

УДК 519.63  
PACS 45.50.-j, 45.70.Mg, 47.27.E, 47.11.Df

## Метод оценки времени нахождения дисперсных частиц в канале противоточной вихревой трубы

К. И. Баширова<sup>†</sup>, К. И. Михайленко<sup>‡</sup>

<sup>1</sup> Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

<sup>†</sup> karina-bashirova@bk.ru

<sup>‡</sup> const@uimech.org

В работе рассматривается процесс удаления сферических частиц микронного размера из несжимаемой среды через кольцевую щель диафрагмы горячего выхода вихревой трубы. Оценка скорости удаления проведена при помощи анализа результатов вычислительных экспериментов в свободно распространяемом пакете OpenFOAM. Для моделирования выбран решатель *denseParticleFoam*, реализующий метод MP-PIC (multiphase particle-in-cell method). Метод использует подход Эйлера для несущей среды и подход Лагранжа для дисперсной фазы. В ходе вычислительных экспериментов проведено пять серий расчетов. Серии различаются между собой начальным положением частиц в подаваемом на вход в трубу потоке, в рамках каждой серии рассматривается набор различных плотностей дисперсной фазы. По результатам экспериментов построена зависимость между плотностью частиц и временем до начала удаления их из канала вихревой трубы. Показано наличие прямой зависимости между плотностью частиц и временем достижения ими противоположного конца трубы с диафрагмой горячего выхода. Описан метод обработки полученных результатов. Рассмотрена возможность использования линейной и квадратичной аппроксимаций для определения предполагаемого времени нахождения частиц в канале трубы. Для каждой серии экспериментов проведена оценка доверительных интервалов и величины среднего абсолютного процентного отклонения от предложенной аппроксимации.

**Ключевые слова:** вихревая труба; вычислительный эксперимент; OpenFOAM; MP-PIC; сепарация частиц

Поступила в редакцию 03.07.2024; после рецензии 14.08.2024; принята к опубликованию 28.08.2024

## A method for estimating the residence time of dispersed particles in the channel of a counter-current vortex tube

K. I. Bashirova<sup>†</sup>, C. I. Mikhaylenko<sup>‡</sup>

Mavlyutov Institute of Mechanics Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russia

<sup>†</sup> karina-bashirova@bk.ru

<sup>‡</sup> const@uimech.org

In this paper, the process of removing spherical particles from an incompressible fluid through the hot outlet of a vortex tube is investigated. The removal rate was estimated through computational simulations using OpenFOAM software. The numerical solution was carried out using *denseParti-*

*cleFoam* solver of OpenFOAM, which implements the multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method using the Eulerian approach for the continuous phase and the Lagrangian approach for the dispersed phase. Five series of numerical experiments were carried out, with variations in the initial particle position in the inlet stream and the density of the dispersed phase. Based on the results of the experiments, a relationship has been established between the density of particles and the time they remain in the vortex tube. The relationship between the particle density and the time it takes for the particles to reach the opposite end of the tube with a hot outlet diaphragm is demonstrated. The method of processing the obtained results is described. The possibility of using linear and quadratic approximations to estimate the residence time of particles in a tube channel is considered. For each set of experiments, confidence intervals and the mean absolute percentage error for the prepared approximation have been calculated.

**Keywords:** vortex tube; computational experiment: OpenFOAM; MP-PIC; particles separation

*Received 03 July 2024; revised 14 August 2024; accepted 28 August 2024*

doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-60-66

## 1. Введение

Вихревые трубы известны с первой половины 20-го в. как устройство для разделения входящего воздушного потока на два потока с разными температурами [1]. Помимо разделения потока по температуре устройство также может использоваться для разделения жидкостей и газов, и очистки их от примесей [2]. Конструкция трубы включает в себя 4 входных патрубков, центральный канал, холодную и горячую диафрагмы, расположенные с противоположных концов трубы.

