

УДК 621.453

А.А. Обросов, Е.С. Земерев, В.И. Малинин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ФИЛЬТРАЦИЯ И ИСТЕЧЕНИЕ ПОРОШКОВО-ГАЗОВОЙ СМЕСИ ИЗ СТРУЙНОЙ ФОРСУНКИ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА НАНООКСИДА АЛЮМИНИЯ

Описано экспериментальное исследование процесса истечения двухфазной среды из отверстия при высоких концентрациях дисперсной фазы. Разработана экспериментальная установка и методика исследования фильтрации газа через порошок и истечения газа и порошка из отверстия. Проведены исследования истечения порошкообразного алюминия и газа из струйной форсунки на этой установке. Получены зависимости расходов порошка и отдельно газа от давления перед выпускным отверстием при различных диаметрах отверстия. Выведены полуэмпирические формулы для определения расхода фильтрующегося через порошок газа, перепада давления, расхода газа, истекающего через форсунку. Показано, что массы газа, закачанного в поровый объем порошка при предварительном газонасыщении, недостаточно для стабильного истечения порошка. Поэтому необходима дополнительная подача газа и последующая его фильтрация к выпускному отверстию для поддержания давления в порошке на постоянном уровне и обеспечения постоянного процесса истечения порошка и газа. При этом расход газа относительно расхода порошка имеет линейный характер зависимости от давления перед выпускным отверстием и не превышает 1,5 %.

Ключевые слова: порошок, поровый объем, фильтрация газа, газонасыщение, струйная форсунка, истечение двухфазной среды, выпускное отверстие, наноксид алюминия.

A.A. Obrosoy, E.S. Zemerev, V.I. Malinin

Perm National Research Polytechnic University

FILTRATION AND OUTFLOW OF GASPOWDER MIXTURE FROM SPRAY INJECTOR OF A PLANT FOR ALUMINIUM NANOOXIDE SYNTHESIS

In this work it is considered the experimental investigation of two-phase medium outflow from orifice when high density of dispersed phase. Experimental unit, the technique of study of gas filtration through powder and the outflow of gas from orifice have been developed. The investigations of powdery aluminium outflow and gas from spray injector have been made with experimental unit. Dependences of powder consumption and gas on pressure in front of orifice for various orifice diameters have been obtained. Semi-empirical relations for the consumption being filtered through powder of gas, pressure gradient, gas consumption through spray injector have been derived. It has been showed that mass of gas, having been pumped into void volume of powder when preliminary gasing, is not enough for stable outflow of powder. Thus additional feeding of gas and further filtration of gas to orifice are needed to maintain the pressure in powder at fixed level and to ensure the on-going process of outflow

of powder and gas. Under such conditions the gas consumption relatively powder consumption in front of orifice has linear relation on pressure and does not exceed 1,5 %.

Keywords: powder, void volume, gas filtration, gasing, spray injector, outflow of two-phase medium, orifice, aluminium nanooxide.

Для получения нанопорошка оксида алюминия в установке синтеза [1–3] требуется устойчивая подача порошка алюминия с необходимым расходом в камеру сгорания. Подача порошковых материалов достаточно хорошо разработана и применяется в промышленности [4–7]. Рабочий процесс системы подачи порошка, перемещение его к выпускному отверстию и истечение частиц порошка из него осуществляется за счет объемных сил сжатого газа [8]. Однако в литературе нет достаточно полной и подробной информации (ни теоретической, ни экспериментальной) о фильтрации и истечении газовой фазы [9]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процесса истечения двухфазной среды при высоких концентрациях частиц алюминия.

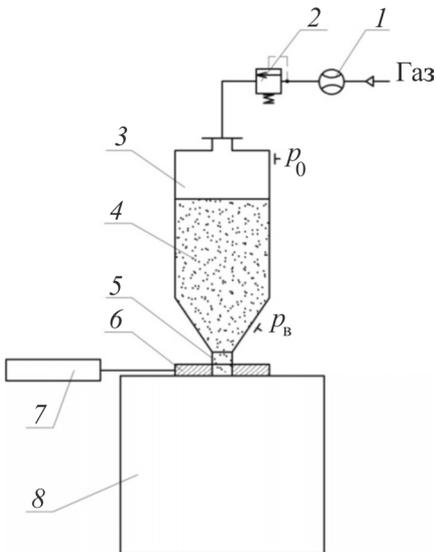


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – расходомер газа; 2 – отсечной клапан; 3 – емкость с порошком; 4 – порошковый элемент; 5 – сменная форсунка; 6 – отсечное устройство форсунки; 7 – привод отсечного устройства; 8 – приемная емкость

