

Научная статья

УДК 532.517.4 + 621.928.93

doi: 10.17223/19988621/83/7

Исследование аэродинамики и процесса фракционного разделения мелкодисперсных частиц в сепарационной камере

Николай Сергеевич Евсеев¹, Илья Александрович Жуков²,
Иван Алексеевич Бельчиков³,

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

¹ Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ evseevns@gmail.com

² gofra930@gmail.com

³ ivan70422@gmail.com

Аннотация. Представлено исследование влияния режимных и геометрических параметров на процесс фракционного разделения тонкодисперсных частиц в рабочей области сепарационной камеры. Главной особенностью вихревой камеры является кольцевая преграда, расположенная в области выхода двухфазного течения из зоны сепарации. Размер, положение и закрутка такой преграды позволяют влиять на аэродинамическую картину и, как следствие, на граничный размер сепарируемых частиц. При расчете фракционного разделения дисперсных частиц использованы физические параметры одно- и многокомпонентной керамики.

Ключевые слова: вихревая камера, закрученное двухфазное течение, турбулентность, фракционное разделение частиц по размерам, керамика

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-3236.2021.4. Исследование процесса фракционного разделения AlMgB₁₄ выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028.

Для цитирования: Евсеев Н.С., Жуков И.А., Бельчиков И.А. Исследование аэродинамики и процесса фракционного разделения мелкодисперсных частиц в сепарационной камере // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 83. С. 74–85. doi: 10.17223/19988621/83/7

Original article

A study of aerodynamics and fractional separation of fine particles in a separation chamber

Nikolay S. Evseev¹, Il'ya A. Zhukov², Ivan A. Bel'chikov³,

^{1,2,3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation

¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

¹ evseevns@gmail.com

² gofra930@gmail.com

³ ivan70422@gmail.com

Abstract. This paper presents a study of the effect of regime and geometric parameters on the fractional separation of fine particles in a working area of the proposed separation chamber. The main feature of the vortex chamber is an annular barrier in the region where a two-phase flow leaves the separation zone. The size, position, and swirl of such an obstacle allow one to affect the aerodynamic pattern and, consequently, the boundary size of the separated particles. The presence of a rotating paraxial cylinder in the vortex chamber design provides a more uniform field of the circumferential velocity component, which has a positive effect on aerodynamic conditions within the chamber. The physical parameters of single- and multicomponent ceramics are used in calculations of fractional separation of dispersed particles. Analysis of the calculated results shows that when calculating and evaluating the parameters, it is extremely important to take into account gas pulsations of the fractional separation due to their effect on the separated fine particles. New data on aerodynamics within the considered chamber and the calculated data on the fractional separation of single- and multicomponent ceramics in the studied area of the separation element are presented.

Keywords: vortex chamber, swirling two-phase flow, turbulence, fractional separation of particles by size, ceramics

Acknowledgments: This work was financially supported by the grant from the President of the Russian Federation (MK-3236.2021.4). The study of fractional separation of AlMgB14 was carried out with the financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State assignment No. FSWM-2020-0028).

For citation: Evseev, N.S., Zhukov, I.A., Bel'chikov, I.A. (2023) A Study of aerodynamics and fractional separation of fine particles in a separation chamber. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 83. pp. 74–85. doi: 10.17223/19988621/83/7

Введение

На сегодняшний день пневматические методы получения тонкодисперсных узкофракционных порошков являются одними из перспективных и экологически чистых методов [1]. Несмотря на множество различных установок для измельчения и классификации мелкодисперсных материалов, предлагаются новые конструкции и активно ведутся работы по улучшению качества и эффективности

процесса фракционного разделения порошков [2–4]. Аэродинамика в рабочей зоне воздушно-центробежных классификаторов определяет процессы измельчения и фракционного разделения частиц. Исследование аэродинамической картины в таких аппаратах важно для понимания эффектов и явлений, сопутствующих процессам измельчения и классификации, и дает возможность совершенствовать конструкции сепарационных элементов с целью повышения эффективности процессов фракционного разделения. Численное моделирование закрученных гетерогенных потоков позволяет определить аэродинамическую картину в рабочей области пневматических аппаратов и оценить ее влияние на эффективность процесса классификации частиц.