В представленной работе исследуется процесс удаления дисперсных частиц из канала вихревой трубы через горячую диафрагму при помощи вычислительных экспериментов в пакете OpenFOAM. Выбранный подход к моделированию процесса подразумевает использование подробной конечно-объемной вычислительной сетки. В исследовании [3] показана применимость сетки, подобной используемой в представленной работе. Сообщается о наличии сходимости численного решения, что говорит о возможности использования аналогичных сеток для моделирования процессов в вихревых трубах.

В работе [4] приводятся результаты вычислительных экспериментов с использованием прямого численного моделирования вихревого эффекта Ранка-Хилша. Показано, что метод позволяет получать качественно корректные результаты, однако требует существенных вычислительных ресурсов.

В [5] производится сравнение модели напряжений Рейнольдса и метода крупных вихрей с использованием подхода Эйлера-Лагранжа для моделирования турбулентных потоков с мелкодисперсными частицами с целью прогнозирования эффективности циклонного сепаратора. Показано, что вторая модель лучше описывает флуктуации скорости и эффективность сепарации

частиц из устройства. В работе [6] также производится моделирование процессов фильтрации с помощью вихревой трубы. Для описания поведения частиц предложено использование подхода Лагранжа. Экспериментальные и вычислительные исследования, описанные в статье, показывают применимость выбранного подхода. В работе [7] также показана возможность получения решения подобных задач при помощи выбранного метода. Авторы рассматривают применимость устройства для очистки несжимаемых жидкостей.

Авторы [8] описывают поведение частиц в турбулентных потоках при помощи подхода Эйлера-Лагранжа, реализованного в пакете ANSYS Fluent. Поскольку выбранная модель по умолчанию оценивает только усредненные потоки, для моделирования турбулентных флуктуаций в [8] добавлена стохастическая модель случайных блужданий. Сравнение с экспериментальными данными показало применимость описанного подхода для описания производительности гидроциклона.

Для построения представленной в работе модели использовался метод MP-PIC, использующий подход Эйлера для несущей фазы и подход Лагранжа для моделирования поведения частиц [9, 10]. Показаны результаты пяти серий вычислительных экспериментов с удалением из канала частиц различных плотностей. Описаны метод обработки результатов экспериментов и предложенная модель аппроксимации зависимости между плотностью частиц и временем, за которое они достигают противоположного конца трубы с горячей диафрагмой.

## 2. Постановка задачи

### 2.1. Расчетная область

Для вычислительных экспериментов подготовлена модель вихревой трубы длиной 0.12 м и диаметром 0.016 м. Геометрия трубы и использованная

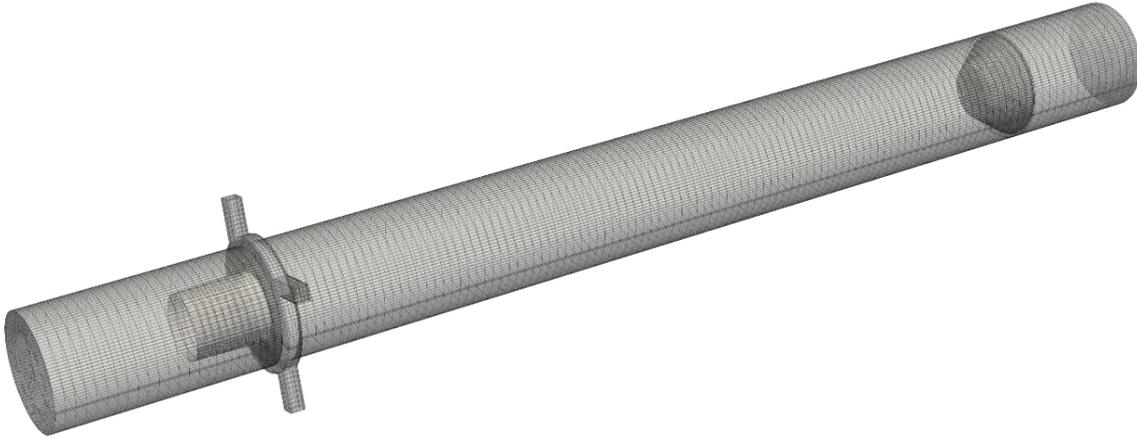


Рис. 1. Геометрия модели вихревой трубы и расчетная сетка

для расчетов сетка, состоящая из 177240 конечных объемов, приведена на рис. 1.

