^e},$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\varepsilon_2}{\pi_{cr}^e (1-\varepsilon_2) + \varepsilon_2}.$$

Сжатый до своего минимального значения порозности ($\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{\text{пр}}$) зернистый материал представляет собой порошковый элемент. Для порошка алюминия АСД-1 $\varepsilon_{\min}^{\text{пр}} = 0,34$ [13, 14], однако сечение 1–1 (начало разуплотнения) смещается в сторону начала цилиндрического канала (левее сечения 0–0 (см. рис. 7)), и в промежутке между сечениями 1–1 и 2–2 порозность порошка увеличится. Оценочно примем ее равной 0,5 ввиду того, что в работах [12, 16] отмечено, что при указанном значении происходит своеобразный фазовый переход плотного слоя для идеально сыпучего зернистого материала, состоящего из сферических частиц.

Для определения значения π_{cr}^e и соответствующего ему значения давления p_0 необходимо экстраполировать функцию, опубликованную автором [17].

Как видно на рис. 8, график функции $\pi_{cr} = f(p)$ имеет S-образную форму и асимптотически приближается к некоторым максимальному и минимальному значениям критического отношения давлений, причем верхняя асимптота соответствует π_{cr}^e , которая опреде-

лена выше, а нижняя π_{cr} определена в результате эксперимента, описанного в работе [17].

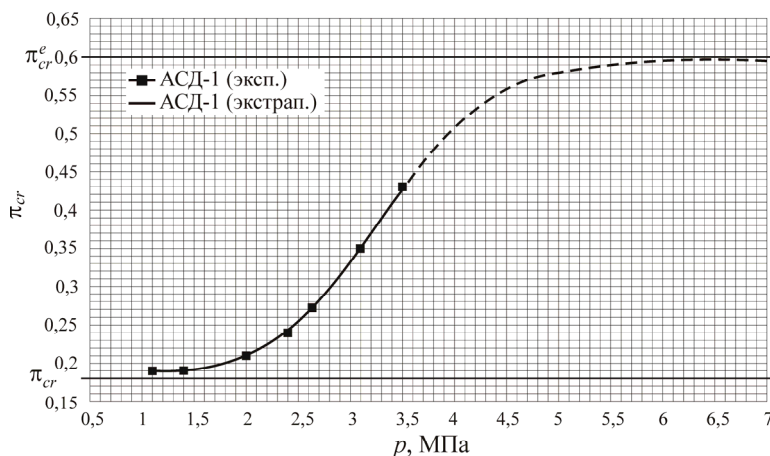


Рис. 8. Экстраполяция функции зависимости критического отношения давлений для порошка металла от давления газа перед выпускным отверстием

2. При $p \rightarrow 0$ скорости газа значительно возрастают и уравнением Дарси (8) в явном виде пользоваться нельзя. Воспользуемся уравнением для определения гидравлических потерь [18]

$$\frac{dp}{dz} = \rho_g \xi_d \frac{(v_{g-pwd})^2}{2\bar{d}_p}, \quad (14)$$

где ξ_d – коэффициент гидравлического сопротивления зернистого материала (для сферических частиц), $\xi_d = f(\text{Re}_d)$; v_{g-pwd} – скорость газа относительно скорости порошка; \bar{d}_p – средний размер пор. Коэффициент Рейнольдса для сферических частиц

$$\text{Re}_d = \frac{v_{g-pwd} \bar{d}_p \rho_g}{\mu_g},$$

где μ_g – коэффициент динамической вязкости газа.

Средний размер пор для монодисперсного порошка определяется как

$$\bar{d}_p = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \bar{d}_{prt},$$

$\overline{d_{prt}}$ – среднеобъемный массовый размер частиц порошка.

