



ISSN: 2658–5782

Номер 1

Январь–Март 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Влияние длины канала вихревой трубы на температурное разделение воздуха¹

Адиуллин Б.Р.^{*,**}, Михайленко К.И.^{**}

^{*}Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

^{**}Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

На основе подготовленной модели противоточной вихревой трубы с четырьмя входными патрубками исследуется влияние длины канала вихревой трубы на выработку холодного и горячего воздуха. При моделировании использовались стандартные уравнения газовой динамики, включающие в себя уравнения неразрывности, сохранения моментов импульсов, полной энергии, состояния идеального газа. Для учета турбулентных эффектов выбрана $k - \varepsilon$ модель турбулентности. Вычислительные эксперименты проводились в пакете OpenFOAM с использованием решателя sonicFoam. Подготовленная сетка позволила провести моделирование вихревых труб с длиной основного канала, варьирующейся от 20 до 70 см. Все расчеты проводились при одинаковых граничных условиях с постоянным давлением на входах и атмосферным давлением на горячем и холодном выходах. Построенная модель адекватно воспроизводит двухвихревую структуру потоков воздуха в вихревой трубе. Для получения и обработки результатов использовались утилиты OpenFOAM и скрипт, реализующий алгоритм осреднения значений на выходах трубы, написанный на языке Python. Получены результаты по температурам и массовым расходам воздуха в холодных и горячих выходах вихревой трубы в зависимости от длины устройства. По результатам анализа полученных данных, было показано, что увеличение длины канала вихревой трубы значительно увеличивает выработку холодного воздуха при некотором росте его температуры. Было также отмечено увеличение температуры получаемого горячего воздуха при увеличении длины вихревой трубы.

Ключевые слова: вихревая труба, температурное разделение, OpenFOAM, вычислительный эксперимент, турбулентность, $k - \varepsilon$ модель

1. Введение

Вихревая труба — устройство, которое генерирует холодный поток без каких-либо движущихся частей — впервые описана Жоржем Ранком в 1933 году [1]. Позже, после публикации Рудольфа Хилша в 1946 году, данный тип труб получил свое имя и стал объектом теоретических и практических исследований [2]. В силу своего крайне простого

устройства вихревая труба нашла множество применений: от сепараторов для охлаждающих смесей и производства электроэнергии [3] до холодильного оборудования в лабораториях, работающих со взрывчатыми веществами [4]. Также труба нашла применение как устройство контроля температуры воздуха для дайверов и на обитаемых подводных станциях; для регулирования температуры гипербарических камер [5]; разделения частиц и отработанного газа в промышленности [6]; охлаждения спектроскопов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [7] и ядерных реакторов [4]; обезвоживания газа [8]. Также, при определенных условиях, эффект температурного разделения может наблюдаться не только в газе, но и в жидкости [9].

¹Работа выполнена с использованием средств государственного бюджета по госзаданию на 2019–2022 годы (№246-2019-00520).

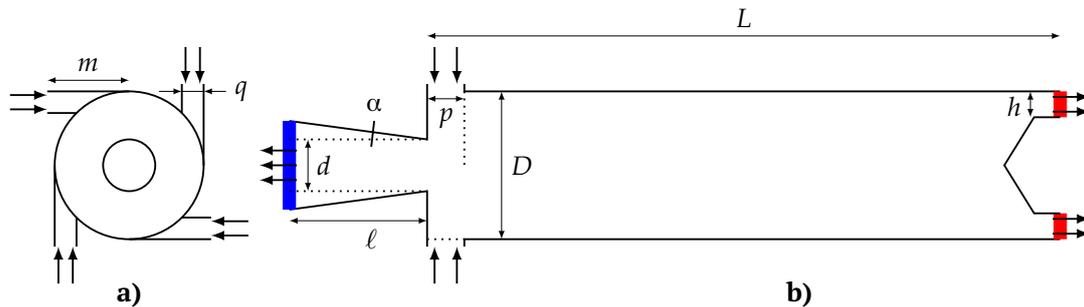


Рис. 1. Схема вихревой трубы и геометрические параметры ((a) — вид со стороны холодного выхода; (b) — разрез вдоль трубы). Синим и красным цветом обозначены холодный и горячий выходы соответственно

К текущему моменту опубликовано значительное количество работ, основанных на результатах экспериментальных и теоретических исследований эффекта Ранка–Хилша (см. обзоры [10–12]). Надо сказать, что во многих работах, посвященных эффекту Ранка–Хилша, отмечается, что еще никому не удалось создать теорию, которая бы могла достаточно полно описать это явление. Более того, не существует общепризнанного мнения о причинах возникновения в трубе температурного разделения потока. Именно поэтому вплоть до настоящего времени в описанном направлении ведутся как теоретические, так и экспериментальные исследования.