Начальное значение давления в трубе и вне нее составляет  $10^5$  Па, давление на входе –  $6.5 \cdot 10^5$  Па. Сферические частицы начинают равномерно добавляться в поток спустя 0.0015 с после начала расчета со скоростью 200000 частиц в секунду через каждый входной патрубок. Начальная скорость каждой частицы, направленная вдоль входных патрубков трубы, составляет 15 м/с. Частицы распределяются случайным образом по сечению границы патрубка. Пример начального положения частиц на входе для первой серии расчетов приведен на рис. 2.

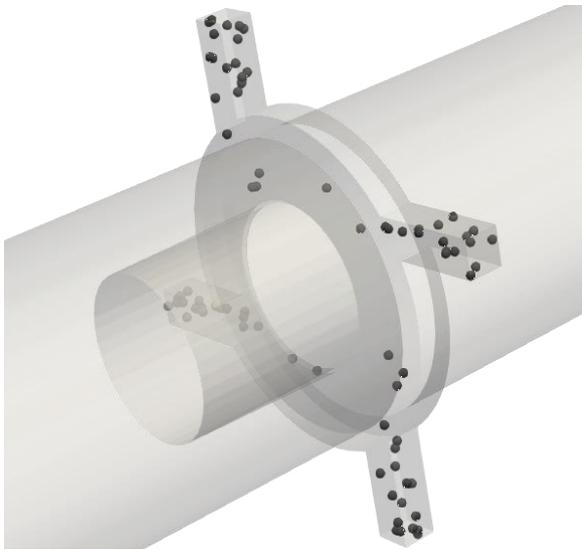


Рис. 2. Пример размещения частиц во входных патрубках вихревой трубы спустя 0.0001 с после добавления в патрубки

Плотность частиц варьируется от 1515.6 до 4925.7 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует плотностям различных строительных материалов (известняк, бетон и т. п.), диаметр частиц одинаков и составляет  $10^{-5}$  м (10 микрон). При расчетах используется воздух в качестве несущей фазы.

## 2.2. Математическая модель

Для решения описанной задачи используется метод МР-РС. В стандартной формулировке он включает в себя следующую систему уравнений для несущей фазы: уравнение неразрывности и моментов [11, 12]:

$$\rho_{(1)} \frac{\partial \alpha_{(1)}}{\partial t} + \rho_{(1)} \frac{\partial (\alpha_{(1)} v_{(1)i})}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_{(1)} \frac{\partial (\alpha_{(1)} v_{(1)j})}{\partial t} + \rho_{(1)} \frac{\partial (\alpha_{(1)} v_{(1)j} v_{(1)i})}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \alpha_{(1)} \rho_{(1)} g_j - F_{(2)j}, \quad (2)$$

где  $p$  – давление жидкости или газа;  $\rho_{(1)}$ ,  $\alpha_{(1)}$ ,  $v_{(1)i}$  – плотность несущей фазы, её объемная концентрация и  $i$ -й компонент скорости, соответственно;  $g_j$  – компоненты ускорения свободного падения;  $F_{(2)j}$  – сила межфазного взаимодействия. Индексы:  $i, j = 1, 2, 3$ .

