

Научная статья

УДК 532.517.4+621.928.93

doi: 10.17223/19988621/85/6

Теоретические и экспериментальные исследования процесса классификации в зависимости от характера скоростного взаимодействия частиц TiN в пневмоизмельчителе с псевдоожиженным слоем

Михаил Викторович Василевский¹, Владимир Анатольевич Полюшко²,
Владимир Иванович Романдин³, Николай Сергеевич Евсеев⁴,
Илья Александрович Жуков⁵, Мансур Хузиахметович Зиятдинов⁶,
Екатерина Сергеевна Марченко⁷, Любовь Александровна Жилина⁸

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

^{3, 6, 8} ООО «Нанокерамика», Томск, Россия

¹ vasmix40@mail.ru

² polyushko@niipmm.tsu.ru

³ romandin@niipmm.tsu.ru

⁴ evseevns@gmail.com

⁵ gofra930@gmail.com

⁶ ziatdinovm@mail.ru

⁷ 89138641814@mail.ru

⁸ alecsanna@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются сепарационные эффекты, возникающие при классификации тонкодисперсных порошков. Проведена оценка скоростных взаимодействий твердых частиц в пневмоизмельчителе с псевдоожиженным слоем. Получены экспериментальные данные значений окружных скоростей воздуха вблизи поверхности ротора в зависимости от числа его оборотов. Проведен расчет граничного размера сепарируемых частиц TiN. Представлено сравнение расчетного граничного размера керамических частиц TiN с полученными экспериментальными данными.

Ключевые слова: пневмоизмельчитель, нитрид титана, псевдоожиженный слой, граничный размер, сепарация частиц, компоненты скорости

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1384 (№ 13.2251.21.0096).

Для цитирования: Василевский М.В., Полюшко В.А., Романдин В.И., Евсеев Н.С., Жуков И.А., Зиятдинов М.Х., Марченко Е.С., Жилина Л.А. Теоретические и экспериментальные исследования процесса классификации в зависимости от характера скоростного взаимодействия частиц TiN в пневмоизмельчителе с псевдоожиженным слоем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 85. С. 74–89. doi: 10.17223/19988621/85/6

Original article

Theoretical and experimental studies of the classification process depending on the nature of the high-speed interaction of TiN particles in a pneumogrinder with a fluidized bed

Mikhail V. Vasilevskiy¹, Vladimir A. Polyushko², Vladimir I. Romandin³,
Nikolay S. Evseev⁴, Il'ya A. Zhukov⁵, Manzur Kh. Ziatdinov⁶,
Ekaterina S. Marchenko⁷, Lyubov' A. Zhilina⁸

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

⁴ Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of RAS,
Biysk, Russian Federation

^{3, 6, 8} Nanokeramika, LLC, Tomsk, Russian Federation

¹ vasmix40@mail.ru

² polyushko@niipmm.tsu.ru

³ romandin@niipmm.tsu.ru

⁴ evseevns@gmail.com

⁵ gofra930@gmail.com

⁶ ziatdinovm@mail.ru

⁷ 89138641814@mail.ru

⁸ alecsanna@mail.ru

Abstract. For grinding and fractionation of submicron and nanosized powders, pneumatic methods with the use of built-in centrifugal-type separation elements of various designs are currently the most promising. In these devices, it is possible to most effectively provide the aerodynamics of the dust and gas flow in the separation zone, which allows one to control the separation boundary. In a fluidized bed apparatus, the layer extends to the rotor. The particles are affected not only by gravity and flow forces but also by the forces arising from the rotor impact on the flow. This paper considers the separation effects associated with the classification of fine powders. Experimental data on the circumferential air velocities near the rotor surface are obtained as the functions of the rotor rotation number. The high-speed interactions of solid particles in a pneumatic grinder with a fluidized bed are evaluated. Using the obtained aerodynamic experimental data, the boundary size of the separated particles is calculated. A comparison of the calculated boundary size of TiN ceramic particles with the obtained experimental data on the fractional separation of fine TiN powders based on granulometric composition measurements by laser diffraction is presented.

Keywords: pneumogrinder, titanium nitride, fluidized bed, boundary size, separation of particles, velocity vector components

Acknowledgments: This work was carried out with a financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2021-1384 (No.13.2251.21.0096).

For citation: Vasilevsky, M.V., Polyushko, V.A., Romandin, V.I., Evseev, N.S., Zhukov, I.A., Ziatdinov, M.Kh., Marchenko, E.S., Zhilina, L.A. (2023) Theoretical and experimental studies of the classification process depending on the nature of the high-speed interaction of TiN particles in a pneumogrinder with a fluidized bed. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 85. pp. 74–89. doi: 10.17223/19988621/85/6

Введение

На сегодняшний день пневматические методы получения тонкодисперсных узкофракционных порошков являются одними из перспективных и экологически чистых методов [1]. Понимание эффектов, сопутствующих процессам измельчения и классификации, дает возможность совершенствовать конструкции пневматических аппаратов и повысить эффективность процессов фракционного разделения.

Для измельчения и фракционирования субмикронных и наноразмерных порошков в настоящее время наиболее перспективными являются пневматические методы с использованием встроенных сепарационных элементов центробежного типа различной конструкции совместно с циркуляцией двухфазной среды в своих контурах. В данных аппаратах можно наиболее эффективно организовать аэродинамику пылегазового потока в зоне сепарации, что позволяет интенсифицировать процесс противоточно-центробежной сепарации частиц и регулировать границу разделения. В струйных мельницах [2–6] разрушение частиц определяется разностью скоростей соударяющихся частиц и частотой взаимодействия частиц. Инжектируемые частицы и моли газа разгоняются струйным потоком, причем скорость частиц зависит от соотношения коэффициентов инжекции молей газа и частиц. В аппарате с псевдоожиженным слоем слой распространяется до ротора, на частицы действуют не только силы тяжести и силы потока, но и силы, возникающие от воздействия на поток ротором. При входе потока воздуха в псевдоожиженный слой материал вовлекается в поток и ускоряется до скорости, соизмеримой со скоростью потока. Во время вовлечения частиц материала в поток происходят интенсивные столкновения частиц друг с другом. Такие столкновения обусловлены различными скоростями частиц в самом потоке, разными размерами частиц и разными точками входа в поток. Унос частиц из слоя компенсируется частицами, возвращаемыми ротором. В аппаратах кипящего слоя зернистых и мелкозернистых материалов скоростные струи (70–150 м/с) используются для стабилизации процесса оживания слоя, повышения интенсивности тепломассообменных процессов [7]. Истирание и измельчение частиц в псевдоожиженном слое является отрицательным моментом в таких процессах. Для пылеулавливания применяются циклоны, которые часто располагаются внутри аппаратов с псевдоожиженным слоем катализатора [8]. Уловленная пыль возвращается в псевдоожиженный слой. В скоростных струях происходит измельчение частиц, на границах струй и в их окрестностях происходит истирание частиц [9].