В то время, как экспериментальные исследования концентрируются в основном на различных геометрических параметрах вихревых труб [13], теоретические исследования рассматривают вопрос более подробно и полно. Большая часть исследователей изучает влияние сжимаемости, напряжения сдвига и турбулентных пульсаций как причину возникновения эффекта Ранка–Хилша. С другой стороны, немало работ посвящено влиянию акустических эффектов, которые возникают в вихревой трубе [14]. Кроме того, в сравнительно недавних работах высказывается мнение, что немаловажную роль играют более тонкие эффекты, связанные, например, с анализом производства локальной энтропии [15].

В силу того, что не существует единой теории, которая описывала и объясняла бы принцип, по которому данный эффект существует, возникают большие трудности с формированием эффективных систем, использующих эффект Ранка–Хилша. Этим обусловлена необходимость продолжения исследований в этом направлении. В настоящей статье описывается выявленная в результате вычислительного эксперимента зависимость температурного разделения воздуха от длины основной части

вихревой трубы. Для решения этой задачи использовалось программное обеспечение для компьютерного моделирования задач механики сплошных сред — OpenFOAM.

2. Модель и методы

2.1. Геометрия трубы

В статье приводится результат компьютерного моделирования противоточной вихревой трубы. Это такая конфигурация вихревой трубы, где холодные и горячие выходы расположены на противоположных концах трубы. Схема рассматриваемой вихревой трубы показана на рис. 1, для наглядности холодный и горячий выходы отмечены соответственно синим и красным цветом. Геометрия задается только с одним изменяемым параметром, связанным с длиной трубы L . Все остальные размеры (длина ℓ и угол расширения α сопла с холодным выходом; диаметр D ; диаметр сопла с холодным выходом d ; размеры на входе p , q и m ; ширина горячего выхода h) фиксированы.

2.2. Математическая модель

Газовая динамика в канале вихревой трубы описывается на основе стандартной системы уравнений, а именно уравнениями:

- неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U}) = 0;$$

- сохранения моментов импульсов

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau};$$

- полной энергии

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} E) = -\nabla p \mathbf{U} + \nabla(\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{U});$$

Система уравнений замыкается уравнением состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1)\rho e.$$

В уравнениях импульса и энергии вводятся вязкие члены для расчетов с использованием модели турбулентности $k - \varepsilon$.

Здесь мы используем стандартные обозначения: \mathbf{U} — вектор скорости; ρ — плотность; p — давление; E — удельная полная энергия; e — удельная внутренняя энергия; γ — показатель адиабаты; $\boldsymbol{\tau}$ — тензор вязких напряжений, элементы которого вычисляются как

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right],$$

где δ_{ij} — символ Кронекера; v_i — компоненты вектора скорости; μ — вязкость среды; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ — турбулентная вязкость, рассчитанная по модели турбулентности $k - \varepsilon$:

- уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) - \frac{2}{3} \rho (\nabla \cdot \mathbf{U}) k - \rho \varepsilon,$$

- уравнение турбулентного рассеивания

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) - \frac{2}{3} C_{1\rho} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \varepsilon - C_{2\rho} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ — эмпирические коэффициенты модели.

2.3. Алгоритмы и ПО

Расчеты проводились в программном обеспечении OpenFOAM с использованием решателя sonicFoam. Большое внимание уделялось подготовке равномерной ортогонализированной конечно-разностной сетки. Такой подход позволил увеличить шаг по времени без значительного роста ошибки.

Была построена трехмерная конечно-разностная сетка. При подготовке сетки учитывались особенности цилиндрической конфигурации области и возможное влияние сетки на результаты расчетов, поэтому качество сетки было специально обеспечено [16].

