

УДК 532.517.4+621.928.93
DOI 10.17223/19988621/72/6

Н.С. Евсеев, И.А. Жуков

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НА ПРОЦЕСС ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ¹

Показано влияние турбулентных пульсаций на процесс фракционного разделения твердых частиц. Произведен расчет траекторий движения мелкодисперсных частиц в зависимости от коэффициента турбулентной диффузии. В качестве твердой фазы рассмотрены мелкодисперсные частицы нитридов металлов. Численные исследования показали, что закрутка газа и стенок аппарата, а также турбулентные пульсации вносят существенные изменения в процесс разделения. Проведено исследование на достоверность результатов численного моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, закрученное турбулентное течение, классификация частиц по размеру, нитриды металлов.

На сегодняшний день практически все промышленные отрасли для решения своих задач в том или ином виде используют мелкодисперсные порошки. Однако, к качеству таких порошков предъявляется ряд жестких требований, в том числе такие требования предъявляются к однородности грансостава. Для многих технологических процессов гранулометрический состав играет ключевую роль. Одним из примеров таких технологий могут служить аддитивные технологии, где размер порошковых частиц непосредственно влияет на подбор режимных параметров спекания и, как следствие, на качество получаемого изделия. Такие изделия применяются в аэрокосмической отрасли, энергетике и ряде других отраслей, где малейшее изменение технологического процесса может привести к серьезным последствиям.

Основываясь на мировом опыте можно утверждать, что на сегодняшний день пневматические методы остаются наиболее безопасными и эффективными методами получения однородных порошковых материалов. Однако, несмотря на достаточно продолжительное развитие таких методов, они далеки до полного их изучения. Фундаментальные исследования в области двухфазных течений вносят непосредственный вклад в совершенствование пневматических методов и модернизации существующего оборудования с целью повышения остроты сепарации.

В настоящей работе рассмотрена сепарационная камера, имеющая в конструкции подвижный элемент, изменение положения которого позволяет влиять на граничный размер и остроту сепарации. Как известно, турбулентные пульсации влияют на аэродинамическую картину и могут вносить в процесс фракционного разделения существенные изменения. В работе рассмотрено влияние турбулентных пульсаций на траектории движения твердых частиц различного диаметра.

При проведении расчетов в качестве твердой фазы были выбраны нитриды металлов. Данный выбор был основан исходя из следующего. Нитриды металлов

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60036.

обладают уникальными физико-химическими свойствами, к которым можно отнести коррозионную стойкость, жаропрочность, износостойкость. Благодаря этим свойствам нитриды металлов имеют высокую прикладную значимость [1, 2]. Наиболее важными возможными направлениями их практического применения является их использование в качестве лигатур для повышения жаропрочности металлических материалов, исходных порошков для получения нитридных керамик и в качестве легирующих добавок для повышения хладостойкости стали. В работе в качестве твёрдой фазы рассматриваются нитриды титана, алюминия, кремния и ванадия, отличающиеся в действительности друг от друга как по плотностям, так и по морфологии. Такой выбор позволяет провести более качественную оценку о влиянии турбулентных пульсаций на процесс фракционного разделения на примере реальных соединений.

Физико-математическая постановка задачи

В работе рассматривается процесс фракционного разделения в сепарационной камере, имеющей в своей конструкции три существенные особенности, позволяющие влиять на процесс классификации. Схематически данная камера изображена на рис. 1. Главной особенностью является разделительный подвижный элемент, расположенный на выходе сепарационной области, изменение положения которого может влиять на граничный размер и остроту сепарации.

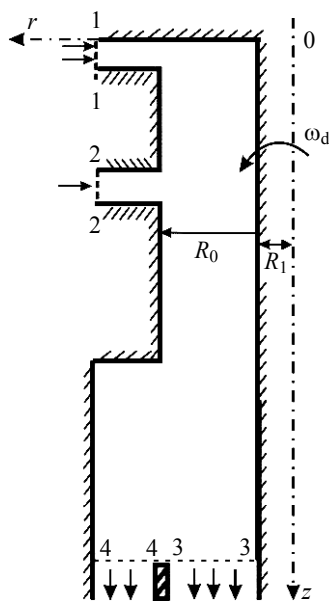


Рис. 1. Схема расчетной области
Fig. 1. Computational domain

Численные исследования [3] показали, что окружная компонента скорости несущего газового потока привносит в аэродинамическую картину течения существенные изменения. Зачастую поле окружной компоненты скорости распределено неравномерно. Второй особенностью рассматриваемой сепарационной камеры является наличие вращающегося элемента вдоль вертикальной оси Oz . Данный элемент способствует выравниванию поля окружной компоненты скорости. Третьей особенностью данной камеры является наличие патрубка для подвода вспомогательного газового потока (сечение 2-2). Такой поток имеет две основные функции: служит для оттеснения частиц от стенки камеры, а также для продува разделяемых частиц, с целью предотвращения агломерации.