Очевидно, что изменятся приведенные выше уравнения (9)–(12).
Запишем их в соответствии с уравнением (14):

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dz} &= \rho_g \xi_d \frac{(v_g - v_{pwd})^2}{2\overline{d_p}} - \frac{K_6}{r_0 - z} \sigma - \frac{G_{pwd}}{F} \frac{1}{r_0 - z} v_{pwd}, \\ \sigma &= \frac{r\rho_g \xi_d \frac{(v_g - v_{pwd})^2}{z\overline{d_p}} - \frac{G_{pwd}}{F} v_{pwd}}{K_6}, \\ r_2 &= \frac{2\overline{d_p} v_{pwd} \frac{G_{pwd}}{F}}{\xi_d \rho_g (v_g - v_{pwd})^2}, \\ z_2 &= z_0 - \frac{2\overline{d_p} v_{pwd} G_{pwd}}{\xi_d \rho_g F (v_g - v_{pwd})^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Преобразовав формулу (15) при условии $\varepsilon = \text{const}$, получим

$$z_2 = r_0 - \frac{C v_{pwd}^2 (1 - \varepsilon)}{\xi_d \rho_g v_g^2 \left(1 - \frac{v_{pwd}}{v_g}\right)^2},$$

где C – множитель, содержащий постоянные члены уравнения. Заметим, что ξ_d при высоких значениях скоростей среды, следовательно, высоких значениях коэффициента Рейнольдса (Re_d), приближается к своему постоянному значению [18]. Таким образом,

$$r_2 \sim \left(\frac{v_{pwd}}{v_g}\right)^2 \frac{1}{\rho_g \left(1 - \frac{v_{pwd}}{v_g}\right)^2}. \quad (16)$$

Преобразуем соотношение (16). Для этого проведем несколько операций:

$$\frac{g_{pwd}}{g_g} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{v_{pwd}}{v_g} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_g} = \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0} \frac{v_{pwd0}}{v_{g0}} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_{g0}},$$

$$\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0} \frac{v_{pwd0}}{v_{g0}} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_{g0}} \frac{\varepsilon^{(2)}}{1-\varepsilon^{(2)}} \frac{\rho_{pwd}}{\rho_g} \pi_2 = \frac{v_{pwd0}}{v_{g0}} C_1 \pi_2,$$

где C_1 – множитель, содержащий постоянные члены; π_2 – отношение давления до сечения 2–2 и после него (см. рис. 5). Принимая во внимание, что $\frac{v_{pwd0}}{v_{g0}} \rightarrow \text{const}$, $\rho_g \sim p_0 \pi_2$, получим

$$r_2 \sim \frac{\pi_2^2}{\rho_g \left(1 - \frac{v_{pwd}}{v_g}\right)^2} = \frac{\pi_2}{p_0} \frac{1}{\left(1 - \frac{v_{pwd}}{v_g}\right)^2}. \quad (17)$$

Проанализируем оценку (17) при $p \rightarrow 0$, тогда $v_g \gg v_{pwd}$ – множитель знаменателя $\left(1 - \frac{v_{pwd}}{v_g}\right) \approx 1$, следовательно, соотношение (17) можно представить в виде следующей функции, принимая во внимание, что $\pi_2 = f(p_0) = p_0^\nu$:

$$r_2 \sim \frac{\pi_2}{p_0} \sim p_0^{\nu-1},$$

где функция $\pi_2 = f(p_0)$ при $p \rightarrow 0$ имеет степенной характер с показателем степени $\nu > 1$. Очевидно, что при этом $r_2 \rightarrow 0$. Но ввиду того, что r_2 не может быть менее r_{cr} , $r_2 \rightarrow r_{cr}$ (сечение 2–2 не может быть меньше меньшего, которым является сечение $cr-cr$).

В случае, когда $r_2 \approx r_{cr}$, соблюдаются следующие условия:

$\xi_d \neq \text{const}$, $\frac{v_{pwd}}{v_g} \approx \text{const}$, $\pi_{cr} \approx \text{const}$, тогда, преобразовав уравнение (17), получим

$$r_2 \sim \frac{1}{\xi_d \rho_g}, \quad (18)$$

где, в свою очередь,

$$\xi_d \sim \frac{1}{\text{Re}_d} \sim \frac{1}{v_{g-m}\rho_g}. \quad (19)$$

Объединив соотношения (18) и (19), получим

$$r_2 \sim \frac{v_{g-m}\rho_g}{\rho_g} \sim v_{g-m}. \quad (20)$$

Проанализировав уравнение (20) при $p \rightarrow 0$ и $v_{g-m} \rightarrow 0$, можно сделать вывод, что $r_2 \rightarrow 0$.