Для несомой фазы записывается уравнение для функции распределения части  $f(x, v_{(2)}, m, t)$ , где  $x$ ,  $v_{(2)}$ ,  $m$  – координата, плотность и масса частицы, соответственно,  $t$  – момент времени. Изменение функции во времени описывается уравнением Лиувилля:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial v_{(2)i}}{\partial x_i} + \frac{\partial f A}{\partial v_{(2)i}} = 0, \quad (3)$$

где  $A$  – производная по времени от скорости частиц:

$$A = D(u_{(1)} - u_{(2)}) - \frac{1}{\rho_{(2)}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g - \frac{1}{\alpha \rho_{(2)}} \frac{\partial \tau}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho_{(2)}$  – плотность частицы;  $D = 3c_d \rho_{(1)} |u_{(1)} - u_{(2)}| / (8\rho_{(2)} R)$  – функция

переноса;  $C_d$  – коэффициент переноса;  $R$  – радиус частицы;  $\alpha$  – объемная концентрация частиц.

Объемная концентрация частиц получена из функции распределения:

$$\alpha_{cp} = \iint f \frac{m}{\rho_{(2)}} dm dv_{(2)}, \quad \alpha_{cp} + \alpha = 1. \quad (5)$$

Для замыкания системы используется уравнение межфазной передачи импульса:

$$F = \iint f_m \left[ D(v_{(1)} - v_{(2)}) - \frac{1}{\rho_{(2)}} \nabla p \right] dm dv_{(2)}. \quad (6)$$

Тензор изотропного напряжения  $\tau$  в модели может быть найден при помощи модели Харриса-Крайтона [13, 14]:

$$\tau = P_{(2)} \frac{\alpha^\beta}{\max(\alpha_{cp} - \alpha; \omega(1 - \alpha))}, \quad (7)$$

где  $P_{(2)} = 10$  Па – константа в единицах давления;  $\alpha_{cp} = 0.6$  – объемная концентрация частиц при плотной упаковке;  $\beta = 2$  – эмпирическая константа;  $\omega = 1 \cdot 10^{-7}$  – маленький коэффициент для обеспечения сходимости.

Для моделирования влияния турбулентности на поведение частиц используется стохастическая поправка, описанная в исследованиях [15, 16]. Предполагается, что турбулентность носит изотропный характер, и, следовательно, изменения скорости подчинены Гауссову распределению и могут быть смоделированы случайным образом. Стандартное отклонение этого распределения:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{2k}{3} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где  $k$  – турбулентная энергия. Таким образом, результирующая мгновенная скорость может быть получена из выражения:

$$\bar{u} = \bar{U} + \bar{u}', \quad (9)$$

где  $\bar{U}$  – средняя скорость флюида;  $\bar{u}'$  – колебания скорости частицы. Предполагается возможность существования двух вариантов поведения. В первом случае частица движется с малой скоростью относительно окружающей среды. Она остается внутри вихря на протяжении всего времени его существования  $t_e$ . Во втором случае частица успевает пересечь вихрь за счет наличия собственной скорости или проскальзывания за время  $t_R$ . В зависимости от поведения частиц время взаимодействия  $t_{int}$  может быть получено:

$$t_{int} = \min(t_e, t_R). \quad (10)$$

Здесь  $t_e$  – время существования вихря:

$$t_e = c \frac{k^{2/3}}{\varepsilon |\bar{u}'|}, \quad (11)$$

где  $c = 0.162$  – константа;  $\varepsilon$  – коэффициент. Время перемещения частицы  $t_R$  может быть найдено из выражения:

$$t_R = \frac{k}{\varepsilon}. \quad (12)$$

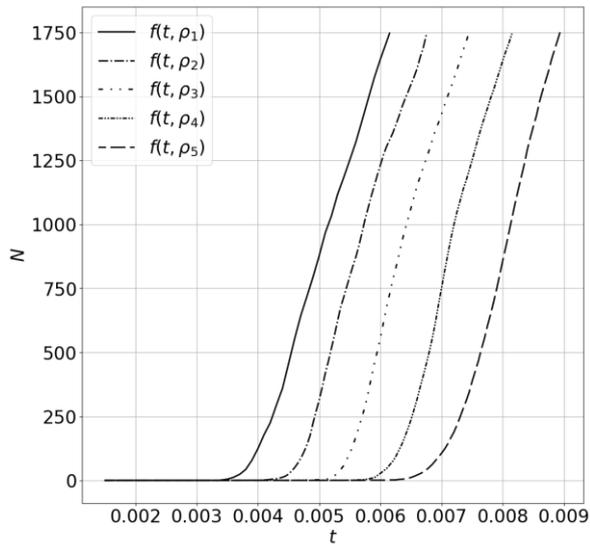
Приведенная система решается при помощи стандартного решателя *denseParticleFoam* пакета OpenFOAM [17], реализующего метод MP-PIC. Вычислительные эксперименты с использованием данного метода, представленные в предыдущих исследованиях [18], показали существенное влияние использования стохастической поправки на поведение частиц. Время одного расчета на приведенной ранее сетке составило приблизительно 14 ч.

### 3. Результаты работы и обсуждение

На основе описанной выше модели было проведено 5 серий расчетов для 19 различных плотностей гранулированной среды в диапазоне от 1515.6 кг/м<sup>3</sup> до 4925.7 кг/м<sup>3</sup>. В начальный момент времени распределение частиц случайно. Для оценки полученных результатов построим графики зависимости количества частиц разных плотностей, вылетевших через горячий выход вихревой трубы, от времени на примере одной серии расчетов для следующих плотностей:  $\rho_1 = 1515.6$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 2273.4$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 3031.2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_4 = 3789.0$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_5 = 4546.8$  кг/м<sup>3</sup> (рис 3). Плотности рассматривались с шагом 757.8 кг/м<sup>3</sup> от  $\rho_1$ . Из графиков можно увидеть, что после определенного момента времени количество вылетевших частиц линейно возрастает, при этом скорость вылета частиц из горячего совпадает для разных плотностей. При этом небольшая часть частиц покидает вихревую трубу через канал холодного выхода, однако они исключены из рассмотрения.

Для оценки скорости, с которой частицы достигают диафрагмы горячего выхода, построены линейные модели. Поскольку скорость вылета частиц приблизительно совпадает, в полученных моделях существенно отличаются коэффициенты  $b$  уравнения вида  $y=kx+b$ . Для описанных серий расчетов коэффициенты были получены двумя способами:

- 1) усреднением исходных результатов вычислительных экспериментов и последующим подбором коэффициента линейной регрессии для полученных кривых;
- 2) подбором коэффициента линейной регрессии для исходных кривых и последующим усреднением готовых коэффициентов.



**Рис. 3.** График зависимости количества частиц, вылетевших через горячий выход, от времени

Таким образом, в рамках первого способа линейная модель определяется следующей функцией:

$$f_1(t, \rho_i) = f \left( t, \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \rho_{ij} \right), \quad (13)$$

в рамках второго способа:

$$f_1(t, \rho_i) = \sum_{j=1}^N f \left( t, \frac{\rho_{ij}}{N} \right), \quad (14)$$

где индекс  $i=1..n$ ,  $n = 19$  – порядковый номер вычислительного эксперимента в зависимости от плотности, индекс  $j = 1..N$ ,  $N = 5$  – порядковый номер эксперимента в зависимости от начального распределения частиц на входах в трубу. Второй способ позволяет получить доверительные интервалы для серии экспериментов с одинаковой плотностью.

График зависимости коэффициентов, отвечающих за время начала вылета частиц из трубы, от плотности, приведен на рис. 4. Темными кругами и треугольниками обозначены измерения, полученные первым и вторым способом, соответственно. Для них подбирались аппроксимации  $g_m^k(\rho)$ , где индексы  $m = 1, 2$  обозначают способ обработки результатов,  $k = 1, 2$  – порядок аппроксимации. Светлыми кругами и треугольниками отмечены измерения, не участвовавшие в подборе параметров (тестовая выборка). Вертикальные линии отображают доверительные интервалы, полученные при помощи второго метода обработки результатов эксперимента. Разброс значений объясняется случайностью начального распределения частиц и малым количеством экспериментов. Из графика видно, что полученные аппроксимации хорошо экстраполируются на следующие значения: 1515.6, 1768.2, 4546.8, 4799.4 и 4925.7 кг/м<sup>3</sup>.