Таким образом, принцип работы вихревой камеры следующий. Закрученный вязкий газ и порошкообразный материал поступают в зону сепарации (сечение 1-1). Вспомогательный закрученный газовый поток (без твёрдой примеси) подводится при помощи патрубка в сечении 2-2. В выходном сечении имеется подвижный разделительный элемент, который разделяет поток газа на два потока. Более мелкая фракция твёрдых частиц устремляется в сечение 3-3, а более крупная покидает рабочую область через сечение 4-4. Стоит отметить, что твёрдые стенки камеры также могут вращаться вокруг оси Oz .

При расчете допускалось, что газ несжимаемый, так как в реальных центробежных аппаратах скорости несущей среды и перепад давления малы [4].

Аналогично работе [5] при моделировании аэродинамики закрученного турбулентного потока использовалась система уравнений Рейнольдса. Данная задача решалась в цилиндрической системе координат для случая осевой симметрии (относительно $0z$). Замыкание уравнений Рейнольдса проводилось на основе обобщенной модели Буссинеска. В данной модели считается, что тензор турбулентных напряжений пропорционален тензору скоростей деформаций с точностью до коэффициента турбулентной вязкости [5]. Опустив некоторые математические выводы [5], представим систему уравнений Рейнольдса в безразмерном виде:

$$\frac{\partial}{\partial r}(u_r r) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z r) = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial ru_r}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r^2) + \frac{\partial}{\partial z}(ru_r u_z) - \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_r}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_r}{\partial z} \right] \right\} = \\ = u_\phi^2 - r \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial v_t}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} (1+v_t) \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial ru_z}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z}(ru_z^2) + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r u_z) - \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] \right\} = \\ = -r \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{r}{\text{Re}} \left[\frac{\partial v_t}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial ru_\phi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r u_\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(ru_z u_\phi) - \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r(1+v_t) \frac{\partial u_\phi}{\partial z} \right] \right\} = \\ = -u_r u_\phi - \frac{1}{\text{Re}} \left[(1+v_t) \frac{u_\phi}{r} + u_\phi \frac{\partial v_t}{\partial r} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

При приведении уравнений (1) – (4) к безразмерному виду были использованы масштабы скорости и длины и постоянной плотности (так как скорости малы). За масштаб скорости была выбрана радиальная компонента скорости на входе в сепарационную камеру U_0 (сечение 1-1), за масштаб длины – радиус канала R_0 . В результате приведения уравнений к безразмерному виду формируется критерий Рейнольдса (Re), а при обезразмеривании граничных условий окружной компоненты скорости [5] формируются два критерия закрутки, которые запишутся в виде

$$\text{Rg} = \frac{\omega_g R_0}{U_0}; \quad \text{Rd} = \frac{\omega_d R_0}{U_0}. \quad (5)$$

Здесь ω_g и ω_d – угловые скорости вращения газа во входном сечении камеры и стенок сепарационной камеры соответственно.

С помощью известной k - ω -модели турбулентности Уилкокса определялась турбулентная вязкость и замыкалась система уравнений (1) – (4). Аналогично работе [5] записывались два дополнительных уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и удельной скорости диссипации ω .

Для замыкания системы уравнений были поставлены следующие граничные условия. Во входных сечениях камеры (рис. 1) были заданы радиальная и окружная компоненты вектора скорости, кинетическая энергия и удельная скорость диссипации. Для аксиальной компоненты скорости использовалось условие Неймана. Для твердых стенок граничными условиями для скоростей были условия прилипания, для удельной скорости диссипации граничное условие выводилось из баланса диссипации и молекулярной диффузии уравнения переноса [6]. На выходе из камеры использовалось условие Неймана для всех искомых компонент.