Таким образом, при $p \rightarrow 0$ сечения 1–1 и 2–2 смещаются к концу сужающегося канала ($z_2 \rightarrow z_{cr}$, см. рис. 5). Вследствие этого на всем протяжении сужающегося канала устанавливается режим плотного слоя (см. рис. 3). В таком случае порозность зернистого материала стремится к минимально предельной ($\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\min}^{\text{np}}$). Следует отметить, что за критическим сечением в любом случае произойдет исчезновение напряженно-деформированного состояния и разуплотнение порошка ввиду того, что после критического сечения исчезают стенки канала, которые создают усилия, вследствие которых возникает напряженно-деформированное состояние, уплотняющее порошок.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При давлении газовой фазы $p \rightarrow \infty$ на всем протяжении конического канала устанавливается равновесное течение ($v_g \approx v_{pwd}$) и возникает зона разуплотненного потока ($\sigma = 0$, $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\max}^{\text{np}}$).

2. При давлении газовой фазы $p \rightarrow 0$ на всем протяжении конического канала устанавливается предельно-неравновесное течение и возникает зона заторможенного плотного потока ($\sigma \neq 0$, $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\min}^{\text{np}}$).

3. При некотором диапазоне значений давления газовой фазы в коническом канале возникает три зоны течения: зона плотного, зона переходного и зона разуплотненного потока.

4. Изменяя давление газовой фазы, можно изменять режимы течения порошково-газовой среды в коническом канале, тем самым влиять на характеристики истекающей порошково-газовой смеси (порозность зернистого материала, скорость истечения материала и газа и разница их скоростей).

Библиографический список

1. Malinin V.I., Kolomin Ye.I., Antipin I.S. Ignition and combustion of aluminum – air suspensions in a reactor for high-temperature synthesis of alumina powder // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2002. – Vol. 38, № 5. – P. 525–534.

2. Zolotko A.N., Poletaev N.I., Vovchuk Ya.I. Gas-disperse synthesis of metal oxide particles // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51, iss. 2. – P. 252–268.

3. Merzhanov A.G., Sharivker S.Yu. Self-propagating high-temperature synthesis of carbides, nitrides and borides // *Materials Science of Carbides, Nitrides and Borides* / eds. Y.G. Gogotsi, R.A. Andrievski. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 205–222.

4. Chorley R.W., Lednor P.W. Synthetic routes to high-surface area nonoxide materials // *Advanced Mater.* – 1991. – Vol. 3, № 10. – P. 474–485.

5. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Влияние параметров окисляющей среды на процесс накопления окисла на поверхности горящих частиц алюминия // *Проблемы конверсии и экологии энергетических материалов (ICOC-96): материалы междунар. конф. по внутрикамерным процессам и горению: в 2 ч. Санкт-Петербург, 1996. – Ижевск: Изд-во УрО РАН, 1997. – Ч. 1. – С. 33–39.*

6. Получение ультрадисперсных порошков методом сжигания аэрозвесей частиц металлов / В.Н. Анциферов, В.И. Малинин, С.Е. Порозова, А.Ю. Крюков // *Перспективные материалы и технологии: Нанокондиты (Космический вызов XXI века). Т. 2 / под ред. А.А. Берлина, И.Г. Ассовского. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2005. – С. 47–58.*

7. Особенности процесса горения частиц алюминия при различных параметрах потока активных газов / Е.И. Коломин, В.И. Малинин, А.А. Обросов, И.С. Антипин // *Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: сб. материалов междунар. шк.-семинара. Россия, Санкт-Петербург, 20–24 июня 1995. – СПб., 1995. – С. 142–145.*

8. Kolomin E.I., Malinin V.I., Obrosof A.A. High-temperature synthesis of alumina powder in a reactor for technological combustion of air/aluminum mixture. Theory of combustion of powder and explosives / ed. A.M. Lipanov. – New York: Nova science Publishers, Inc, 1996. – P. 301–310.