Исследования истечения порошкообразного алюминия и газа из струйной форсунки проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Порошок алюминия засыпался в емкость 3 и уплотнялся до плотности приблизительно 1800 кг/м^3 . Уплотненный в емкости порошок представляет собой порошковый элемент (ПЭ). Затем емкость с ПЭ 4 с форсункой 5 в выпускном отверстии и отсечным устройством 6 устанавливалась на приемную емкость, куда осуществлялось истечение порошка и газа. Газ предварительно закачивали в объем над порошком с давлением p_0 . Через 30–40 с давление в ПЭ выравнивалось по всему объему и значение давления перед выпускным отверстием $p_в$ становилось равным p_0 . Для лучшей точно-

сти измерений и вычисления расхода газа, истекающего с порошком через форсунку, насыщение проводили без поршня на торце ПЭ, и для предотвращения его разрушения система подачи ориентировалась вертикально. После завершения предварительного газонасыщения (условие $p_b = p_0$) открывали отсечное устройство форсунки и порошок с газом истекал в приемную емкость. В процессе подачи измерялись расход газа через расходомер l G_p , давление над торцом ПЭ p_0 , давление газа перед выпускным отверстием p_b . После испытания методом взвешивания определялся расход порошка G_n . Кроме данных параметров определялась плотность ПЭ ρ и его порозность ε . Параметры газа были известны (R – газовая постоянная и T – температура).

Расход газа G_p , поступающего в емкость с порошком через расходомер, определяется следующим образом:

$$G_p = G_0 + G_b - G_a,$$

где G_0 – расход газа, идущий на поддержание давления над ПЭ (p_0); G_b – расход газа, истекающего через форсунку с порошком; G_a – расход газа, предварительного закачанного в порошок.

Эксперименты показали, что запаса газа, предварительно закачанного в ПЭ, недостаточно для устойчивой подачи порошка и требуется дополнительный расход газа, который, фильтруясь через ПЭ, также истекает с предварительно закачанным газом. В процессе фильтрации газа на ПЭ создается перепад давления $\Delta p = p_0 - p_b$.

Расход газа, истекающего через форсунку, определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} G_b &= G_p - G_0 + G_a = G_p - \frac{p_0}{R \cdot T \cdot \rho} \cdot G_n + \left(\frac{p_0 + p_b}{2} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{R \cdot T \cdot \rho} \cdot G_n = \\ &= G_p - \frac{p_0}{R \cdot T \cdot \rho} \cdot G_n \cdot \left[\frac{2 - \varepsilon \cdot \left(1 + \frac{p_b}{p_0} \right)}{2 \cdot (1 - \varepsilon)} \right]. \end{aligned}$$

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2 и 3. Истечение порошка и газа исследовалось на разных диаметрах форсунок и для разных порошков. Порошки алюминия: АСД-1ПСК и АСД-4.

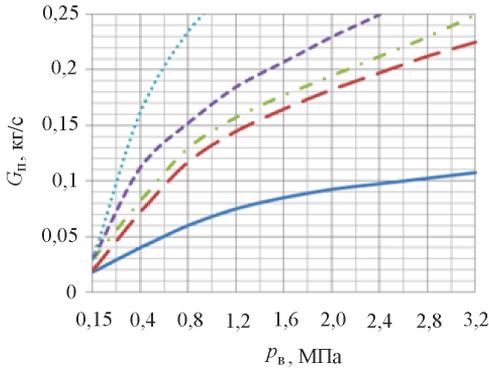


Рис. 2. Зависимость расхода порошка от давления газа перед выпускным отверстием при различных диаметрах отверстия:
 — $d_B = 1,68$ мм АСД-1ПСК; - - $d_B = 2,4$ мм АСД-4; - · - $d_B = 2,4$ мм АСД-1ПСК; - - - $d_B = 2,5$ мм АСД-1ПСК; ····· $d_B = 3,055$ мм АСД-1ПСК