При моделировании движения твёрдой фазы, состоящей из мелкодисперсных частиц, применялся известный траекторный метод. При этом рассматривается совокупность решений для i -й исходной фракции мелкодисперсных частиц, которые расположены в j -х точках старта по высоте входного сечения расчетной области (рис. 1, сечение 1-1). Следует отметить, что в работе рассматривается двухфазное течение при малых концентрациях твёрдой фазы, что позволяет пренебречь обратным силовым влиянием частиц на газовый поток. Скорость и траекторию движения твёрдой частицы можно найти, решив следующие уравнения:

$$\frac{d\mathbf{r}^{i,j}}{dt} = \mathbf{W}^{i,j}; \quad (6)$$

$$m^{i,j} \frac{d\mathbf{W}^{i,j}}{dt} = \mathbf{F}^{i,j}. \quad (7)$$

Здесь $\mathbf{W}$ – вектор скорости частицы, m – ее масса, r – радиус-вектор, F – вектор сил, оказывающих влияние на частицу.

Опустим математические выводы, подробно описанные в работе [5], а также опустим индексы i и j , тогда представленная система уравнений в безразмерном виде для цилиндрической системы координат запишется в виде

$$\frac{dw_r}{d\tau} = \frac{w_\varphi^2}{r} + \frac{u_r - w_r}{Stk} \xi; \quad (8)$$

$$\frac{dw_\varphi}{d\tau} = -\frac{w_\varphi w_r}{r} + \frac{u_\varphi - w_\varphi}{Stk} \xi; \quad (9)$$

$$\frac{dw_z}{d\tau} = \frac{u_z - w_z}{Stk} \xi - \frac{1}{Fr}; \quad (10)$$

$$d\tau = \frac{dr}{w_r} = \frac{rd\varphi}{w_\varphi} = \frac{dz}{w_z}. \quad (11)$$

$$\text{где} \quad \xi = 1 + 0.197 Re_p^{0.63} + 2.64 \cdot 10^{-4} Re_p^{1.38} \quad (12)$$

представляет собой коэффициент, который принимает во внимание отклонение коэффициента аэродинамического сопротивления частицы от его значения, вычисленного по закону Стокса, а критерии Stk , Fr , Re_p – критерии Стокса, Фруда и Рейнольдса частицы. Эти критерии имеют вид

$$Re_p = \frac{\delta |\mathbf{U} - \mathbf{W}|}{\nu}; \quad Fr = \frac{U_0^2}{gR_0}; \quad Stk = \frac{\rho_p}{\rho} \frac{\delta^2 U_0}{18\nu R_0}. \quad (13)$$

Здесь ρ , ρ_p – плотности несущей среды и твердой фазы, δ – диаметр шарообразной частицы, g – ускорение свободного падения.

Представленный метод расчета носит детерминированный характер. Однако необходимо учитывать факторы, которые могут повлиять на траекторию частицы. Одним из них является участие частиц в пульсационном движении несущего турбулентного потока. Как показали экспериментальные данные, явление турбулентной диффузии существенно сказывается на процессе фракционного разделения частиц и понижает эффективность процесса разделения [7]. Учет этого явления в данной работе проводится аналогично с работой [7], когда пульсационные значения скоростей определяются вероятностным законом Гаусса:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \exp\left(-\frac{(u' - u'_m)^2}{2k}\right). \quad (14)$$

Здесь u'_m – математическое ожидание, значение которого равно нулю; k – дисперсия, равная кинетической энергии пульсационного движения; f – плотность вероятности.

Опустив некоторые выводы, подробно представленные в работе [5], случайную величину пульсационной скорости найдем из выражения

$$u' = \pm \gamma \sqrt{-2k \ln N}, \quad (15)$$

где $0 < N < 1$; γ – эмпирическая константа.

При интегрировании уравнений (8) – (10) осредненная скорость несущей среды складывается с пульсационной составляющей, в результате получаем систему

$$\frac{dw_r}{d\tau} = \frac{w_\varphi^2}{r} + \frac{u_r + u'_r - w_r}{Stk} \xi; \quad (16)$$

$$\frac{dw_\varphi}{d\tau} = -\frac{w_\varphi w_r}{r} + \frac{u_\varphi + u'_\varphi - w_\varphi}{Stk} \xi; \quad (17)$$

$$\frac{dw_z}{d\tau} = \frac{u_z + u'_z - w_z}{Stk} \xi - \frac{1}{Fr}. \quad (18)$$

Здесь τ – характерное время, наименьшее из двух значений: $\Delta\tau_1$ – времени пребывания частицы в вихре и $\Delta\tau_2$ – времени жизни турбулентного вихря [5].