9. Реактор горения порошков металлов в активном газе. Научно-технические разработки в области СВС: справочник / Е.И. Коломин, В.И. Малинин, А.А. Обросов, И.С. Антипин / под общ. ред. акад. А.Г. Мержанова / Ин-т структуры макрокинетики и проблем материаловедения. – Черногoловка, 1999. – С. 184–185.

10. Расчет характеристик и исследование процессов подачи порошкообразного алюминия в камеру сгорания алюмоводородного генератора / Ю.Н. Власов, Д.А. Ягодников, Н.И. Быков, К.В. Горячев, И.Н. Копытин // Прогресивні технології і системи машинобудування / Донецк. нац. техн. ун-т. – 2014. – № 1(47). – С. 70–78.

11. Власов Ю.Н., Шацкий О.Е. Особенности расчета системы подачи псевдооживленного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 4. – С. 42.

12. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.

13. Обросов А.А., Земерев Е.С., Малинин В.И. Фильтрация и истечение порошково-газовой смеси из струйной форсунки установки синтеза наноксидов алюминия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 115–124.

14. Обросов А.А., Земерев Е.С., Малинин В.И. Динамика газонасыщения порошка алюминия в системе подачи установки синтеза наноксидов // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2013. – № 3(59). – С. 25–28.

15. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.М. Подвысоцкий; под ред. Л.Е. Стернина. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.

16. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под ред. Г.М. Островского. – СПб.: Профессинал, 2004. – Ч. I. – 848 с.

17. 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.

18. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.

References

1. Malinin V.I., Kolomin Ye.I., Antipin I.S. Ignition and combustion of aluminum – air suspensions in a reactor for high-temperature synthesis of alumina powder. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2002, vol. 38, iss. 5, pp. 525-534.

2. Zolotko A.N., Poletaev N.I., Vovchuk Ya.I. Gas-disperse synthesis of metal oxide particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2015, vol. 51, iss. 2, pp. 252-268.

3. Merzhanov A.G., Sharivker S.Yu. Self-propagating high-temperature synthesis of carbides, nitrides and borides // *Materials Science of Carbides, Nitrides and Borides* / eds. Y.G. Gogotsi, R.A. Andrievski. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 205-222.

4. Chorley R.W., Lednor P.W. Synthetic routes to high-surface area nonoxide materials // *Advanced Mater.* 1991, vol. 3, no. 10, pp. 474-485.

5. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Vliyanie parametrov okisl'yayushchey sredy na protsess nakopleniya okisla na poverkhnostii goryashchikh chastits alyuminiya [Influence of oxidizing environment parameters in the oxide accumulation process on the surface of the burning aluminum particles]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy konferentsii po vnutrikamernym protsessam i gorenuyu "Problemy konversii i ekologii energeticheskikh materialov (ICOC-96)"*. Izhevsk: Uralskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 1997, part. 1, pp. 33-39.

6. Antsiferov V.N., Malinin V.I., Porozova S.E., Kryukov A.Yu. Poluchenie ultradispersnykh poroshkov metodom szhiganiya aerovzvesey chastits metallov [Preparation of ultrafine powders by aerosuspension metal particle combustion]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii: Nanokompozity (Kosmicheskii vyzov XXI veka)*. Moscow: TORUS PRESS, 2005, vol. 2, pp. 47-58.

7. Kolomin E.I., Malinin V.I., Obrosov A.A., Antipin I.S. Osobnosti protsessa goreniya chastits alyuminiya pri razlichnykh parametrakh potoka aktivnykh gazov [Features of the aluminum particle combustion at different parameters of the active gas flow]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy shkoly-seminara "Vnutrikamernye protsessy, gorenie i gazovaya dinamika dispersnykh system"*. Saint Petersburg, 1995, pp. 142-145.