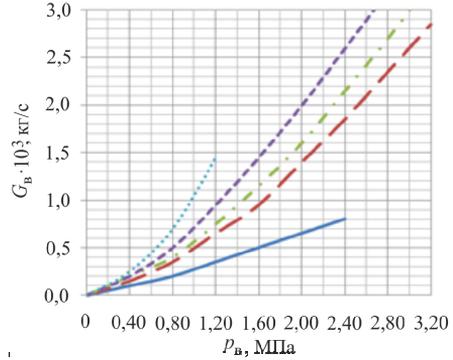


Рис. 3. Зависимость расхода газа, истекающего с порошком из отверстия, от давления перед выпускным отверстием при различных диаметрах отверстия:
 — $d_B = 1,68$ мм АСД-1ПСК; - - $d_B = 2,40$ мм АСД-4; - · - $d_B = 2,40$ мм АСД-1ПСК; - - - $d_B = 2,50$ мм АСД-1ПСК; ····· $d_B = 3,055$ мм АСД-1ПСК

Для удобства расчетов перейдем на удельные расходы газа и порошка (т.е. отнесенные к площади сечения форсунки):

$$g_B = \frac{G_B}{S_\phi}, \quad g_\Pi = \frac{G_\Pi}{S_\phi}.$$

На рис. 4 приведены удельные характеристики истечения газа и ПЭ из выпускного отверстия.

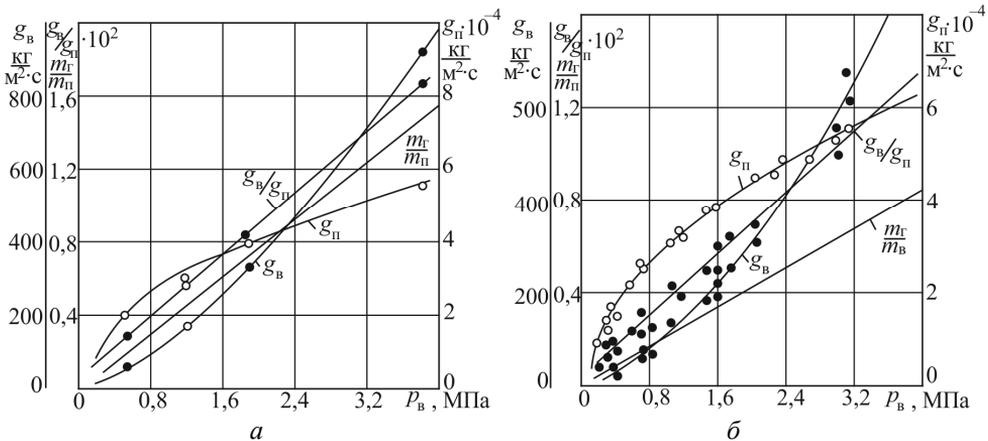


Рис. 4. Удельные характеристики истечения газа и порошка из выпускного отверстия: а – АСД-4; б – АСД-1ПСК

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Удельные расходы порошка и газа (на единицу площади сечения выпускного отверстия) не зависят от площади выпускного отверстия.

2. Удельный массовый расход истекающего газа в значительной степени зависит от давления газа перед выпускным отверстием. Эту зависимость можно аппроксимировать эмпирическим уравнением

$$g_{\text{в}} = C_0 + C_1 \cdot p_{\text{в}}^{1,5},$$

где значения коэффициентов C_0 и C_1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение эмпирических коэффициентов порошковых элементов

Порошок	A_0	$A_1, \text{м}^2/\text{кг}$	$C_0, \text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$C_1, \text{кг}^{0,5}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$
АСД-1ПСК	$5 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-8}$	10	$3,46 \cdot 10^{-6}$
АСД-4	$8 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-8}$	10	$3,90 \cdot 10^{-6}$

3. Относительный расход газа ($g_{\text{в}}/g_{\text{п}}$) имеет линейный характер зависимости от давления перед выпускным отверстием. Эмпирическое уравнение имеет вид

$$\frac{g_{\text{в}}}{g_{\text{п}}} = A_0 + A_1 \cdot p_{\text{в}},$$

где значения коэффициентов A_0 и A_1 приведены в табл. 1.

4. Удельный расход порошка можно рассчитывать, используя эмпирическое уравнение, полученное в эксперименте:

$$g_{\text{п}} = \frac{C_0 + C_1 \cdot p_{\text{в}}^{1,5}}{A_0 + A_1 \cdot p_{\text{в}}}.$$

При давлениях выше 1 МПа коэффициентами A_0 и C_0 можно пренебречь (при этом погрешность составляет не более 3 %). Тогда

$$g_{\text{п}} = \frac{C_1}{A_1} \cdot \sqrt{p_{\text{в}}}.$$

5. Массы газа, закачанного в порошковый элемент при предварительном газонасыщении, недостаточно для стабильного истечения порошка. Это следует из анализа графиков на рис. 4 ($g_{\text{в}}/g_{\text{п}} > m_{\text{г}}/m_{\text{п}}$), т.е.