Метод численного решения

При решении данной задачи использовались численные методы, подробно описанные в работе [3]. Решение системы уравнений переноса импульса и уравнения неразрывности для несущей среды проводилось в переменных скорость – давление. Численное решение проводилось на гибридной шахматной разностной сетке методом контрольного объёма на основе неявного обобщённого метода переменных направлений. Конвективные и диффузионные слагаемые уравнения переноса радиальной, аксиальной, окружной составляющих вектора скорости, а также кинетической энергии и удельной скорости диссипации записываются с помощью известной экспоненциальной схемы.

Достоверность численного исследования подтверждается тестовыми исследованиями на сеточную и итерационную сходимость, а также сравнением полученных численных расчетов с известными опытными данными, приведенными в [3, 5].

Анализ численных результатов

В работе при расчете движения твёрдой фазы были использованы следующие параметры несущей среды:

$Re = 5000$, $Rg = 0.3$, $Rd = 0.3$. На основе рассчитанных полей компонент скорости, кинетической энергии, удельной скорости диссипации был проведен расчет траекторий движения твёрдых мелкодисперсных частиц в сепарационной камере.

На рис. 2 представлены результаты расчета траекторий движения твёрдых частиц нитридов металлов при детерминированном и стохастическом подходах. Рис. 2, *a* отражает траектории движения частиц диаметром $\delta = 5$ мкм, а рис. 2, *b* – частиц диаметром $\delta = 20$ мкм. Из рис. 2 видно, что наиболее мелкие частицы подвержены влиянию как мелкомасштабных, так и крупномасштабных пульсаций. Это объясняет сглаженные траектории движения крупных частиц по сравнению с частицами меньшего размера.

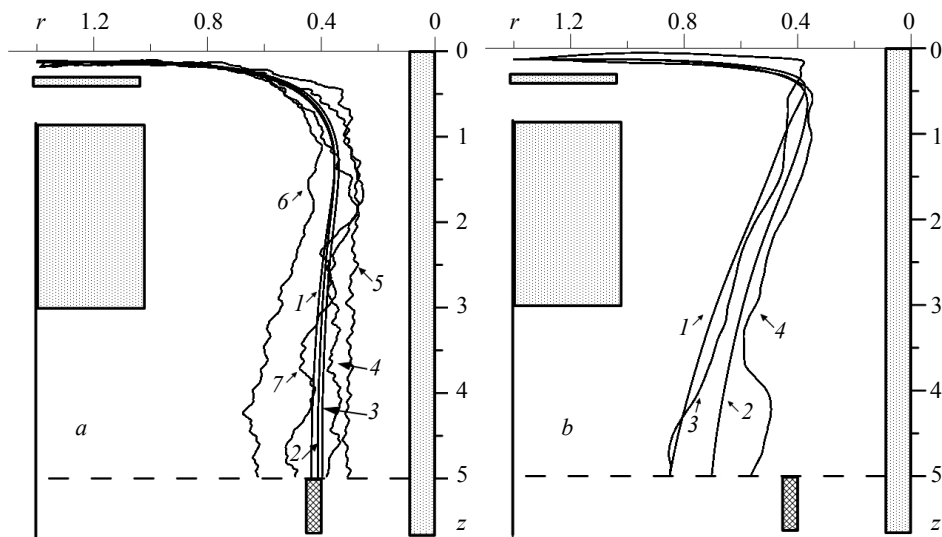


Рис. 2. Траектории движения одиночных частиц с одинаковой точкой старта при детерминированном и вероятностном подходах. (а) $\delta = 5$ мкм; (1 – VN, 2 – Si_3N_4 , 3 – AlN; при $\gamma = 0$), (4 – Si_3N_4 , 5 – AlN, 6 – VN, 7 – TiN; при $\gamma = 1.5$); (б) $\delta = 20$ мкм; (1 – VN, 2 – Si_3N_4 ; при $\gamma = 0$), (3 – VN, 4 – Si_3N_4 ; при $\gamma = 1.5$)

Fig. 2. Trajectories of single particles with the same starting point at deterministic and stochastic approaches. (a) $\delta = 5$ μm ; (1 – VN, 2 – Si_3N_4 , 3 – AlN; at $\gamma = 0$), (4 – Si_3N_4 , 5 – AlN, 6 – VN, 7 – TiN; at $\gamma = 1.5$); (b) $\delta = 20$ μm ; (1 – VN, 2 – Si_3N_4 ; at $\gamma = 0$), (3 – VN, 4 – Si_3N_4 ; at $\gamma = 1.5$)

На рис. 3 отражены траектории движения твёрдых частиц нитридов кремния и ванадия диаметром $\delta = 5$ мкм в зависимости от положения точки старта во входном сечении камеры. Видно, что более легкие частицы подвергаются более сильному воздействию турбулентной диффузии.