Керамические материалы (в том числе многокомпонентные и высокоэнтروпийные керамики) представляют интерес для исследователей и находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Так, оксидная керамика широко используется при создании элементов электроники и материалов конструкционного назначения [5], а нитридная керамика – при создании покрытий [6], микролегировании [7]. Боридная керамика может применяться в качестве сырья для смазочных и износостойких покрытий (например, керамика на основе AlMgB_{14}) [8]. Высокоэнтропийная и многокомпонентная керамики представляют собой перспективный класс материалов с уникальными свойствами [9]. Получение узкофракционных керамических порошков является сложной и актуальной задачей. Совершенствование конструкций пневматических центробежных аппаратов позволит повысить эффективность и остроту сепарации.

Цель работы – исследование аэродинамики закрученного турбулентного течения в предлагаемой вихревой камере и расчет траекторий движения твердых керамических частиц в рассматриваемой области сепарационного элемента.

Физико-математическая постановка задачи

Рассматриваемая вихревая камера имеет ряд конструктивных особенностей, влияющих на процесс фракционного разделения. Одной из таких особенностей является вращающийся приосевой цилиндр (рассматривается осесимметричное течение), позволяющий выровнять поле окружной компоненты скорости в приосевой части камеры и отсеснить крупную фракцию к периферийной части аппарата. Вторая особенность – наличие дополнительного воздушного поддува, служащего для отдаления частиц от вертикальной стенки камеры и дополнительного воздействия на агломераты частиц для их разделения. Третьей, наиболее важной особенностью является наличие кольцевой преграды, расположенной в области выхода двухфазного течения из зоны сепарации. Размер, положение и закрутка такой преграды позволяют влиять на аэродинамическую картину и, как следствие, на граничный размер сепарируемых частиц. Схема рассматриваемой камеры представлена на рис. 1. Течение в камере реализовано следующим образом. Двухфазный (газ–твёрдые частицы) закрученный поток подводится к входу 1. Несущий газовый поток дополнительно подается на вход 2. Стенки сепарационной камеры могут осуществлять вращение вокруг оси симметрии. Сформированный двухфазный поток в выходном сечении разделяется кольцевой преградой на два потока, которые уносят частицы в крупный (выход 3) и мелкий (выход 4) продукты разделения.

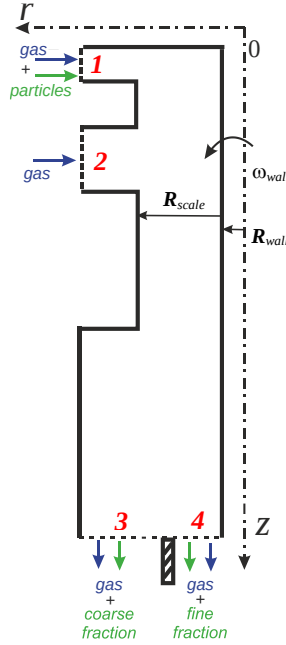


Рис. 1. Схема сепарационной камеры
Fig. 1. Design of a separation chamber

При решении поставленной задачи использовалась цилиндрическая система координат, газ считался несжимаемым. Для расчета закрученного турбулентного течения применялся подход RANS. Уравнения Рейнольдса замыкались при помощи обобщенной модели Буссинеска [10]. В безразмерной форме система уравнений Рейнольдса и уравнение неразрывности запишутся в виде:

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

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

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

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

Для записи системы уравнений в безразмерном виде за масштаб длины принимался радиус канала R_{scale} (см. рис. 1), и радиальная скорость во входном сечении в сепарационную камеру U_0 выбиралась за масштаб скорости.

При записи граничных условий окружной составляющей вектора скорости сформировано два критерия:

$$R_{ct} = \frac{\omega_{ct} R_{scale}}{U_0}; R_r = \frac{\omega_r R_{scale}}{U_0}. \quad (5)$$

В формулах (5) ω_{ct} и ω_r представляют угловые скорости вращения твердых стенок аппарата и газа на входе 1.