Для снижения влияния турбулентных пульсаций на результат авторами проводились два действия по осреднению полученных значений. На первом шаге проводилось осреднение по сечению. Для этого соответствующее сечение разбивается

на иррегулярные подобласти утилитой surfaceCut и вычисляется среднее значение физической величины для полной площади. На втором шаге средние по площади значения на нескольких последовательных шагах по времени осредняются за период времени. Используемые для осреднения пространственные сечения определяются геометрией расчетной области. Реализация этого алгоритма была осуществлена в скрипте на языке программирования Python.

3. Результаты и обсуждение

Моделируемая вихревая труба имеет следующие размеры соответственно (см. рис. 1): $D = 4.7$ см; $d = 0.9$ см; $p = 1$ см; $q = 0.7$ см; $m = 1.8$ см; $h = 0.4$ см; $\ell = 2.5$ см; $\alpha = 3^\circ$. Длина вихревой трубы L варьируется в диапазоне от 20 см до 70 см.

При численном моделировании в начальный момент времени использовались исходные данные, имитирующие нормальные условия: давление в области является однородным и равным атмосферному давлению (10^5 Па); температура по всей области равна комнатной температуре (300 К); газ (воздух) стационарен ($|\mathbf{U}| = 0$ м/с). В расчетах использованы граничные условия, характерные для работающей вихревой трубы. Входящий газ подается при комнатной температуре (300 К) и при высоком давлении ($p \sim 4 \cdot 10^5$ Па). На выходе устанавливается атмосферное давление (10^5 Па), а для температуры и скорости задается условие протекания. На стенках труб устанавливается условие адгезии, стенки теплоизолированы.

Аналогичные геометрические параметры, начальные и граничные условия применялись в работах [17, 18].

В рассматриваемой модели, используя выбранный решатель, адекватно отображается стандартная двухвихревая структура с противонаправленными центральным и периферийным вихрями (рис. 2).

Для всех исследованных длин канала вихревой трубы рассчитывались поля давления, скорости и температуры. Вычислялись значения указанных величин в сечениях холодного и горячего выходов. Для этого использовался алгоритм, описанный в разделе 2.3. Осреднение по времени для всех расчетов проводилось в одинаковые моменты таким образом, что фиксировались значения физических величин в диапазоне $t = 0.07 \dots 0.1$ с. К указанным временам течение устанавливалось и турбулентные пульсации измеряемых величин изменялись вокруг некоторого искомого среднего значения.

Оценка массового расхода проводилась исходя из модуля средней скорости в соответствующем

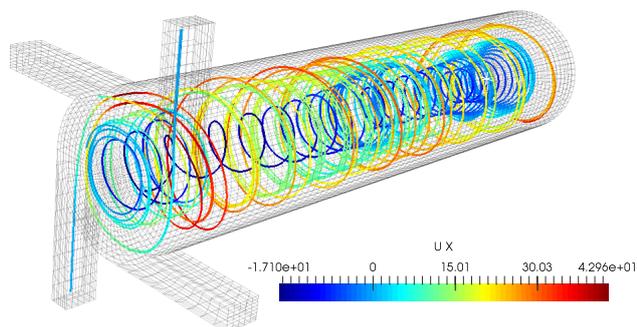


Рис. 2. Структура линий тока, цвет линий определяется компонентом U_x вектора скорости

сечения и вычисленной по уравнению состояния плотности воздуха.

На рис. 3 приведены графики, описывающие значения температуры и массового расхода воздуха в сечении выхода холодного сопла вихревой трубы. Для данных графиков можно наблюдать сходящийся монотонный рост значений T и Q . Однако следует отметить, что смысл указанного роста существенно различается. Так рост относительной температуры воздуха на холодном выходе в сравнении со значением $T = 300$ К подаваемого воздуха, составляет лишь 0.2% на всём измеренном диапазоне длин канала вихревой трубы. В то же время, относительное увеличение массового расхода превышает 7%. Таким образом, в рамках рассмотренных значений, рост длины канала вихревой трубы приводит к увеличению производства холодного воздуха при незначительном росте его температуры.

На рис. 4 приведены графики, описывающие значения температуры и массового расхода воздуха в кольцевом сечении горячего выхода вихревой трубы. На данных графиках следует отметить два конкурирующих процесса. Так, массовый расход воздуха через горячий выход вихревой трубы значительно падает с ростом длины канала. В рассмотренном диапазоне длин наблюдается трехкратное падение расхода от его исходного значения, сопровождаемое ростом температуры.