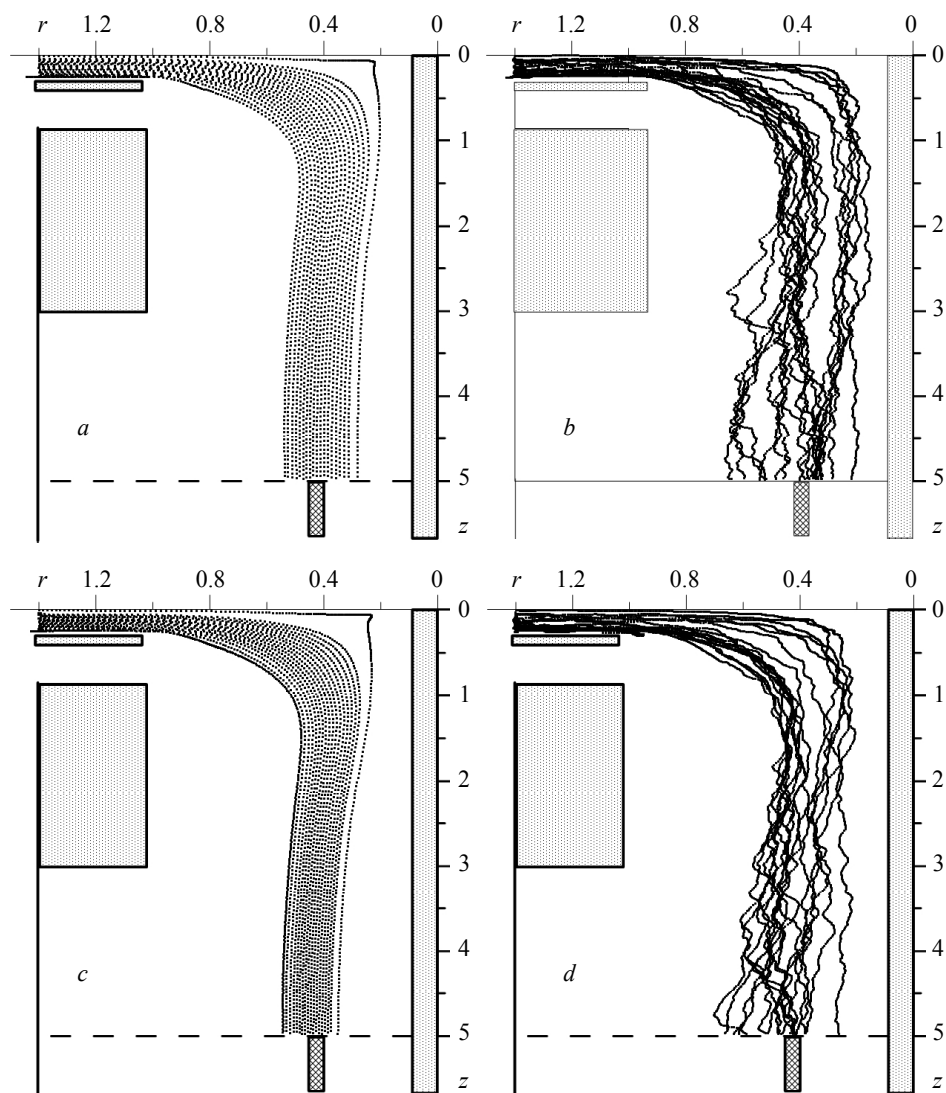


Рис. 3. Траектории движения частиц в зависимости от расположения точки старта во входном сечении при детерминированном и вероятностном подходах. $\delta = 5$ мкм; (a) Si_3N_4 при $\gamma = 0$; (b) Si_3N_4 при $\gamma = 1.5$; (c) VN при $\gamma = 0$; (d) VN при $\gamma = 1.5$

Fig. 3. Particle trajectories with respect to the starting point location in the input section at deterministic and stochastic approaches. $\delta = 5$ μm ; (a) Si_3N_4 at $\gamma = 0$; (b) Si_3N_4 at $\gamma = 1.5$; (c) VN at $\gamma = 0$; and (d) VN at $\gamma = 1.5$

Как было описано выше, экспериментальные данные подтверждают, что в расчетах с использованием детерминированного подхода завышена реальная эффективность процесса фракционного разделения. Для более точного расчета процесса разделения необходимо учитывать и турбулентную диффузию.