Для определения турбулентной вязкости применялась широко используемая модель турбулентности Уилкокка [10], хорошо описывающая пристеночную турбулентность.

Граничные условия следующие. На входах 1 и 2 (см. рис. 1) задавались радиальная и окружная составляющие вектора скорости, кинетическая энергия и удельная скорость диссипации. Для компонент u_z ставилось «мягкое» условие (Неймана). Условия прилипания для компонент скорости выполнялись на стенках вихревой камеры. Для удельной скорости диссипации кинетической энергии условие определялось через баланс диссипации и молекулярной диффузии уравнения переноса [10]. В выходных сечениях для всех расчетных величин выполнялось условие Неймана.

Расчет твердой дисперсной фазы проводился при помощи траекторного подхода [11]. При таком подходе производится расчет каждой i -й фракции частиц в зависимости от j -х начальных точек движения, расставленных по высоте входа 1 (см. рис. 1). Обратное силовое влияние твердой фазы на несущий поток не учитывается в силу малых концентраций дисперсной фазы. Таким образом, система уравнений, описывающая скорости и траектории движения мелкодисперсных твердых частиц с учетом турбулентных газовых пульсаций в безразмерной форме, имеет вид [11]:

$$\frac{dw_r}{d\tau} = \frac{w_\varphi^2}{r} + \frac{u_r + u'_r - w_r}{Stk} \xi, \quad (6)$$

$$\frac{dw_\varphi}{d\tau} = -\frac{w_\varphi w_r}{r} + \frac{u_\varphi + u'_\varphi - w_\varphi}{Stk} \xi, \quad (7)$$

$$\frac{dw_z}{d\tau} = \frac{u_z + u'_z - w_z}{Stk} \xi - \frac{1}{Fr}. \quad (8)$$

Здесь τ – характерное время, наименьшее из двух значений: $\Delta\tau_1$ – времени пребывания частицы в вихре, и $\Delta\tau_2$ – времени жизни турбулентного вихря [10]; $Stk = (\rho_p \delta^2 U_0) / (18 \nu R_{scale})$ и $Fr = U_0^2 / (g R_{scale})$ – критерии Стокса и Фруда.

Учет отклонения коэффициента аэродинамического сопротивления частицы от закона Стокса проводится при помощи выражения $\xi = 1 + 0.197 Re_p^{0.63} + 2.64 \cdot 10^{-4} Re_p^{1.38}$. Здесь $Re_p = (\delta |\mathbf{U} - \mathbf{W}|) / \nu$ – критерий Рейнольдса частицы (ρ , ρ_p – плотности несущей среды и твердой фазы, δ – диаметр шарообразной частицы, g – ускорение свободного падения).

Пульсации несущего потока определялись вероятностным законом Гаусса, при этом случайная величина пульсационной скорости вычислялась при помощи формулы [11]

$$u' = \pm \gamma \sqrt{-2k \ln N}. \quad (9)$$

Здесь $0 < N < 1$, γ – эмпирическая константа.

Для решения поставленной задачи применялись широко известные и апробированные методы расчета. Решение уравнений переноса и уравнения неразрывности для газовой фазы осуществлялось в переменных «давление–скорость» на гибридной разностной сетке при помощи известного обобщенного метода переменных направлений [10]. При решении уравнений переноса компонент вектора скорости, кинетической энергии и удельной скорости диссипации при описании конвекции и диффузии использовалась экспоненциальная схема [10]. Для проверки достоверности расчетных данных проводились многочисленные исследования на итерационную и сеточную сходимости и сравнение результатов исследования с экспериментальными данными других авторов при описании подобных течений (подробно исследования по достоверности расчетов изложены в [10]).

Расчет аэродинамики произведен с использованием оборудования 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.21.0012).