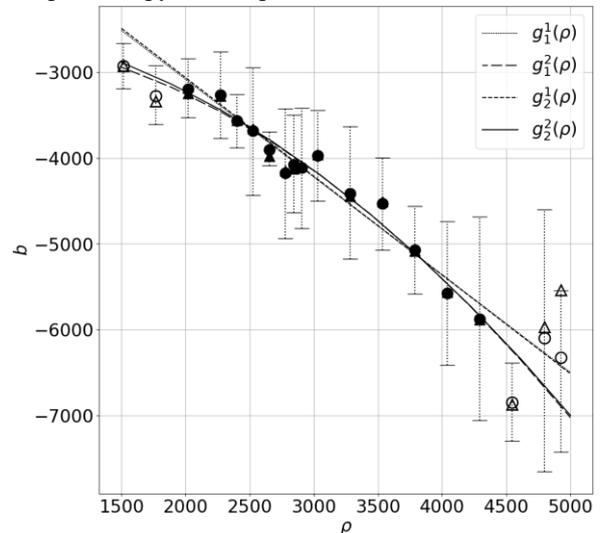
Минимальная средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error (MAPE)) получена при помощи аппроксимации второго порядка. Результаты приведены в таблице.

Значения минимальной абсолютной ошибки

Способ обработки результатов	MAPE (обучающая выборка)	MAPE (тестовая выборка)
1	10.64%	6.89%
2	2.59%	2.62%

#### 4. Выводы

В представленной работе проведен анализ результатов, полученных на основе серии расчетов с использованием частиц микронного размера, которые подаются в канал трубы Ранка-Хилша вместе с потоком воздуха. Представлен анализ поведения частиц в зависимости от их плотности. Показан способ обработки результатов серий вычислительных экспериментов. На основе исследования скорости, с которой мелкие частицы достигают диафрагмы горячего выхода, предложено использование аппроксимирующей кривой второго порядка для определения времени начала стратификации частиц из канала вихревой трубы. Приведена средняя абсолютная ошибка для выбранных аппроксимирующих кривых.



**Рис. 4.** График зависимости усредненных коэффициентов  $b$  от плотности частиц

Величина доверительных интервалов может быть объяснена малым количеством вычислительных экспериментов для каждой плотности, а также случайностью начального распределения. Помимо этого, следует отметить, что использованная реализация метода является экспериментальной и требует дальнейшей доработки.

Допущение о равномерном распределении входного потока сферических частиц одинакового размера является достаточно сильным и вряд ли

реализуемо на практике. Поэтому полученные результаты следует считать модельными, описывающими реальный процесс лишь на качественном уровне.