Цель настоящей работы – исследование сепарационных эффектов в пневматических классификаторах, влияющих на процесс фракционного разделения, а также оценка скоростных взаимодействий твердых частиц в пневмоизмельчителе с псевдоожиженным слоем.

Теоретическая и экспериментальная часть

В настоящей работе рассмотрены две оригинальные установки, представленные на рис. 1.

В аппарате на рис. 1, а псевдоожиженный слой распространяется до ротора, на частицы действуют не только силы тяжести и силы потока, но и силы, возникающие от воздействия на поток ротором.

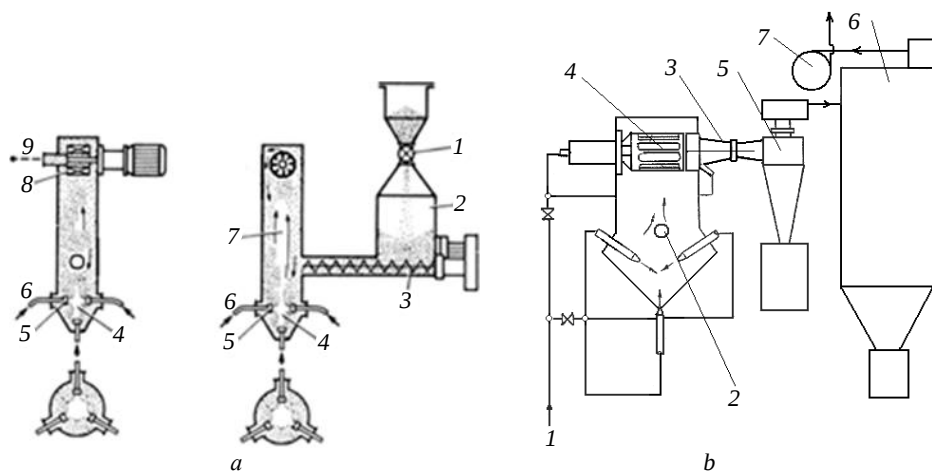


Рис. 1. Схема установки для противоточного размола в псевдооживленном слое (а): 1 – питающее устройство, 2 – бункер с исходными частицами вещества, 3 – система подачи частиц в камеру размола, 4 – псевдооживленный слой, 5 – сопла подачи газа, 6 – трубопровод подачи газа высокого давления, 7 – камера для размола, 8 – сепаратор, 9 – выходной коллектор газа с мелкими частицами; аппарат с псевдооживленным слоем (b): 1 – ввод энергоносителя, 2 – ввод исходного материала, 3 – выход мелкого продукта, 4 – сепаратор, 5 – циклон, 6 – фильтр, 7 – вихревая газодувка

Fig. 1. Design of a facility for countercurrent grinding in a fluidized bed (a): 1, feeding device; 2, hopper with initial particles of a substance; 3, system of the particle delivery into a grinding chamber; 4, fluidized bed; 5, gas supply nozzles; 6, high-pressure gas supply pipeline; 7, grinding chamber; 8, separator; and 9, gas outlet collector with fine particles; apparatus with a fluidized bed (b): 1, input of the energy carrier; 2, input of the source material; 3, output of the fine product; 4, separator; 5, cyclone; 6, filter; and 7, vortex gas blower

При входе потока воздуха в псевдооживленный слой материал вовлекается в поток и ускоряется до скорости, соизмеримой со скоростью потока. Во время вовлечения частиц материала в поток происходят интенсивные столкновения частиц друг с другом. Такие столкновения обусловлены различными скоростями частиц в самом потоке, разными размерами частиц и разными точками входа в поток.

Унос частиц из слоя компенсируется частицами, возвращаемыми ротором. Газ, увлекаемый вращающимся ротором, движется по периферии вблизи стенок корпуса вниз и вверх. Ротор располагается в верхней части корпуса так, что пространство между ротором и верхней стенкой намного меньше, чем пространство между ротором и фокальной точкой пересечения осей сопел [10]. В этом случае возникает эффект диаметрального вентилятора [11], при котором газ диаметрально с периферии проходит внутрь ротора и за счет центробежных эффектов частично выходит из ротора в объем между ротором и верхней стенкой корпуса. Причем конфигурация этого объема имеет расширяющийся участок. При подаче газа из внешней магистрали газ из нижнего объема будет подходить к ротору с определенным динамическим напором. Поэтому эффект диаметрального вентилятора проявляется.

В [12] приведены данные о закручивающей способности различных роторов в осесимметричной схеме. Закрутка осуществляется турбулентным переносом

пульсаций моментов количества движения на границе вращающегося ротора. Интенсивность закрутки зависит от конструкции ротора, числа оборотов, отношения скоростей радиального входа газа v_r и окружной скорости обода ротора W_p . В области эффективной работы для обеспыливания газов принимается отношение $v_r/W_p = 0.01-0.1$, для классификации это отношение находится в диапазоне $0.1-1$. При закрутке газа ободом ротора в осесимметричной схеме окружная скорость газа U_r в диапазоне $v_r/W_p = 0.5-1$ на порядок меньше скорости ротора, поэтому газ перед поступлением в ротор дополнительно закручивают [13].

В аппарате на рис. 2 ротор создает токи газа, которые имеют тангенциальную направленность потока вблизи поверхности ротора. Перетекание части газа из ротора в рабочий объем интенсифицирует подкрутку потока в окрестности ротора.