Анализ численных результатов

Геометрия сепарационной камеры и режим течения определяют структуру газового потока. В рассматриваемой камере одним из ключевых геометрических параметров является ее высота. На рис. 2 изображены линии тока турбулентного закрученного течения в сепарационной камере при $Re=7\,000$, $R_g = 0.5$, $R_{ct} = 0.5$ в зависимости от высоты вихревой камеры. Из рисунка видно, что с увеличением высоты вихревой камеры (см. рис. 2, *b*, *c*) несущий поток полностью огибает область отрывного течения за уступом и устанавливается к выходному сечению камеры.

Другим важным параметром, влияющим на течение и в итоге на процесс фракционного разделения, является закрутка несущего потока газа и твердых стенок сепарационной камеры [12]. На рис. 3 показано распределение окружной компоненты скорости воздушного потока при $Re = 7\,000$ в зависимости от величин закрутки газа и стенок. Видно, что с увеличением величины закрутки происходят интенсификация поля окружной компоненты скорости и ее выравнивание внутри сепарационной камеры.

В работе при расчете траекторий движения мелкодисперсных частиц использованы следующие параметры несущего потока: $Re = 7\,000$, $R_g = 0.2$, $R_{ct} = 0.2$.

На рис. 4 представлены результаты расчета траекторий движения керамических частиц различной плотности и дисперсности при детерминированном и вероятностном подходах. Данные о характеристиках многокомпонентной керамики (HfTiCN)–TiB₂ взяты из работы [9].

Из рисунка видно, что мелкодисперсные частицы сильнее подвержены влиянию турбулентных пульсаций. Частицы с большей плотностью участвуют в наиболее сильном пульсационном движении, в то время как мелкие пульсации практически не оказывают на них никакого влияния.

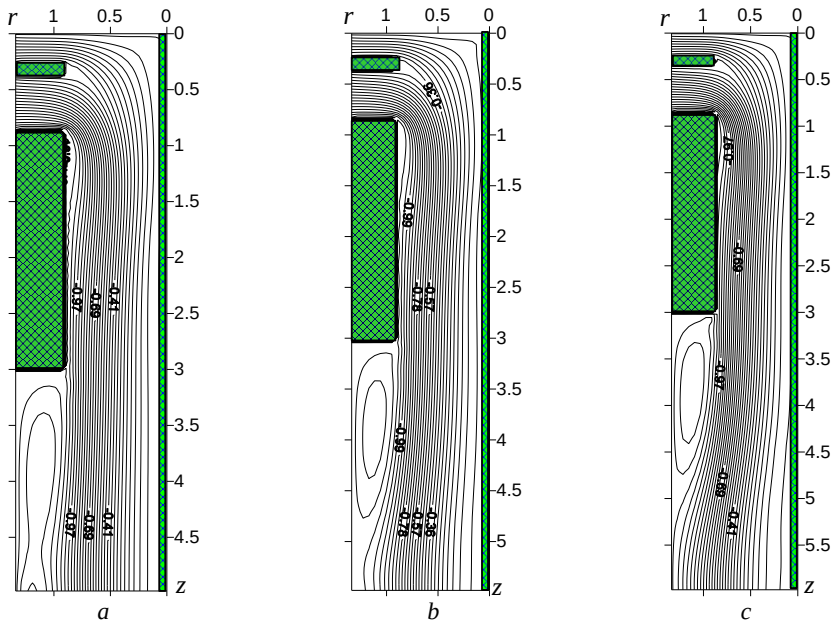


Рис. 2. Линии тока в зависимости от высоты сепарационной камеры:
 $a - h = 5$, $b - h = 5.5$, $c - h = 6$

Fig. 2. Streamlines at various heights of the separation chamber: $h = (a) 5$, $(b) 5.5$, and $(c) 6$