### Список литературы

1. *Ranque G. J.* Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air // *Journal de Physique et Le Radium*. 1933. Vol. 4. P. 112–114.
2. *Коркодинов Я. А., Хурматуллин О. Г.* Применение эффекта Ранка-Хильша // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. 2012. № 4. С. 12.
3. *Михайленко К. И.* Исследование вычислительных сеток для моделирования динамики воздуха в канале вихревой трубы средствами пакета OpenFOAM // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2022. Т. 15. № 1. С. 56–66. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.1.5.
4. *Марьин Д. Ф., Михайленко К. И., Хазиев Л. Х.* Прямое численное моделирование эффекта Ранка // *Параллельные вычислительные технологии (PaVT'2011): тр. междунар. науч. конф., Москва, 28 марта–01 апреля 2011 г.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 539–547.
5. *Wang B., Xu D. L., Chu K. W., Yu A. B.* Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator // *Applied Mathematical Modelling*. 2006. Vol. 30. № 11. P. 1326–1342. DOI: 10.1016/j.apm.2006.03.011.
6. *Dziubak T., Bakala L., Karczewski M., Tomaszewski M.* Numerical research on vortex tube separator for special vehicle engine inlet air filter // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 237, 116463. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116463.
7. *Balmer R. T.* Pressure-driven Ranque–Hilsch temperature separation in liquids // *Journal of Fluids Engineering*. 1988. Vol. 110 (2). P. 161–164. DOI: 10.1115/1.3243529.
8. *Haig C. W., Hursthouse A., Sykes D., Mcilwain S.* The rapid development of small-scale cyclones – numerical modelling versus empirical models // *Applied Mathematical Modelling*. 2016. Vol. 40. № 11–12. P. 6082–6104. DOI: 10.1016/j.apm.2016.01.028.
9. *Guo X., Liu B., Zhang B., Shan Y.* Analysis on the patterns of precessing frequency characteristics and energy separation processes in a Ranque–Hilsch vortex tube // *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. P. 168 DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107067.
10. *Parker M. J., Straatman A. G.* Experimental study on the impact of pressure ratio on temperature drop in a Ranque–Hilsch vortex tube // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 189, 116653. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116653.
11. *Snider D. M.* An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows // *Journal of Computational Physics*. 2001. Vol. 170. P. 523–549. DOI: 10.1006/jcph.2001.6747
12. *Wargadalam V. J., Andira M A., Putra C. A., Siswantara A. I., Gunadi, Hariyotejo, Damis C., Aminuddin.* Numerical simulation of a small-scale cyclone separator using MP-PIC method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 694. P. 1–11. DOI: 10.1088/1757-99X/694/1/012015
13. *Caliskan U., Miskovic S.* A chimera approach for MP-PIC simulations of dense particulate flows using large parcel size relative to the computational cell size // *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021. Vol. 5. DOI: 10.1016/j.cej.2020.100054
14. *Lu S., Tan J. Z. Y., Maroto-Valer M. M.* Investigation of CO<sub>2</sub> photoreduction in an annular fluidized bed photoreactor by MP-PIC simulation // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. Vol. 61 (8). P. 3123–3136. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04035
15. *Gosman A., Ioannises E.* Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors // *19th Aerospace Sciences Meeting*. 1981. DOI: 10.2514/3.62687
16. *Gorokhovski M. A., Oruganti S. K.* Stochastic models for the droplet motion and evaporation in under-resolved turbulent flows at a large Reynolds number // *Journal of Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 932, A18. DOI: 10.1017/jfm.2021.916
17. The OpenFOAM Foundation (Электронный ресурс). URL: <https://openfoam.org>. (дата обращения 03.07.2024).
18. *Баширова К. И., Михайленко К. И.* Моделирование процесса сепарации дисперсной фазы в вихревой трубе // *Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения. сборник тезисов*. 2023. С. 18.

### References

1. Ranque G. J. Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air. *Journal de Physique et Le Radium*, 1933, vol 4, pp. 112–114.
2. Korkodinov I. A., Khurmatullin O. G. The application of Ranque–Hilsh effect. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2012, vol . 4, pp. 12. (In Russian).
3. Mikhaylenko C. I. Investigation of computational meshes for modeling the air dynamics in a vortex tube channel by OpenFOAM software. *Computational Continuum Mechanics*, 2022, vol . 15, no 1, pp. 56–66. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.1.5. (In Russian).
4. Marin D. F., Mikhaylenko C. I., Khaziev L. H. Direct numerical simulation of the Ranque effect. *Parallel computing technologies (PaVT'2011)*, 28