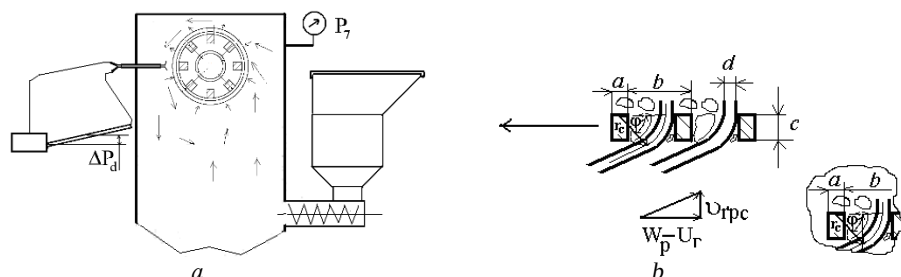


Рис. 2. Схема токов газа и измерения окружной скорости газа в околороторном пространстве (а); схема обтекания газом стержней в системе вращающегося ротора (b): a – ширина стержня, b – расстояние между стержнями, W_p , U_r , $v_{rпс}$ – окружные скорости ротора и газа и радиальная скорость газа на входе в ротор

Fig. 2. Circuit of gas currents and measurements of the circumferential velocity of gas in the near-motor space (a); diagram of the gas flow around the rods in a rotating rotor system (b): a is the width of the rod, b is the distance between the rods, W_p and U_r are the circumferential velocities of the rotor and gas, respectively; $v_{rпс}$ is the radial velocity of the gas at the rotor entrance

В таблице приведены значения окружных скоростей воздуха U_r , замеренных T -образным насадком (см. рис. 2) на расстоянии 1 мм от поверхности ротора при диаметре ротора 50 мм и числе оборотов 4 000, 8 000, 12 000, 16 500 об./мин.

Значения окружных скоростей газа на границе ротора

v_r , м/с	W_p , м/с	U_r , м/с
0	10.5	6.35
	20.9	13.1
	31.4	15.5
	43.2	19.1
5.88	10.5	2.2
	20.9	3.8
	31.4	7.6
	43.2	9.3
6.39	10.5	1.7
	20.9	3.1
	31.4	4.4
	43.2	7.6

Окружная скорость ротора $W_p = \pi D_p n / 60$, радиальная скорость газа $v_r = Q_p / F_p$. В приведенных формулах D_p , F_p – диаметр и площадь боковой поверхности ротора, Q_p – расход воздуха через ротор, включающий расходы газа через сопла, поддувы через уплотнительные зазоры, подшипник.

Из таблицы видно, что закрутка потока вблизи поверхности ротора определяется интенсивностью радиального стока газа в ротор, причем радиальная компонента при сопоставимых скоростях с окружной скоростью ротора оказывается больше тангенциальной скорости газа.

В [14, 15] полагается, что граничный размер сепарируемых мелких частиц может быть оценен по соотношению $V_{\phi s} 2\tau / R_s = v_{rp}$, $\tau_{50} = (\rho_\delta / \rho)(\delta^2_{50} / 18\nu)$, где $V_{\phi s}$ – окружная скорость частиц на сепарационном радиусе, v_{rp} – радиальная скорость газа на границе ротора, R_s – сепарационный радиус, δ – диаметр частицы, ρ , ρ_δ – плотность газа и плотность частицы, ν – коэффициент кинематической вязкости. Будем полагать, что $V_{\phi s} = U_r$ – окружная скорость газа на границе ротора, и $R_s = R_p$ – внешний радиус ротора. Окружные скорости частиц и газа совпадают. Граничный размер, учитывая данные таблицы, будет равен

$$\delta_{50} = \sqrt{\frac{v_{rp} R_p}{U_r^2} \frac{\rho}{\rho_\delta} 18\nu} = \sqrt{\frac{6.39 \cdot 0.025}{7.6^2} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 18 \cdot 1.5 \cdot 10^{-5}} = 1.34 \cdot 10^{-5} \text{ м.} \quad (1)$$

Газ вблизи ротора имеет меньшую крутку по сравнению с ротором. Вращение газа и частиц вне ротора осуществляется посредством турбулентного обмена моментами количества движения молей газа, взаимодействующих со стержнями ротора и молями газа, поступающими из сопел и от уплотнительных зазоров. На рис. 2, *b* приведена схема обтекания стержней, представленных в развернутом виде, в системе вращающегося ротора. В лобовой и кормовой областях обтекания имеются вихревые зоны, вызванные отрывом потока. Поток между стержнями имеет радиус закругления r_c на угол φ : $r_c = 0.5a + b - a - 0.5d = b - 0.5a - 0.5d$, где a , b , c – конструктивные величины (см. рис. 2, *b*).

Газ набегает на решетку профилей под углом, тангенс которого

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_{rp}}{W_p - U_r}.$$

Величина сужения потока из-за разности скоростей ротора и газа определится из соотношения

$$\frac{v_{rpc} d}{\sin \alpha} = v_{rp} (b - a),$$

откуда $d = (b - a) \sin \alpha$. Скорость частиц относительно газа при его повороте определится из соотношения

$$\Delta U_{d\delta} = \frac{\frac{v_{rpc}^2}{\sin^2 \alpha} \tau}{r_c},$$

$$\tau = (\rho_\delta / \rho)(\delta^2 / 18\nu), \quad r_c = b - 0.5a - 0.5d, \quad v_{rpc} = Q_p / [3 \cdot 600(\pi D_p \cdot L_p - z \cdot c \cdot L_p)].$$

Уравнение траектории частицы в криволинейном потоке имеет вид:

$$\frac{r_c \langle d \rangle \varphi \sin \alpha}{v_{rpc}} = \frac{\langle d \rangle d}{\Delta U_{d\delta}},$$

где $\langle d \rangle$ – знак дифференциала. Интегрируя это уравнение, найдем граничный размер отсепарированных частиц из соотношения

$$\frac{r_c \varphi \sin \alpha}{v_{rpc}} = \frac{d}{\Delta U_{d\delta^*}},$$

откуда

$$\Delta U_{d\delta^*} = \frac{v_{rpc} \cdot d}{r_c \varphi \sin \alpha}, \quad \tau_{d^*} = \frac{\Delta U_{dp^*} r_c \sin^2 \alpha}{v_{rp}^2}, \quad \delta_{d^*} = \sqrt{\tau_{d^*} 18v \frac{\rho}{\rho_\delta}}.$$