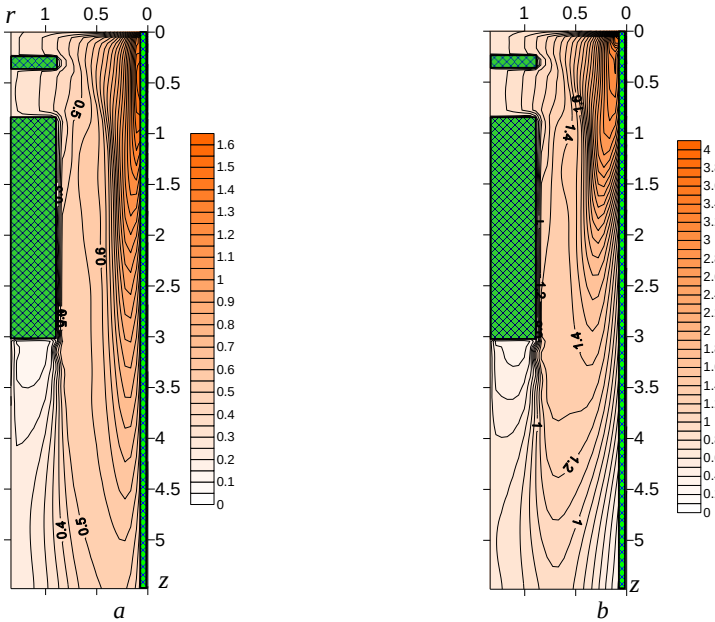


Рис. 3. Распределение компоненты u_φ в зависимости от величины закрутки:
 $a - R_r = 0.2$, $R_{ct} = 0.2$, $b - R_r = 0.5$, $R_{ct} = 0.5$

Fig. 3. Distribution of the component u_φ at various magnitudes of the swirl of the gas and walls:
 $(a) R_r = 0.2$, $R_{ct} = 0.2$ and $(b) R_r = 0.5$, $R_{ct} = 0.5$