Проведённые численные исследования также подтвердили, что турбулентные пульсации газа влияют на остроту сепарации и граничный размер частиц. Для

оценки остроты сепарации были построены кривые разделения Тромпа (рис. 4). Из графика видно, что при детерминированном подходе острота сепарации завышена, а учёт влияния турбулентной диффузии частиц уточняет величину эффективности процесса фракционного разделения. Для примера на рис. 4 были приведены кривые разделения для нитрида кремния Si_3N_4 .

Следует отметить, что при проведении численных расчетов и построении кривых разделения использовался множественный расчет пробных частиц, однако, для лучшей визуализации на графиках приведена лишь малая часть таких траекторий.

Конструктивной особенностью рассматриваемой вихревой камеры является разделительный подвижный элемент, расположенный на выходе сепарационной области, изменение положения которого может влиять на граничный размер и остроту сепарации. На рис. 5 показано такое влияние. Данные кривые построены при расчете траекторий движения нитрида ванадия VN. Кривая 1 отражает процесс сепарации при положении перегородки на расстоянии 0.8 [безразмерных единиц] от вращающегося приосевого цилиндра, кривая 2– 0.6; кривая 3– 0.4.

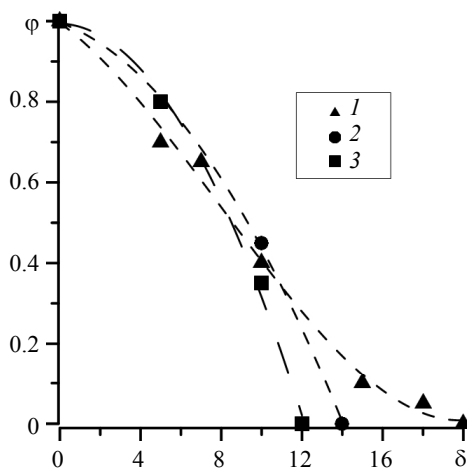


Рис. 4. Кривые разделения Тромпа при детерминированном и вероятностном подходах: 1– $\gamma = 1.5$, 2– $\gamma = 0.5$, 3– $\gamma = 0$

Fig. 4. Tromp separation curves at deterministic and stochastic approaches: $\gamma = (1)$ 1.5; (2) 0.5; and (3) 0

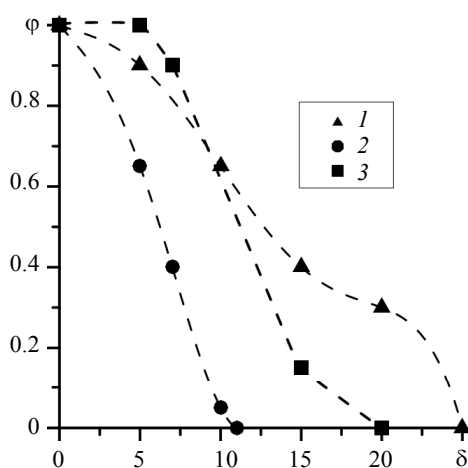


Рис. 5. Влияние положения разделительного элемента на эффективность процесса классификации

Fig. 5. Influence of the dividing element position on the efficiency of the classification process