Расчет показывает, что при $a = 0.006$ м, $b = 2\pi R_p/z = 2\pi \cdot 0.025/8 = 0.0196$ м, $c = 0.007$ м, $Q = 85$ нм³/ч, $W_p = 43.2$ м/с, $U_r = 16.7$ м/с, $\rho = 1.2$ кг/м³, $\rho_\delta = 3\,000$ кг/м³, $\varphi = \pi/4$ имеем следующие значения расчетных величин: $v_{rpc} = 8.98$ м/с, $\alpha = 18.7^\circ$, $d = 0.004$ м, $r_c = 0.0146$ м, $\Delta U_{d\delta^*} = 19.58$ м/с, $\tau_{d^*} = 3.67 \cdot 10^{-4}$ с, $\delta_{d^*} = 5.1 \cdot 10^{-6}$ м.

Частицы более 5.1 мкм будут сепарироваться на стержни-агломераторы частиц. В [16] показано, что в присутствии частиц менее 10 мкм возможна активная агломерация частиц за счет молекулярных сил. Вводится понятие критического размера частиц из условия соизмеримости сил сцепления между ними в структурной сетке и их весом, если рассматривается агломерация в поле сил тяжести. В ряде случаев частицы получают электрический заряд в результате дробления материала, при движении в потоке газа из-за трения частиц между собой и о стенки аппарата. Число положительных и отрицательных частиц может быть одинаково, и в этом случае агломерация частиц резко интенсифицируется. При срыве отложений со стержней ротора в поток поступают более уплотненные агломераты пыли. При обтекании стержней ротора со скоростью 8–11 м/с на фронтальной и кормовой частях образуются рыхлые отложения; при скорости обтекания более 11 м/с на фронтальной части образуются плотные отложения, в кормовой – рыхлые. Количество осевшей пыли зависит от скорости потока и концентрации частиц.

Скорости потока, при которых происходит отрыв частиц, определяются распределением сил адгезии и размеров частиц. Количественно отрыв прилипших частиц определяется медианной скоростью отрыва [16]. Однако в реальном аппарате оценка этих факторов может быть проведена косвенно, только на основе испытаний измельчителя на конкретном материале. В [17] приведены экспериментальные результаты классификации порошка Al_2O_3 на установке марки AFG с рассмотренным сепаратором. Полученные расчетные данные согласуются с экспериментом. Для нитрида титана TiN плотность равна $\rho_\delta = 5\,440$ кг/м³. При аналогичных параметрах расчета, представленных выше (см. таблицу, формулу (1)), для данного материала получим граничный размер равный 12.8 мкм.

В результате проведенных экспериментов по фракционному разделению мелкодисперсных порошков TiN на основе измерения гранулометрического состава методом лазерной дифракции установлено, что в мелкой фракции присутствуют частицы размером менее 14.3 мкм (рис. 3; темная область под кривой). Таким образом, экспериментальные данные и расчеты хорошо согласуются.

Исследование гранулометрического состава порошков TiN выполнено на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Центр поддержан грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0021).

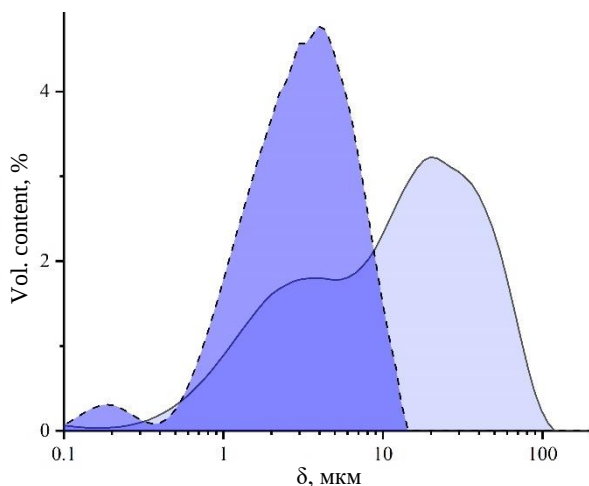


Рис. 3. Распределение частиц TiN по размерам до и после процесса классификации
Fig. 3. TiN particle size distribution before and after the classification

В аппарате, представленном на рис. 1, *b*, при соударении струй повышается давление, при разлете струй возникают циркуляционные токи, которые ожижают слой, реализуется псевдооживленный слой. Газ-энергоноситель с частицами и газ на аэродинамические уплотнения поступают в сепарационную зону, проходят через сепаратор, крупные частицы возвращаются в слой, мелкие выходят из аппарата вместе с газом на дополнительную сепарацию и окончательно выделяются в фильтре.

Порозность насыпного слоя определяется соотношением

$$\varepsilon_0 = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_\delta},$$

где Ω_1 , Ω_2 – объемы слоя и частиц, ρ_n , ρ_δ – плотности насыпного слоя и частиц. Теоретическое значение ε_0 находится в диапазоне 0.475–0.259 [18]. Оценка порозности псевдооживленного слоя в аппаратах с распределительными решетками представлена соотношением [19]

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{0.21},$$

где v – скорость потока, отнесенная к поперечному сечению аппарата, v_0 – скорость начала псевдооживления. Отношение v/v_0 называется числом псевдооживления и находится в пределах 1–50. В аппарате на рис. 1, *a* псевдооживленный слой распространяется до ротора, на частицы действуют не только силы тяжести и силы потока, но и силы, возникающие от воздействия на поток ротором.

На рис. 4, *a* представлена схема затопленной несжимаемой струи, распространяющейся в среде с повышенной плотностью [20].

Суммарный масштаб крупных вихрей и длины переноса этих вихрей на порядок больше масштаба переноса молей газа в теории Прандтля [20], что дает основание полагать, что некоторая доля примеси переносится этими вихрями в ядро потока с сохранением локального аксиального импульса вихревого моля.