8. Kolomin E.I., Malinin V.I., Obrosov A.A. High-temperature synthesis of alumina powder in a reactor for technological combustion of air/aluminum mixture. Theory of combustion of powder and explosives. Ed. A.M. Lipanov. New York: Nova science Publishers, Inc, 1996, pp. 301-310.

9. Kolomin E.I., Malinin V.I., Obrosov A.A., Antipin I.S. Reaktor goreniya poroshkov metallov v aktivnom gaze. Nauchno-tekhnicheskie razrabotki v oblasti SVS: Spravochnik [Combustion reactor of metal powders in active gas. Scientific and technical developments in the field of SHS]. Chernogolovka: Institut strukturnoy makrokinetiki i problem materialovedeniya, 1999, pp. 184-185.

10. Vlasov Yu.N., Yagodnikov D.A., Bykov N.I., Goryachev K.V., Kopytin I.N. Raschet kharakteristik i issledovanie protsessov podachi poroshkoobraznogo alyuminiya v kameru sgoraniya alyumovodorodnogo generator [Calculation of characteristics and analysis of processes of aluminum powder supply to aluminum hydrogen generator combustion chamber]. *Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannya*, 2014, no. 1(47), pp. 70-78.

11. Vlasov Yu.N., Shatsky O.E. Osobennosti rascheta sistemy podachi psevdoozhizhennogo metallicheskogo goryuchego v rezhime zatormozhennogo plotnogo sloya [Calculation features of the supply system of fluidized metal fuel in the flow regime of the retarded dense]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, iss. 4, p. 42.

12. Ostrovskiy G.M. Pnevmaticheskii transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti [Pneumatic transport of loose materials in the chemical industry]. Leningrad: Khimiya, 1984. 104 p.

13. Obrosov A.A., Zemerev E.S., Malinin V.I. Filtratsiya i istechenie poroshkovo-gazovoy smesi iz struynoy forsunki ustanovki sinteza nanooksida alyuminiya [Filtration and outflow of gaspowder mixture from spray injection of a plant for aluminium nanooxide synthesis]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2013, no. 35, pp. 115-124.

14. Obrosov A.A., Zemerev E.S., Malinin V.I. Dinamika gazonasyshcheniya poroshka alyuminiya v sisteme podachi ustanovki sinteza nanooksida [The dynamics of gas saturation of aluminum powder in the feed system of nanooxide synthesis installation]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*. 2013, no. 3(59), pp. 25-28.

15. Sternin L.E., Maslov B.N., Shrayber A.A., Podvysotskiy A.M. Dvukhfaznye mono- i polidispersnye techeniya gaza s chastitsami [Two-phase mono and polydisperse flow of gas particles]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 172 p.

16. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy. [New handbook for chemist and technologist. Processes and devices of chemical technologies]. Ed. by G.M. Ostrovskiy. Saint Petersburg: Professional, 2004. Part 1. 848 p.

17. Kryukov A.Yu. Adaptatsiya vnutrikamernykh protsessov i elementov konstruktсии energoustanovok na poroshkovom goryuchem k tekhnologiyam polucheniya ultra- i nanodispersnykh materialov: monografiya [Adaptation of the intra-chamber processes and elements of the power plants on the powder fuel to production of ultra- and nano-dispersed materials]. Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet, 2011. 236 p.

18. Belov S.V. Poristye metally v mashinostroyeni [The porous metals in engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 247 p.

Об авторах

Земеров Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – соискатель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: zemerev.ewgen@yandex.ru).

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

About the authors

Evgeniy S. Zemerev (Perm, Russian Federation) – Applicant for a Degree, Department of Rocket and Space Engineering and Power

Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: zemerev.ewgen@yandex.ru).

Vladimir I. Malinin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malininvi@mail.ru).

Получено 26.09.2016