Заключение

Представлены результаты численного исследования процесса фракционного разделения твёрдых мелкодисперсных частиц в сепарационной камере. Показана возможность управлять граничным размером частиц при перемещении разделительного элемента, расположенного на выходе из вихревой камеры. Показано влияние турбулентных пульсаций на процесс фракционного разделения твердых частиц. Численные исследования показали, что турбулентные пульсации вносят существенные изменения в процесс разделения и влияют на граничный размер и остроту сепарации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Zhukov I.A., et al. Structure and mechanical properties of magnesium-based composites reinforced with nitride aluminum nanoparticles // Russian Physics Journal. 2017. V. 59. No. 12. P. 2183–2185. DOI: 10.1007/s11182-017-1034-6.
2. Khrustalyov A.P., Garkushin G.V., Zhukov I.A., Razorenov S.V. and Vorozhtsov A.B. Quasi-static and plate impact loading of cast magnesium alloy ML5 reinforced with aluminum nitride nanoparticles. *Metals*. 2019. V. 9. No. 6. P. 715. DOI: 10.3390/met9060715.
3. Шваб А.В., Евсеев Н.С. Моделирование процесса фракционного разделения частиц в пневматическом центробежном аппарате // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 4. С. 826–836. DOI: 10.1007/s10891-016-1443-3.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
5. Шваб А.В., Евсеев Н.С. Исследование процесса сепарации частиц в турбулентном закрученном потоке // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 2. С. 197–205. DOI: 10.7868/S0040357115020128
6. Шваб А.В., Брендаков В.Н. Влияние гидродинамики и турбулентной диффузии на процессы разделения в центробежных и гравитационных аппаратах порошковой технологии // Изв. вержд. Физика. 1993. № 4. С. 69–80. DOI: 10.1007/BF00570743.
7. Мостафа А.А., Монджиа Х.Ц., Макдоннелл В.Г., Самуэлсен Г.С. Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование // Аэрокосмическая техника. 1990. №3. С. 65–81. DOI: 10.2514/3.10079.

Статья поступила 29.07.2020

Evseev N.S., Zhukov I.A. (2021) 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

Keywords: mathematical modeling, swirling turbulent flow, particle size classification, metal nitrides.

This paper presents a numerical study of a two-phase swirling turbulent flow in a separation element of a vortex chamber. The paper considers a process of fractional separation in the separation chamber with three particular features in its design. The main feature is the separation mobile element located at the outlet of the separation area. Changes in the position of this element can affect the boundary size and the sharpness of the separation. The second feature of the considered separation chamber is the presence of a rotating element along the vertical axis. This element helps to align the field of the circumferential velocity component. The third feature of this chamber is the presence of a branch pipe for the auxiliary gas flow supply intended to push the particles away from the chamber wall and to blow the separated particles in order to prevent them from agglomeration. In this work, the trajectories of the motion of fine nitride particles are calculated taking into account the turbulent diffusion effect. A possibility to control the boundary size of the particles, when moving the separation element located at the outlet of the vortex chamber, is demonstrated. Numerical study results show that the turbulent pulsations cause significant changes in the separation process and affect the boundary size and the sharpness of the separation.

Financial support. The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-60036.

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

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

REFERENCES

1. Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Zhukov I.A., Promakhov V.V., Dammer V.Kh., Vorozhtsov A.B. (2017) Structure and mechanical properties of magnesium-based composites reinforced with nitride aluminum nanoparticles. *Russian Physics Journal*. 59(12). pp. 2183–2185. DOI: 10.1007/s11182-017-1034-6.
2. Khrustalyov A.P., Garkushin G.V., Zhukov I.A., Razorenov S.V., Vorozhtsov A.B. (2019) Quasi-static and plate impact loading of cast magnesium alloy ML5 reinforced with aluminum nitride nanoparticles. *Metals*. 9(6). pp. 715–727. DOI: 10.3390/met9060715.
3. Shvab A.V., Evseev N.S. (2016) Modeling the process of particle fractionation in a pneumatic centrifugal apparatus. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 89(4). pp. 829–839. DOI: 10.1007/s10891-016-1443-3.
4. Loytsyanskiy L.G. (1987) *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Nauka.
5. Shvab A.V., Evseev N.S. (2015) Studying the separation of particles in a turbulent vortex flow. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 49(2). pp. 191–199. DOI: 10.1134/S0040579515020128.
6. Shvab A.V., Brendakov V.N. (1993) Effect of hydrodynamics and turbulent diffusion on separation processes in centrifugal and gravitational apparatus of powder technology. *Russian Physics Journal*. 36(4). pp. 350–359. DOI: 10.1007/BF00570743.
7. Mostafa A.A., Mongia H.C., McDonnell V.G., Samuelsen G.S. (1989) On the evolution of particle-laden jet flows: a theoretical and experimental study. *AIAA Journal*. 27. pp. 167–183. DOI: 10.2514/3.10079.

Received: July 29, 2020