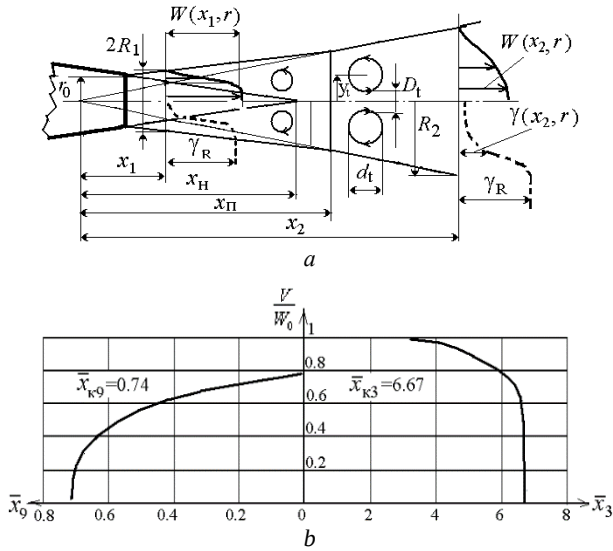


Рис. 4. Схема крупных вихрей и распределений скоростей газа и концентраций частиц в струе (а): r_0 – радиус сопла; x_H, x_{Π} – длины начального и переходного участков; R_1, R_2 – радиусы границы струи в сечениях x_1, x_2 ; y_t – радиус центральной окружности тора; $W(x_2, r)$ – аксиальная скорость газа в сечении x_2 основного участка; γ_R – концентрация частиц на границе струи; $\gamma(x_2, r)$ – концентрация частиц в сечении x_2 основного участка на переменном радиусе r . Безразмерные скорости частиц диаметром 3 и 9 μm в конечном сечении x_k в зависимости от безразмерного расстояния их входа в струю (б). Безразмерные координаты конечных сечений: $\bar{x}_{k3} = 6.67$; $\bar{x}_{k9} = 0.74$

Fig. 4. (a) Diagram of large vortices and distributions of gas velocities and particle concentrations in a jet: r_0 is the nozzle radius; x_H, x_{Π} are the lengths of the initial and transition sections, respectively; R_1, R_2 are the radii of the jet boundary in sections x_1, x_2 , respectively; y_t is the radius of the center circle of the torus; $W(x_2, r)$ is the axial gas velocity in section x_2 of the main region; γ_R is the concentration of particles on the jet boundary; $\gamma(x_2, r)$ is the concentration of particles in section x_2 of the main region at a variable radius r ; (b) dimensionless velocities of the particles with a diameter of 3 and 9 μm in the final section x_k as the functions of the dimensionless distance of their entry into the jet. Dimensionless coordinates of final sections are $\bar{x}_{k3} = 6.67$; $\bar{x}_{k9} = 0.74$

Таким образом, в приосевой области находятся частицы с аксиальными скоростями, сравнимыми с аксиальными скоростями газа в приосевой зоне и приграничной области струи. Это объясняет уменьшение длины начального участка струи при значительных концентрациях частиц в приграничной области и большую разность скоростей частиц в приосевой зоне. Крупные вихри, возникающие в слое смешения осесимметричной струи, имеют замкнутую тороидальную форму, т.е. представляют собой вихревые кольца конечной толщины [20]. В ядре начального участка, там, где отсутствуют градиенты скоростей в продольном и поперечном направлениях, фиксируются турбулентные пульсации, резко возрастающие к концу ядра [20]. Это явление вызывается дальнодействием тороидальных вихрей, возникающих в слоях смешения [20]. Принимается, что радиус тела тора $d_t/2$ пропорционален толщине слоя смешения $R - R_y$, где R – радиус внешней границы струи, R_y – радиус границы ядра; дискретная завихренность

(угловая скорость) пропорциональна максимальному поперечному градиенту скорости

$$\Delta\varpi = 0.5 \frac{\partial W}{\partial r} = \frac{A_0 U_t}{R - R_x},$$

где A_0 – параметр завихренности, определяемый по безразмерному профилю скорости, U_t – скорость обтекания тора в относительном движении. Окружная скорость вихря равна $u_\omega = 0.5 d_t \Delta\varpi$. Для основного участка $U_t = 0.25 W_m$, где W_m – осредненная скорость на оси струи, $A_0 = 2.27$; $d_t/2 = 0.22R$. Частота прохождения вихрей после преобразований может быть выражена соотношением $f = (3.4/x)W_0$ [20]. Расстояние между соседними вихрями определяется соотношением $\Delta x_0 = 0.17x$ [20].

Для оценки скоростного взаимодействия частиц рассмотрим аэрозоль, состоящий из частиц диаметром $\delta = 3$ и 9 мкм, плотностью 1800 кг/м³ в воздухе с температурой 20°C . Для таких частиц можно пренебречь силой тяжести и в уравнении движения принять коэффициент сопротивления движения частицы в форме Стокса.

Уравнение имеет вид [21]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{W - V}{\tau}, \text{ или } V \frac{dV}{dx} = \frac{W - V}{\tau}, \quad (2)$$

где W , V – скорости газа и частиц, м/с; t – время, с; x – переменная осевая координата сечений струи, м; $\tau = (\rho_\delta/\rho)(\delta^2/18\nu)$ – время релаксации, с; ρ , ρ_δ – плотности газа и частиц, кг/м³; ν – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с. Полагая в первом приближении $W = W_0$ постоянной величиной, проинтегрируем уравнение (2) в пределах $[x, x_k]$, где x – координаты сечений вхождения частиц в струю, x_k – координата сечения выхода частиц из участка струи. Решение имеет вид:

$$\frac{x_k - x}{\tau W_0} = -\frac{V}{W_0} - \ln\left(1 - \frac{V}{W_0}\right). \quad (3)$$

Пусть $x_k = 0.1$ м, $W_0 = 300$ м/с, $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\rho_\delta/\rho = 1500$, для частицы диа-