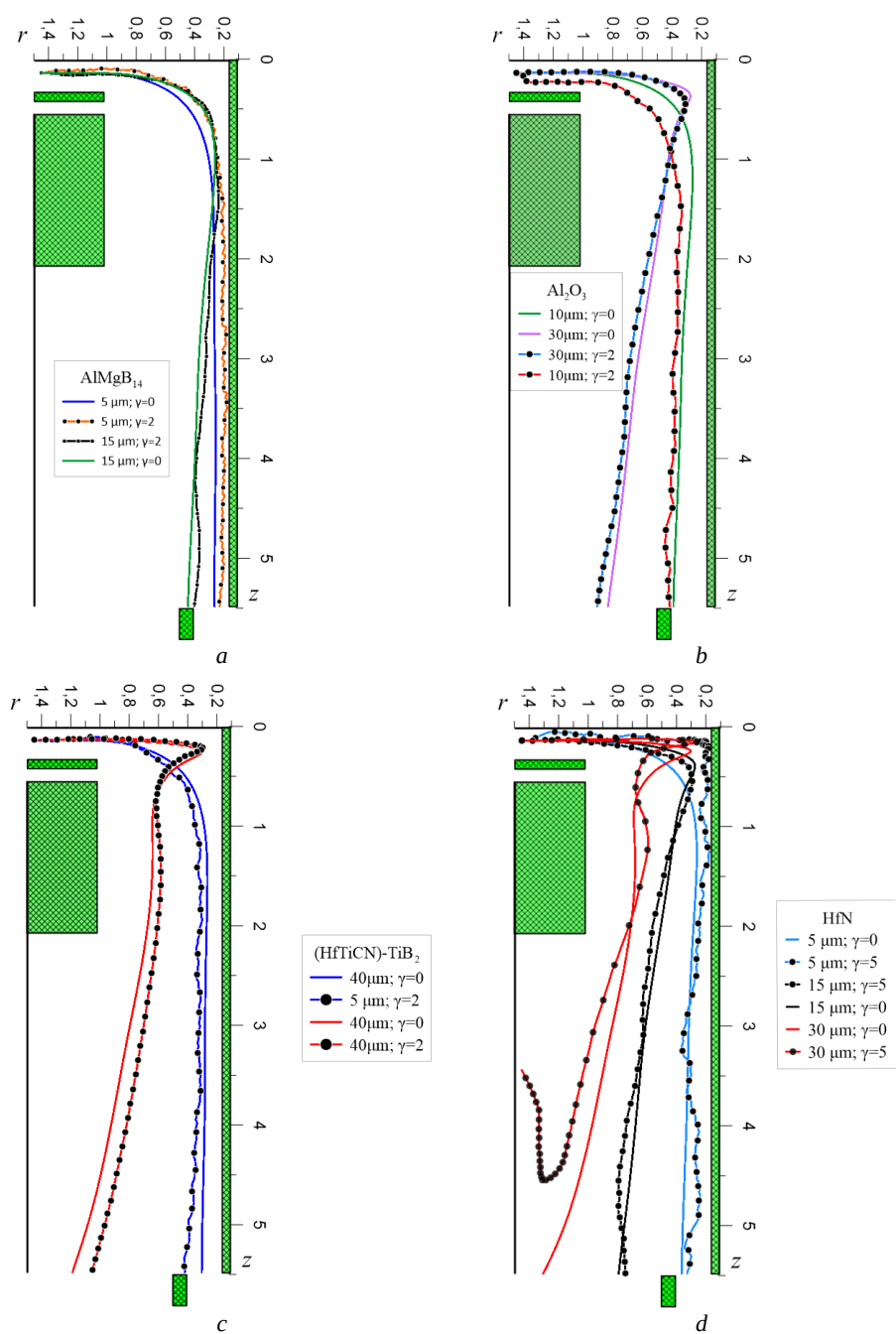


Рис. 4. Траектории движения одиночных керамических частиц (детерминированный и вероятностный методы)

Fig. 4. Trajectories of the motion of single ceramic particles (deterministic and probabilistic methods)