отношение массы газа в порошке к массе самого порошка $m_{г}/m_{п}$ всегда меньше относительного массового расхода. Поэтому необходима дополнительная подача газа в ПЭ в процессе истечения для поддержания давления газа $p_{в}$ на постоянном уровне. Как уже отмечалось ранее, для стабильности подачи порошка алюминия необходима дополнительная подача газа в ПЭ, которая может осуществляться через его передний торец с постоянным давлением p_0 . В этом случае при фильтрации этого газа к выпускному отверстию на ПЭ создается перепад давления, который изменяет давление перед выпускным отверстием [8, 9].

6. При рабочих давлениях $p_{в} = 1,0 \dots 2,0$ МПа относительный расход газа не превышает значения 1,5 %.

Одной из целей данной работы является определение основных фильтрационных свойств ПЭ и зависимостей фильтрации газа на стационарном режиме подачи порошка.

Основными параметрами порошкового элемента, определяющими его фильтрационные свойства, являются размер частиц, порозность ε и коэффициент газопроницаемости K . В табл. 2 приведены значения коэффициентов газопроницаемости ПЭ для порозности, соответствующей их фильтрационному сжатию, а также среднеобъемный массовый размер частиц.

Таблица 2

Основные параметры порошкового элемента

Порошковый элемент	Среднеобъемный массовый размер частиц, мкм	ε	$K, м^2$
АСД-1ПСК	34,6	0,34	$0,82 \cdot 10^{-13}$
АСД-4	10,5	0,48	$0,46 \cdot 10^{-13}$

Поддерживающее газонасыщение является процессом стационарной фильтрации газа в ПЭ и описывается уравнением Дарси [5] в виде

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{K} \cdot g_{\phi} \frac{R \cdot T}{P}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость газа; g_{ϕ} – удельный расход фильтрующегося газа, $g_{\phi} = G_{\phi}/S$ (S – площадь сечения порошкового элемента); x – координата по длине порошкового элемента.

После интегрирования уравнения (1) получим

$$p(x) = \sqrt{p_0^2 - \frac{2\mu}{K} \cdot \frac{G_\phi}{S} \cdot R \cdot T \cdot x}. \quad (2)$$

Поскольку можно допустить, что перепад давления на ПЭ много меньше p_0 , нелинейное уравнение (2) можно преобразовать в линейное следующего вида:

$$p(x) = p_0 - \Delta p \cdot \frac{x}{L}, \quad (3)$$

где $\Delta p = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{R \cdot T \cdot L}{p_0 \cdot S} \cdot G_\phi$; L – длина ПЭ,

или окончательно:

$$p(x) = p_0 - \frac{\mu}{K} \cdot \frac{R \cdot T \cdot x}{p_0 \cdot S} \cdot G_\phi. \quad (4)$$

Далее определим удельный расход фильтрующегося через ПЭ газа. Расход газа G_b , исходящего из бака вместе с порошком, складывается из двух источников: расхода газа G_a , запасенного в поровом объеме ПЭ до момента открытия выпускного отверстия, и расхода фильтрующегося газа G_ϕ , тогда

$$G_\phi = G_b - G_a.$$

Учитывая, что

$$G_a = \frac{\varepsilon \cdot (p_0 + p_b) \cdot G_\pi}{2 \cdot R \cdot T \cdot \rho \cdot S} \quad \text{и} \quad G_b = (A_0 + A_1 \cdot p_b) \cdot G_\pi,$$

можно записать окончательное уравнение для определения расхода G_ϕ следующим образом:

$$G_\phi = \frac{\left[A_0 + \left(A_1 - \frac{\varepsilon}{R \cdot T \cdot \rho} \right) \cdot p_0 \right] \cdot G_\pi}{1 + \left(A_1 - \frac{\varepsilon}{2R \cdot T \cdot \rho} \right) \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot L \cdot G_\pi}. \quad (5)$$