метром 3 мкм величина $\tau_3 = \frac{\delta^2}{18\nu} \frac{\rho_\delta}{\rho} = \frac{(3 \cdot 10^{-6})^2}{18 \cdot 1.5 \cdot 10^{-5}} 1500 = 5 \cdot 10^{-5}$ с, а для частицы 9 мкм величина τ будет равна $\tau_9 = 4.5 \cdot 10^{-4}$ с. Для этих частиц безразмерные величины $\bar{x}_k$ имеют следующие значения:

$$\bar{x}_{k3} = \frac{x_k}{\tau_3 W_0} = \frac{0.1}{5 \cdot 10^{-5} \cdot 300} = 6.67; \quad \bar{x}_{k9} = 0.74$$

На рис. 4, *b* представлены безразмерные кривые скоростей частиц в конечном сечении участка струи в зависимости от их безразмерного расстояния от среза сопла на входе в поток по уравнению (3). В правой части рис. 4, *b* кривая относительной скорости частиц размером 3 мкм показывает, что все частицы, инжектированные в струю в диапазоне $\bar{x}_3 = [0; 4]$ в конечном сечении практически достигают скорости газа. В диапазоне $\bar{x}_3 = [6; 6.67]$ скорость частиц в конечном сечении много меньше скорости газа. Поэтому в конечном сечении могут происходить интенсивные соударения частиц, инжектированных в струю в области $\bar{x}_3 = [0; 4]$, с частицами, инжектированными в струю в области $\bar{x}_3 = [6; 6.67]$.

В левой части рис. 4, *b* кривая безразмерной скорости частиц диаметром 9 мкм свидетельствует, что частицы, инжектируемые в струю, не достигают скорости газа во всем диапазоне $0 < \bar{x}_9 < 0.74$, а в диапазоне $0.6 < \bar{x}_9 < 0.74$ скорость частиц диаметром 9 мкм составляет 2–20% от скорости газа. Переходя к размерным величинам, можно сделать вывод, что на 70% длины струи мелкие частицы (3 мкм) одинаковой крупности измельчаются отколом и сколом, крупные частицы (9 мкм) уменьшаются разрушением сколом за счет взаимодействия с мелкими частицами.

Для частиц более 50 мкм в результате расчетов получена приближенная формула скоростей частиц в струе, которые введены в начальном участке

$$\bar{V} = 0.78(\bar{x})^{0.23}, \quad \bar{V} = \frac{V}{W}, \quad \bar{x} = xW_0^{-0.5}k_c, \quad k_c = 9,2 \frac{v^{0.5}}{\delta^{1.5}} \frac{\rho}{\rho_\delta}. \quad (4)$$

При $x = x_k = 0.1$ м, $\rho_\delta/\rho = 1500$, $W_0 = 300$ м/с, $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м, $v = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $|k_c = 23.0.6$ (м·с)^{-0.5}, $\bar{x} = 0.136$, $\bar{V} = 0.493$, $V = 148$ м/с. При этом коэффициент сопротивления частиц рассчитывался в соответствии с рекомендациями [4]. При лобовом столкновении частиц скорость удара равна 296 м/с, этого достаточно для разрушения. Скорость столкновения в области разлета струй зависит от скорости инерционного пробега частиц. Скорости инерционного пробега частиц более 50 мкм в области разлета практически не меняются. Скорости инерционного пробега частиц менее 10 мкм в области разлета струй кратно уменьшаются. Частота поступления ансамблей скоростных частиц в область разлета струй может быть определена по соотношению

$$f = \frac{3.4}{x} W_0 = \frac{3.4}{0.1} 300 = 10200 \text{ с}^{-1}.$$

Таким образом, измельчение частиц менее 10 мкм происходит в самой струе, а для частиц более 50 мкм измельчение происходит в области разлета струй. Плановая скорость потока определяется из соотношения

$$W_{пл} = \frac{G_\Sigma}{\rho_k F_k},$$

где G_Σ – суммарный расход энергоносителя через сопла, кг/с, ρ_k – плотность энергоносителя в камере кг/м³, F_k – площадь поперечного сечения камеры, м². Расчеты показывают, что плановые скорости соответствуют скоростям витания крупных частиц с диаметром более 50 мкм. Поэтому частицы менее 50 мкм выносятся в сепарационное пространство и отбиваются ротором.

Агломераты, образующиеся в слое мелких частиц, могут вести себя в слое, как гранулы большого размера. Размеры агломерата определяются скоростью витания. Скорость витания v_b находится из зависимости

$$Re_b = \frac{v_b \delta_a}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}}, \quad Ar = \frac{v_b \delta_a^3}{\nu^2} \frac{\rho_a}{\rho} \quad \text{при } Re_b > 700, \quad v_b = 1.71 \left(\delta_a g \frac{\rho_a}{\rho} \right)^{0.5},$$

где δ_a , ρ_a – диаметр и плотность агломерата, ρ , ν – плотность и кинематическая вязкость газа. Агломерат в виде шара, состоящий из множества частиц, обтекаемый потоком, испытывает раздавливающее воздействие перепада давления в лобовой части. Возникающие при этом боковые усилия способствуют разъединению частиц, причем напряжение разъединения пропорционально перепаду давления,

поскольку частицы связаны аутогезионными силами. При обтекании агломерата более мелкими частицами возможно эрозийное разрушение его тела или, наоборот, захват мелких частиц агломератом. Сопротивление крупной частицы в авто-модельной области обтекания определяется

$$P = \xi_x \frac{\pi d_a^2}{4} \rho \frac{W^2}{2},$$

где ξ – коэффициент сопротивления, W – скорость газа относительно агломерата на бесконечности, ρ – плотность газа.

Коэффициент сопротивления шара в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^2 - 10^5$ имеет значения, находящиеся в интервале 0.6–0.4; для диапазона $10^3 - 10^5$ этот коэффициент принимается равным 0.44; а сила сопротивления прямо пропорциональна скоростному напору [12]. Распределение давления по поверхности агрегата приведено в [12]. В области 0–40° давление избыточно (положительно), при 40° это давление равно нулю, в области 40–180° избыточное давление отрицательно. Поскольку перепад давления на агломерате является действующей нагрузкой, то эта нагрузка должна определяться интегралом давления по поверхности. Однако средний перепад определяется лобовым сопротивлением P . Оценки прочности агломератов из частиц порядка 1 мкм при обтекании газовой струей показывают, что размер агломератов составляет порядка 40 мкм [8].