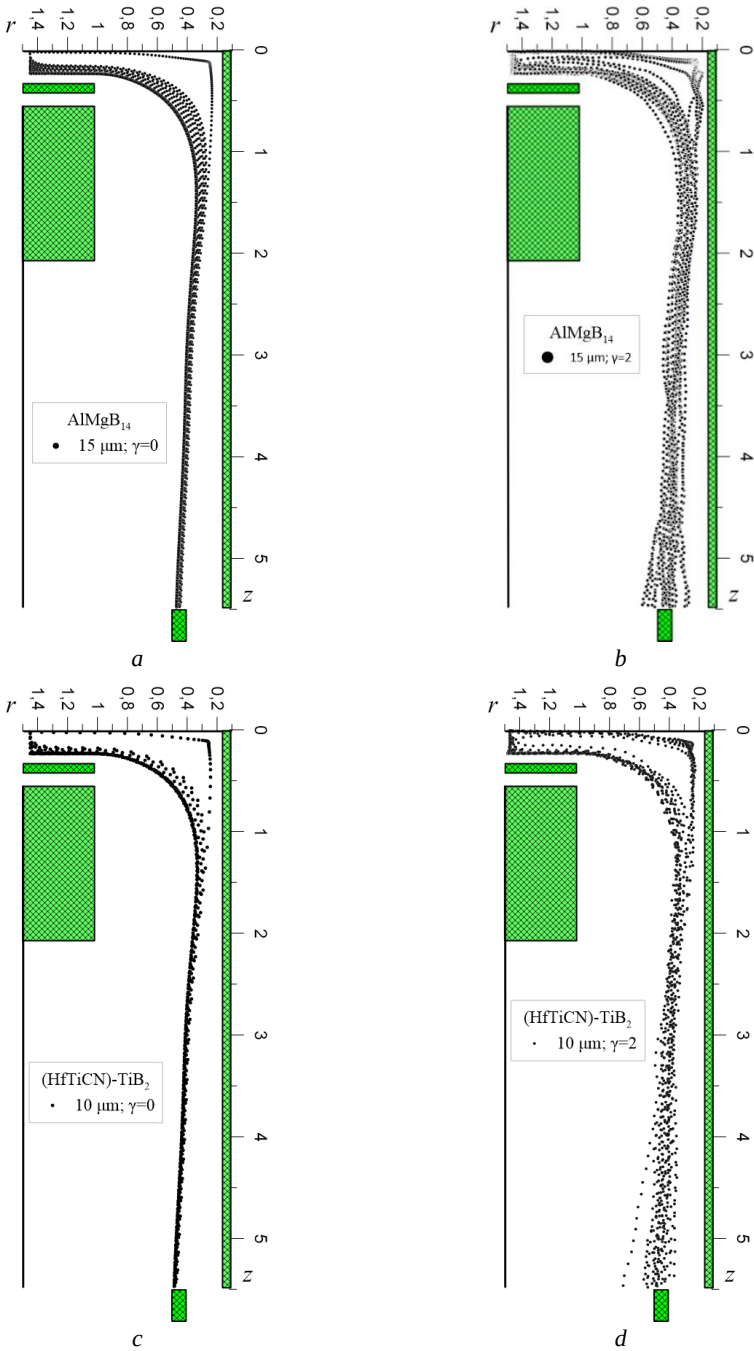


Рис. 5. Траектории движения керамических частиц при различных точках запуска по высоте входа камеры (детерминированный и вероятностный методы)

Fig. 5. Trajectories of the motion of ceramic particles at different starting points along the height of the chamber entrance (deterministic and probabilistic methods)

Анализ рис. 5 позволяет сделать вывод, что при расчете и оценке параметров фракционного разделения крайне важно принимать во внимание газовые пульсации, которые воздействуют на мелкодисперсные частицы. Такое воздействие оказывает негативное влияние на процесс классификации. Оно способствует увлечению частиц иного размера в продукты разделения и снижает остроту сепарации.

Заключение

В работе представлено исследование влияния основных режимных и геометрических параметров на процесс фракционного разделения тонкодисперсных частиц в рабочей области сепарационной камеры на примере движения одно- и многокомпонентных керамических частиц. Показано, что закрутка газа и стенок камеры оказывает воздействие на аэродинамическую картину внутри сепарационного элемента центробежного классификатора. Установлено, что наличие вращающегося приосевого цилиндра позволяет получить более равномерное поле окружной компоненты скорости, что положительно сказывается на аэродинамической обстановке внутри вихревой камеры. Показано, что дополнительный элемент в виде кольцевой преграды в области выхода зоны сепарации позволяет дополнительно вносить коррективы в характеристики течения и процесс классификации.

Список источников

1. Шваб А.В., Садретдинов Ш.Р., Брендаков В.Н. Исследование влияния потока газа и турбулентной диффузии на процесс центробежной классификации тонкодисперсных частиц // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53, № 2 (312). С. 33–42. doi: 10.1134/S0021894412020046
2. Турубаев Р.Р., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики газа и траектории движения частиц при взаимодействии двух встречных закрученных потоков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 75. С. 138–149. doi: 10.17223/19988621/75/12
3. Шваб А.В., Соломаха А.Е. Численное моделирование аэродинамики воздушно-центробежного классификатора // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 2-2 (759). С. 155–161. doi: 10.17223/00213411/64/2-2/155
4. Турубаев Р.Р., Шваб А.В. Численное исследование аэродинамики закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере центробежного аппарата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 65. С. 137–147. doi: 10.17223/19988621/65/11
5. Лукин Е.С., Попова Н.А., Ануфриева Е.В. и др. Современная оксидная керамика и области ее применения // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2014. № 2. С. 30–39
6. Лойко В.А., Маркова Л.В., Сёмин Е.В. Исследование покрытий хром-нитрид хрома в среднеуглеродистых низколегированных сталях // Известия Национальной академии наук Беларуси. Сер. физико-технических наук. 2012. № 3. С. 25–30
7. Манашев И.Р., Гаврилова Т.О., Шатохин И.М., Зиятдинов М.Х. Технология производства азотированных ферросплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 4 (31). С. 4–12.
8. Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L., Russell A.M. A new class of ultra-hard materials based on AlMgB14 // Scripta Materialia. 2000. V. 42 (6). P. 597–602. doi: 10.1016/S1359-6462(99)00400-5

9. Evseev N.S., Matveev A.E., Nikitin P.Yu. et al. A theoretical and experimental investigation on the SHS synthesis of (HfTiCN)-TiB₂ high-entropy composite // *Ceramics International*. 2022. V. 48, is. 11. P. 16010–16014. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.144
10. 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
11. 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
12. Зятиков П.Н. Экспериментальные исследования аэродинамики закрученного потока в воздушно-центробежном классификаторе // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2011. № 1 (13). С. 83–92.