Тогда перепад давления на ПЭ рассчитывается по формуле

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot R \cdot T \cdot L \cdot \left[A_0 + \left(A_1 - \frac{\varepsilon}{R \cdot T \cdot \rho} \right) \cdot p_0 \right] \cdot G_{\Pi}}{K \cdot p_0 \cdot S + 1 + \left(A_1 - \frac{\varepsilon}{2R \cdot T \cdot \rho} \right) \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot L \cdot G_{\Pi}}, \quad (6)$$

где A_0 и A_1 – эмпирические коэффициенты уравнения истечения порошка и газа, определенные выше. Таким образом, расход фильтрующегося газа может быть рассчитан по уравнению (5), а распределение давления газа по длине ПЭ в установившемся режиме – по уравнению (4), где Δp – перепад давления на ПЭ определяется из уравнения (6).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Относительный расход газа $G_{\text{в}}/G_{\Pi}$ через выпускное отверстие имеет линейный характер зависимости от давления перед выпускным отверстием $p_{\text{в}}$ и не превышает 1,5 %.

2. Массы газа, закачанного в ПЭ при предварительном газонасыщении, недостаточно для стабильного истечения порошка. Поэтому необходима дополнительная подача газа в ПЭ и последующая его фильтрация к выпускному отверстию в процессе истечения из него порошка и газа для поддержания давления $p_{\text{в}}$ на постоянном уровне.

3. Расход фильтрующегося через ПЭ газа рассчитывается по эмпирической формуле (5), а распределение давления газа по длине ПЭ и перепад давления на ПЭ рассчитывается по формулам (4) и (6).

Библиографический список

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

2. Получение СВС-оксидов и нитридов в газе / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин, А.А. Обросов // Научно-технические разработки в области СВС: справочник; под общ. ред. акад. А.Г. Мержанова. – Черноголовка: Изд-во Ин-та структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 1999. – С. 149–151.

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. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
5. Малис А.Я. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях. – М.: Машиностроение, 1969. – 178 с.
6. Разумов И.М. Пневно- и гидротранспорт в химической промышленности. – М.: Химия, 1979. – 248 с.
7. Rudinger G. Gas-particle flow in convergent nozzles at high loading rations // *AIAA Journal*. – 1970. – № 7. – P. 1288–1293.
8. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1968. – С. 78–102.
9. Переход горения конденсированных систем во взрыв / А.Ф. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Корошков [и др.]. – М.: Наука, 1973. – С. 68.

References

1. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskiykh goryuchikh* [Intrachamber processes in plants with the powdery metal fuels]. Ekaterinburg, Perm: Uralskoe otделение Rossiyskoy akademii nauk, 2006. 262 p.
2. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S., Obrosov A.A. *Poluchenie SVS-oksidov i nitridov v gaze* [Production of SVS-oxide and nitrides in gas]. *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki v oblasti SVS: spravochnik*. Chernogolovka: Institut strukturnoy makrokinetiki i problem materialovedeniya Rossiyskoy akademii nauk, 1999, pp. 149-151.
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. Ostrovskiy G.M. *Pnevmaticheskiy transport syuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti* [Pneumatic transport of bulk solids in chemical industry]. Leningrad: Khimiya, 1984. 104 p.
5. Malis A.Ya. *Pnevmaticheskiy transport syuchikh materialov pri vysokikh kontsentratsiyakh* [Pneumatic transport of bulk solids in high density]. Moscow: Mashinostroenie, 1969. 178 p.
6. Razumov I.M. *Pnevmo- i gidrotransport v khimicheskoy promyshlennosti* [Pneumatic- and hydrotransport in chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1979. 248 p.
7. Rudinger G. Gas-particle flow in convergent nozzles at high loading rations. *AIAA Journal*, 1970, no. 7, pp. 1288-1293.

8. Deych M.E., Fillipov G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase medium]. Moscow: Energiya, 1968, pp. 78-102.

9. Belyaev A.F., Bobolev V.K., Koroshkov A.I. [et al.]. *Perekhod goreniiya kondensirovannykh sistem vo vzryv* [Transition of combustion of condensed systems to explosion]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 68.

Об авторах

Обросов Анатолий Александрович (Россия, Пермь) – соискатель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Земерев Евгений Сергеевич (Россия, Пермь) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: zemerev.ewgen@yandex.ru).

Малинин Владимир Игнатьевич (Россия, Пермь) – 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

Obrosov Anatoliy Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) – Doctoral candidate in Technical Sciences, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Zemerev Evgeniy Sergeevich (Perm, Russian Federation) – Doctoral student, 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).

Malinin Vladimir Ignatevich (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 25.07.2013