Кроме значительного уменьшения расхода также следует обратить внимание на значительное увеличение температуры воздуха. Таким образом, для горячего выхода увеличение длины канала вихревой трубы характеризуется значительным сокращением производства горячего воздуха, сопряженного с ростом его температуры.

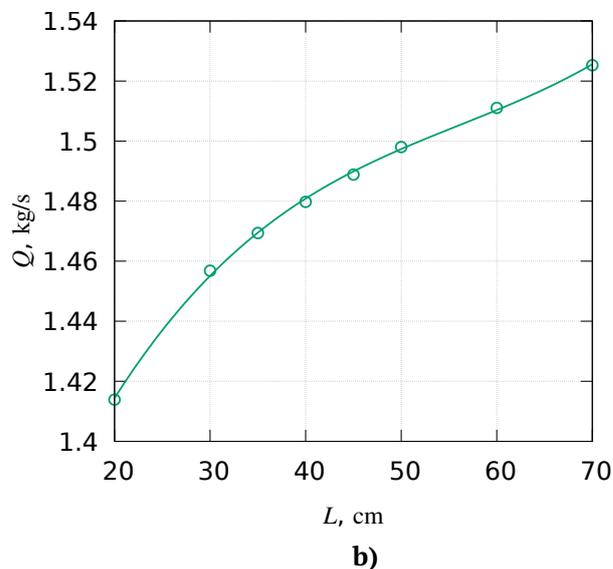
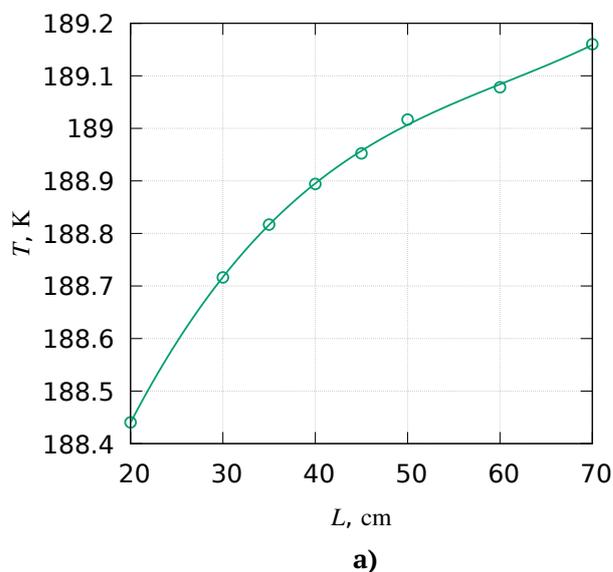
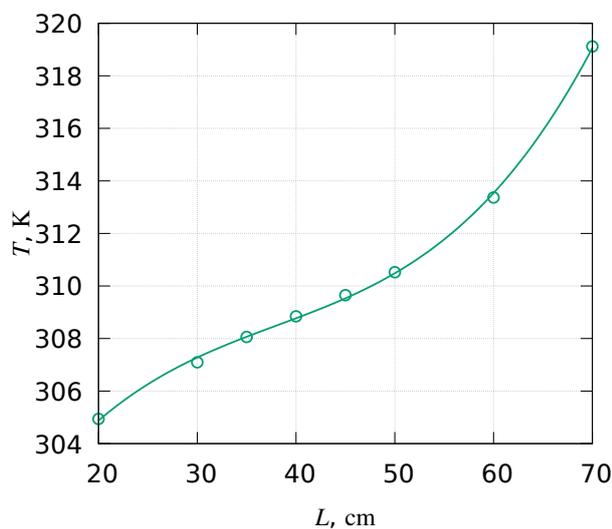
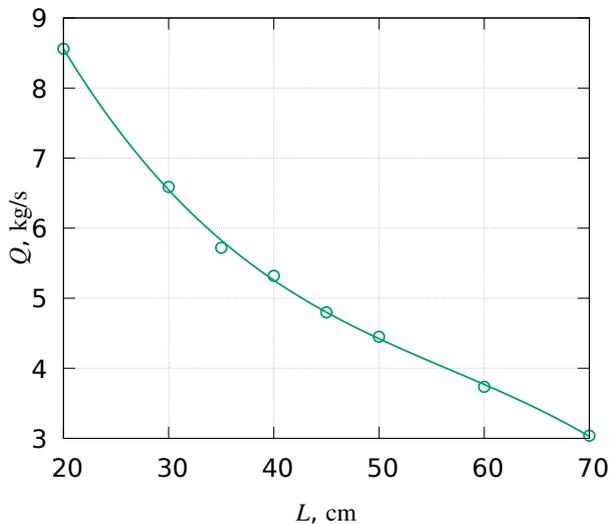