- March-1 April 2011, Moscow. South Ural State University, 2011, pp. 539-547. (In Russian).
5. Wang B., Xu D. L., Chu K. W., Yu A. B. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, no. 11, pp. 1326–1342. DOI: 10.1016/j.apm.2006.03.011.
  6. Dziubak T., Bakala L., Karczewski M., Tomaszewski M. Numerical research on vortex tube separator for special vehicle engine inlet air filter. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 237, 116463. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116463.
  7. Balmer R. T. Pressure-driven Ranque–Hilsch temperature separation in liquids. *Journal of Fluids Engineering*, 1988, vol. 110 (2), pp. 161–164. DOI: 10.1115/1.3243529
  8. Haig C. W., Hursthouse A., Sykes D., Mcilwain S. The rapid development of small-scale cyclones – numerical modelling versus empirical models. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, vol. 40, no 11–12, pp. 6082–6104. DOI: 10.1016/j.apm.2016.01.028.
  9. Guo X., Liu B., Zhang B., Shan Y. Analysis on the patterns of precessing frequency characteristics and energy separation processes in a Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, p. 168. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107067.
  10. Parker M. J., Straatman A. G. Experimental study on the impact of pressure ratio on temperature drop in a Ranque–Hilsch vortex tube. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 189, 116653. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116653.
  11. Snider D. M. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows. *Journal of Computational Physics*, 2001, vol. 170, pp. 523–549. DOI: 10.1006/jcph.2001.6747
  12. Wargadalam V. J., Andira M. A., Putra C. A., Siswantara A. I., Gunadi G. G., Hariyotejo, Damis C., Aminuddin. Numerical simulation of a small-scale cyclone separator using MP-PIC method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 694, pp. 1–11. DOI: 10.1088/1757-899X/694/1/012015
  13. Caliskan U., Miskovic S. A chimera approach for MP-PIC simulations of dense particulate flows using large parcel size relative to the computational cell size. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2021, vol. 5. DOI: 10.1016/j.cej.2020.100054
  14. Lu S., Tan J. Z. Y., Maroto-Valer M. M. Investigation of CO<sub>2</sub> photoreduction in an annular fluidized bed photoreactor by MP-PIC simulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, vol. 61 (8), pp. 3123–3136. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04035
  15. Gosman A., Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors, *19th Aerospace Sciences Meeting*, 1981. DOI: 10.2514/3.62687
  16. Gorokhovski M. A., Oruganti S. K. Stochastic models for the droplet motion and evaporation in under-resolved turbulent flows at a large Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 932, A18. DOI: 10.1017/jfm.2021.916
  17. The OpenFOAM Foundation (Electronic resource). URL: <https://openfoam.org>. (Date access: 03 July 2024).
  18. Bashirova K. I., Mikhaylenko C. I. Numerical investigation of the separation process of the dispersed phase in a vortex tube. *Proc. of Third International Summer Conference Physicochemical Hydrodynamics: models and applications*, 2023, p. 18. (In Russian).

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Баширова К. И., Михайленко К. И. Метод оценки времени нахождения дисперсных частиц в канале противоточной вихревой трубы. *Физика*. 2024. № 3. С. 60–66. doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-60-66

**Please cite this article in English as:**

Bashirova K.I., Mikhaylenko C.I. A method for estimating the residence time of dispersed particles in the channel of a countercurrent vortex tube. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 3, pp. 60–66. doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-60-66

**Сведения об авторах**

1. *Баширова Карина Ильдаровна*, аспирант., Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Проспект Октября, д. 71, 450054.
2. *Михайленко Константин Иванович*, канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. научный сотрудник, Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Проспект Октября, д. 71, 450054.

**Author information**

1. *Karina I. Bashirova*, Postgraduate Student, Mavlyutov Institute of Mechanics of the Ufa Federal Research Centre RAS; 71, prospekt Oktyabrya, Ufa, 450054, Russia.
2. *Constantin I. Mikhaylenko*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Mavlyutov Institute of Mechanics of the Ufa Federal Research Centre RAS; 71, prospekt Oktyabrya, Ufa, 450054, Russia.