References

1. Shvab, A.V., Sadretudinov, S.R., Brendakov, V.N. (2012) Effects of gas flow and turbulent diffusion on the centrifugal classification of fine particles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 53. pp. 173–181. doi: 10.1134/S0021894412020046
2. Turubaev R.R., Shvab A.V. (2022) Modelirovanie aerodinamiki gaza i traektorii dvizheniya chastits pri vzaimodeystvii dvukh vstrechnykh zakruchennykh potokov [Simulation of gas aerodynamics and particle trajectory in the interaction of two counter swirling flows]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 75. pp. 138–149. doi: 10.17223/19988621/75/12
3. Shvab A.V., Solomakha A.E. (2021) Chislennoe modelirovanie aerodinamiki vozdushno-tsentrobezhnogo klassifikatora [Numerical simulation of aerodynamics of air-centrifugal classifier]. *Izvestiya vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*. 64(2-2(759)). pp. 155–161. doi: 10.17223/00213411/64/2-2/155
4. Turubaev R.R., Shvab A.V. (2020) Chislennoe issledovanie aerodinamiki zakruchennogo turbulentnogo techeniya i protsessa klassifikatsii chastits v vikhrevoi kamere tsentrobezhnogo apparata [Numerical study of the aerodynamics of a swirling turbulent flow and the process of classifying particles in the vortex chamber of a centrifugal apparatus]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 65. pp. 137–147. doi: 10.17223/19988621/65/11
5. Lukin E.S., Makarov N.A., Kozlov A.I., Popova N.A., Kuteynikova A.L., Anufrieva E.V., Vartanyan M.A., Kozlov I.A., Safina M.N., Nagayuk I.I., Gorelik E.I., Saburina I.N., Murav'ev E.N. (2014) Sovremennaya oksidnaya keramika i oblasti ee primeneniya [Novel oxide ceramics and fields of its application]. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk im. A.M. Prokhorova – News Academy of Engineering Sciences A.M. Prokhorov*. 2. pp. 30–39.
6. Loyko V.A., Markova L.V., Semin E.V. (2012) Issledovanie pokrytiy khrom-nitrid khroma v sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Investigation of chromium-chromium nitride coatings in medium-carbon low-alloy steels]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 3. pp. 25–30.
7. Manashev I.R., Gavrilova T.O., Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh. (2019) Tekhnologiya proizvodstva azotirovannykh ferrosplavov metodom samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza [Technology for the production of nitrided ferroalloys by the method of self-propagating high-temperature synthesis]. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva – Theory and Technology of Metallurgical Production*. 4(31). pp. 4–12.
8. Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L., Russell A.M. (2000) A new class of ultra-hard materials based on AlMgB₁₄. *Scripta Materialia*. 42(6). pp. 597–602. doi: 10.1016/S1359-6462(99)00400-5

9. Evseev N.S., Matveev A.E., Nikitin P.Yu., Abzaev Yu.A., Zhukov I.A. (2022) A theoretical and experimental investigation on the SHS synthesis of (HfTiCN)-TiB₂ high-entropy composite. *Ceramics International*. 48(11). pp. 16010–16014. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.144
10. 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
11. Evseev N.S., Zhukov I.A. (2021) Vliyanie 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
12. Zyatikov P.N. (2011) Eksperimental'nye issledovaniya aerodinamiki zakruchennogo potoka v vozduшно-tsentrobezhnom klassifikatore [Experimental studies of swirling flow aerodynamics in an air-centrifugal classifier]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 1(13). pp. 83–92.

Сведения об авторах:

Евсеев Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета, Томск, Россия; научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, Бийск, Россия; доцент ИШПР ОНД Томского политехнического университета, Томск, 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

Бельчиков Иван Александрович – научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: ivan70422@gmail.com

Information about the authors:

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

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

Bel'chikov Ivan A. (Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ivan70422@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.12.2022; принята к публикации 01.06.2023

The article was submitted 19.12.2022; accepted for publication 01.06.2023