Рис. 3. Зависимости средней температуры T (a) и массового расхода воздуха Q (b) от длины канала вихревой трубы L для сечения холодного выхода



a)



b)

Рис. 4. Зависимости средней температуры T (а) и массового расхода воздуха Q (б) от длины канала вихревой трубы L для сечения горячего выхода

4. Заключение

В работе показаны зависимости температур и расходов выходящего горячего и холодного воздуха для вихревых труб, конфигурация которых отличается лишь длиной основной части трубы. Авторами отмечены две ярко выраженных зависимости от длины трубы. Так, можно наблюдать перераспределение температуры выходящего воздуха в пользу горячей составляющей с увеличением длины трубы. Однако, с другой стороны, рост длины трубы сопровождается увеличением гидродинамического сопротивления. Поэтому одновременно с некоторым ростом температуры горячего воздуха резко сокращается его массовый расход.

И наоборот, для холодного выхода рост длины канала вихревой трубы означает значительное увеличение производства холодного воздуха при некотором увеличении его температуры.

Список литературы

- [1] Ranque G.J. Experiments on expansion a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air // J. Phys. Radium. 1933. V. 4. Pp. 112–114 (in French).
- [2] Hilsch R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process // Review of Scientific Instruments. 1947. V. 18. Pp. 108–113.
DOI: 10.1063/1.1740893
- [3] Финько В.Е. Особенности охлаждения и сжижения газа в вихревом потоке // Журнал техн. физики. 1983. Т. 53, № 9. С. 1770–1776.
- [4] Bruno T.J. Applications of the vortex tube in chemical analysis // Process Control Qual. 1992. V. 3. Pp. 195–207.
- [5] Baz A., Gilheany J., Kalvitas A. Feasibility of vortex tube assisted environmental control of an underwater research habitat // Ocean Eng. 1988. V. 15, No. 1. Pp. 33–54.
DOI: 10.1016/0029-8018(88)90018-2
- [6] Riu K.-J.; Kim J., Choi I.-S. Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube // JSME Int. J. Series B Fluids and Thermal Engineering. 2004. V. 47, No. 1. Pp. 29–36.
DOI: 10.1299/jsmeb.47.29
- [7] Martin R.W., Zilm K.W. Variable temperature system using vortex tube cooling and fiber optic temperature measurement for low temperature magic angle spinning NMR // J. Magn. Reson. 2004. V. 168, No. 2. Pp. 202–209.
DOI: 10.1016/j.jmr.2004.03.002
- [8] Kumar A., Vivekanand, Subudhi S. Cooling and dehumidification using vortex tube // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 122. Pp. 181–193.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.015
- [9] Balmer R.T. Pressure-Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids // J. Fluids Eng. 1988. V. 110, No. 2. Pp. 161–164.
- [10] Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. 1997. Т. 167, № 6. С. 665–687.
DOI: 10.1070/PU1997v040n06ABEH000248
- [11] Eiamsa-Ard S., Promvong P. Review of Ranque-Hilsch effects on vortex tubes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. V. 1. Pp. 1822–1842.
DOI: 10.1016/j.rser.2007.03.006

- [12] Subudhi S., Sen M. Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 52. Pp. 172–178.
DOI: [10.1016/j.rser.2015.07.103](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.103)
- [13] Valipour M.S., Niazi N. Experimental modeling of a curved Ranque–Hilsch vortex tube refrigerator // *Int. J. of Refrigeration*. 2011. V. 34, No. 4. Pp. 1109–1116.
DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013)
- [14] Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. V. 34, No. 8. Pp. 1367–1374.
DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010)
- [15] Khait A., Noskov A., Alekhin V., Bianco V. Analysis of the local entropy generation in a double-circuit vortex tube // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 130. Pp. 1391–1403.
DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2017.11.136](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.136)
- [16] Михайленко К.И. К моделированию вихревой трубы: подготовка гексагональной сетки для вычислительных экспериментов в среде OpenFOAM // *Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН*. 2016. Т. 11, № 1. С. 112–118.
DOI: [10.21662/uim2016.1.017](https://doi.org/10.21662/uim2016.1.017)
- [17] Ронжин Р.П., Михайленко К.И. О зависимости производства холодного воздуха от размера площади горячего выхода вихревой трубы // *Многофазные системы*. 2018. Т. 13, № 3. С. 29–35.
DOI: [10.21662/mfs2018.3.004](https://doi.org/10.21662/mfs2018.3.004)
- [18] Борисоглебский И.К., Метусова М.В., Михайленко К.И. Зависимость эффекта Ранка–Хилша от геометрии холодного выхода // *Многофазные системы*. 2018. Т. 13, № 3. С. 52–58.
DOI: [10.21662/mfs2018.3.008](https://doi.org/10.21662/mfs2018.3.008)