Газовый факел струи в псевдоожиженном слое из зерновых материалов (с частицами размером более 0.5 мм) образует струйный канал, занятый разреженной суспензией [10]. Течение в периферийной зоне факела (на границе между факелом и плотной фазой слоя) можно рассматривать как затопленную струю, плотность вещества которой $\rho_{Rc} = (0.34 - 0.035\delta)\rho_{R0}$, где δ – диаметр частиц в мм, ρ_{R0} – плотность слоя в начальном участке струи [10]. Длина переходного участка определяется по соотношению

$$\frac{C_1 x_n}{r_0} = 3.28,$$

где C_1 – коэффициент струи,

$$C_1 = 0.46 Ga^{0.1} \left(\frac{W_p}{W_f} \right)^{0.32}, \quad Ga = \frac{g \delta^3}{v^2},$$

где $3.0 < Ga < 3160$, $1 < W_p/W_f < 2.5$; W_p – рабочая скорость газа в струе, W_f – критическая начальная скорость псевдоожижения. Однако в силу большой инерционности таких частиц силовое взаимодействие их между собой мало и в [8] не рассматривалось.

Заключение

В работе рассмотрены сепарационные эффекты, возникающие при классификации тонкодисперсных порошков. Получены экспериментальные данные значений окружных скоростей воздуха U_T вблизи поверхности ротора в зависимости от числа оборотов ротора. Проведена оценка скоростных взаимодействий твердых частиц в пневмоизмельчителе с псевдоожиженным слоем. На основе полученных аэродинамических экспериментальных данных проведен расчет граничного размера сепарируемых частиц. Представлено сравнение расчетного граничного раз-

мера керамических частиц TiN с полученными экспериментальными данными по фракционному разделению мелкодисперсных порошков TiN на основе измерений гранулометрического состава методом лазерной дифракции. Расчетные и экспериментальные данные имеют хорошее согласование.

Список источников

1. Шваб А.В., Хайруллина В.Ю. Исследование влияния нестационарного закрученного турбулентного течения на движение одиночной твердой частицы // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 1 (305). С. 47–53.
2. Ghadiri M., Van Impe J. Numerical simulation of particle dynamics in a spiral jet mill via coupled CFD-DEM // *Pharmaceutics*. 2021. V. 13(7). Art. 937. doi: 10.3390/pharmaceutics13070937
3. Акунов В.И. Струйные мельницы. М. : Машиностроение, 1967. 262 с.
4. Федотов К.В., Дмитриев В.И. Изменение технологических свойств руды при измельчении в противоточно-вихревых струях // Известия вузов. Горный журнал. 2010. № 5. С. 129–132.
5. Silverberg P.M., Sharon S.M. Homing in on the best size reduction method // *Chemical Engineering*. 1998. V. 105 (123). P. 36.
6. Hosokawa Micron Ltd : проспект корпорации. URL: <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/jet-mills/> (accessed: 23.11.2022).
7. Бирюков Ю.А., Бузник В.М., Дунаевский Г.Е., Ивонин И.В., Ищенко А.Н., Лернер М.И., Лымарь А.М., Обьедков А.Ю., Псахье С.Г., Цветников А.К. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / под ред. В.М. Бузника. Томск : Изд-во НТЛ, 2009. 192 с.
8. Бувеч Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдоожижение. М. : Химия, 1984. 136 с.
9. Постникова И.В., Блиничев В.Н. Системный подход к расчету процессов в аппарате комбинированного действия // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48, № 3. С. 241–248. doi: 10.7868/S0040357114030178
10. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. М. : Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Угreshа», 2007. 125 с.
11. Караджи В.Г., Московко Ю.Г. Вентиляционное оборудование : технические рекомендации для проектировщиков и монтажников. М. : АВОК-ПРЕСС, 2010. 421 с.
12. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. 248 с.
13. Росляк А.Т., Зятиков П.Н. Воздушно-центробежная классификация микропорошков, Томск : ТМЛ-пресс, 2010. 224 с.
14. Sharapov R.R., Prokopenko V.S. Modeling of the separation process in dynamic separators // *World Applied Sciences Journal*. 2013. V. 25 (3). P. 536–542 doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.03.7061
15. Crawley G., Malcolmson A., Crosley I., McLeish A. Particle Classification: Making the Grade // *Chemical Engineering*. 2002. V. 109(4). P. 54–60.
16. Зимон А.Д. Адгезия и аутогезия частиц. Зависимость адгезии и аутогезии частиц муки от давления контакта // Известия вузов. Пищевая технология. 1991. № 1-3 (200-202). С. 113–116.
17. Бирюков Ю.А., Богданов Л.Н., Обьедков А.Ю., Полюшко В.А., Бирюков А.Ю., Грязев А.В., Хасанов О.Л. Эффективное выделение ультрадисперсных порошков пневмоциркуляционными методами // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 7-2. С. 34–37.
18. Разумов И.М. Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1972. 239 с.

19. Абрамович Г.Н., Гиришович Т.А., Крашенников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй / под ред. Г.Н. Абрамовича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1984. 717 с.
20. Евсеев Н.С., Жуков И.А. Влияние турбулентных пульсаций на процесс фракционного разделения мелкодисперсных порошков нитридов металлов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 72. С. 70–79. doi: 10.17223/19988621/72/6
21. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1973. 848 с.

References

1. Shvab A.V., Khairullina V.Y. (2011) Effect of an unsteady swirled turbulent flow on the motion of a single solid particle. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 52(1). pp. 37–42. doi: 10.1134/S0021894411010068
2. Ghadiri M., Van Impe J. (2021) Numerical simulation of particle dynamics in a spiral jet mill via coupled CFD-DEM. *Pharmaceutics*. 13(7). Article 937. doi: 10.3390/pharmaceutics13070937
3. Akunov V.I. (1967) *Struynye mel'nitsy* [Jet mills]. Moscow: Mashinostroenie.
4. Fedotov K.V., Dmitriev V.I. (2010) Izmenenie tekhnologicheskikh svoystv rudy pri izmel'chenii v protivotochno-vikhrevykh struyakh [The change of ore technological properties during the grinding in counter-current-vortex jets]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal – Minerals and Mining Engineering*. pp. 129–132.
5. Silverberg P.M., Sharon S.M. (1998) Homing in on the best size reduction method. *Chemical Engineering*. 105(123). P. 36.
6. *Prospectus of Hosokawa Micron Ltd Corporation* [Electronic resource]. Access mode: <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/jet-mills/> (Date of the application 23.11.2022)
7. Biryukov Yu.A., Buznik V.M., Dunaevskiy G.E., Ivonin I.V., Ishchenko A.N., Lerner M.I., Lyman' A.M., Ob'edkov A.Yu., Psakhie S.G., Tsvetnikov A.K. (2009) *Ul'tradispersnye i nanorazmernye poroshki: sozdanie, stroenie, proizvodstvo i primeneniye* [Ultrafine and nanosized powders: creation, structure, production and application]. Tomsk: NTL Publishing House.
8. Buevich Yu.A., Minaev G.A. (1984) *Struynoe psevdoozhizhenie* [Jet fluidization]. Moscow: Khimiya.
9. Postnikova I.V., Blinichev V.N. (2014) System approach to calculating processes in the apparatus of combined action. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 48(3). pp. 241–248. doi: 10.7868/S0040357114030178
10. Baloyan B.M., Kolmakov A.G., Alymov M.I., Krotov A.M. (2007) *Nanomaterialy. Klassifikatsiya, osobennosti svoystv, primeneniye i tekhnologii polucheniya* [Nanomaterials. Classification, features of properties, application, and production technologies]. Moscow: International University of Nature, Society and Man of Dubna, "Ugresha" Branch.
11. Karadzhii V.G., Moskovko Yu.G. (2010) *Ventilyatsionnoye oborudovanie. Tekhnicheskie rekomendatsii dlya proektirovshchikov i montazhnikov* [Ventilation equipment. Technical recommendations for designers and installers]. Moscow: AVOK – PRESS.
12. Vasilevskiy M.V. (2008) *Obespylivaniye gazov inertsiionnymi apparatami* [Dedusting of gases by inertial devices]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.
13. Roslyak A.T., Zyatikov P.N. (2010) *Vozdushno-tsentrifugalnaya klassifikatsiya mikro-poroshkov* [Air centrifugal classification of micropowders]. Tomsk: TML-Press.
14. Sharapov R.R., Prokopenko V.S. (2013) Modeling of the separation process in dynamic separators. *World Applied Sciences Journal*. 25(3). pp. 536–542. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.03.7061
15. Crawley G., Malcolmson A., Crosley I., McLeish A. (2002) Particle classification: making the grade. *Chemical Engineering*. 109(4). pp. 54–60.

16. Zimon A.D. (1991) Adgeziya i autogeziya chastits. Zavisimost' adgezii i autogezii chastits muki ot davleniya kontakta [Adhesion and autohesion of particles. Dependence of adhesion and autohesion of flour particles on contact pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya – Izvestia of Higher Educational Institutions. Food Technology*. 1–3(200–202). pp. 113–116.
17. Biryukov Yu.A., Bogdanov L.N., Ob"edkov A.Yu., Polyushko V.A., Biryukov A.Yu., Gryazev A.V., Khasanov O.L. (2012) Effektivnoe vydelenie ul'tradispersnykh poroshkov pnevmotransportnymi metodami [Effective isolation of ultrafine powders by pneumatic methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 55(7-2). pp. 34–37.
18. Razumov I.M. (1972) *Pseudoozhizhenie i pnevмотransport sypuchikh materialov* [Fluidization and pneumatic transport of bulk materials]. Moscow: Khimiya.
19. Abramovich G.N., Girshovich T.A., Krashennikov S.Yu., Sekundov A.N., Smimova I.P. (1984) *Teoriya turbulentnykh stuy* [Theory of turbulent jets]. Moscow: Nauka.
20. Evseev N.S., Zhukov I.A. (2021) Vliyaniye turbulentnykh pul'satsiy na protsess fraktsionnogo razdeleniya melkodispersnykh poroshkov nitridov metallov [Effect of turbulent pulsations on the fractional separation of fine powders of metal nitrides]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 72. pp. 70–79. doi: 10.17223/19988621/72/6
21. Loytsyanskiy L.G. (1973) *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Nauka.

Сведения об авторах:

Василевский Михаил Викторович – кандидат технических наук, Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: vasmix40@mail.ru

Полюшко Владимир Анатольевич – инженер-исследователь Инновационно-технологического научно-образовательного центра Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: polyushko@niipmm.tsu.ru

Романдин Владимир Иванович – научный сотрудник ООО «Нанокерамика», Томск, Россия. E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Евсеев Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета, Томск, Россия; научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия. E-mail: evseevns@gmail.com

Жуков Илья Александрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: gofra930@gmail.com

Зиятдинов Мансур Хузиахметович – доктор технических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета, Томск, Россия; научный сотрудник ООО «Нанокерамика», Томск, Российская Федерация. E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Марченко Екатерина Сергеевна – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией медицинских сплавов и имплантатов с памятью формы Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: 89138641814@mail.ru

Жилина Любовь Александровна – директор ООО «Нанокерамика», Томск, Россия. E-mail: alecsanna@mail.ru

Information about the authors:

Vasilevskiy Mikhail V. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vasmix40@mail.ru

Polyushko Vladimir A. (Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: polyushko@niipmm.tsu.ru

Romandin Vladimir I. (Researcher, Nanokeramika, LLC, Tomsk, Russian Federation). E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Evseev Nikolay S. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of RAS, Biysk, Russian Federation). E-mail: evseevns@gmail.com

Zhukov Il'ya A. (Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

Ziatdinov Manzur Kh. (Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; Researcher, Nanokeramika, LLC, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Marchenko Ekaterina S. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 89138641814@mail.ru

Zhilina Lyubov' A. (Director, Nanokeramika, LLC, Tomsk, Russian Federation). E-mail: alecsanna@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; принята к публикации 10.10.2023

The article was submitted 20.12.2022; accepted for publication 10.10.2023