The influence of the vortex tube channel length on the separation of air by its temperature

Adiullin B.R.^{***}, Mikhaylenko C.I.^{**}

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa

**Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa

Based on the prepared counterflow vortex tube model with four inlets, the effect of the length of the vortex tube channel on the generation of cold and hot air is investigated. In the simulation were used standard equations of gas dynamics, which include the equations of continuity, conservation of momentum, total energy, and the state of an ideal gas. To consider turbulent effects was chosen a $k - \epsilon$ turbulence model. Computational experiments were carried out in the OpenFOAM software using the sonicFoam solver. The prepared grid allowed modeling vortex tubes with the main channel length varying from 20 to 70 cm. All calculations were carried out under the same boundary conditions with constant pressure at the inlets and atmospheric pressure at the hot and cold outlets. The constructed model adequately reproduces the two-vortex structure of the air flow in the vortex tube. To obtain and process the results were used OpenFOAM utilities and a script implementing the algorithm for averaging the values at the tube outlets written in Python. The results were obtained on the temperatures and mass flow rates of air in cold and hot outlets of the vortex tube depending on the length of the device. According to the analysis of the obtained data, it was shown that increasing the length of the channel of the vortex tube significantly increases the production of cold air with a certain increase in its temperature. An increase in the temperature of the produced hot air with an increase in the length of the vortex tube was also noted.

Keywords: vortex tube, temperature separation, OpenFOAM, computational experiment, turbulence, $k - \epsilon$ model

References

- [1] Ranque G.J. Experiments on expansion a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air // *J. Phys. Radium*. 1933. V. 4. Pp. 112–114 (in French).
- [2] Hilsch R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process // *Review of Scientific Instruments*. 1947. V. 18. Pp. 108–113.
DOI: 10.1063/1.1740893
- [3] Finko V.E. Cooling and condensation of a gas in a vortex flow // *Soviet Physics Technical Physics*. 1983. V. 28, No. 9. Pp. 1089–1093.
- [4] Bruno T.J. Applications of the vortex tube in chemical analysis // *Process Control Qual.* 1992. V. 3. Pp. 195–207.
- [5] Baz A., Gilheany J., Kalvitas A. Feasibility of vortex tube assisted environmental control of an underwater research habitat // *Ocean Eng.* 1988. V. 15, No. 1. Pp. 33–54.
DOI: 10.1016/0029-8018(88)90018-2
- [6] Riu K.-J.; Kim J., Choi I.-S. Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube // *JSME Int. J. Series B Fluids and Thermal Engineering*. 2004. V. 47, No. 1. Pp. 29–36.
DOI: 10.1299/jsmeb.47.29
- [7] Martin R.W., Zilm K.W. Variable temperature system using vortex tube cooling and fiber optic temperature measurement for low temperature magic angle spinning NMR // *J. Magn. Reson.* 2004. V. 168, No. 2. Pp. 202–209.
DOI: 10.1016/j.jmr.2004.03.002
- [8] Kumar A., Vivekanand, Subudhi S. Cooling and dehumidification using vortex tube // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 122. Pp. 181–193.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.015
- [9] Balmer R.T. Pressure-Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids // *J. Fluids Eng.* 1988. V. 110, No. 2. Pp. 161–164.
- [10] Gutsol A.F. The Ranque effect // *Physics-Uspekhi*. 1997. V. 40. Pp. 639–658. DOI: 10.1070/PU1997v040n06ABEH000248
- [11] Eiamsa-Ard S., Promvong P. Review of Ranque-Hilsch effects on vortex tubes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 1. Pp. 1822–1842.
DOI: 10.1016/j.rser.2007.03.006
- [12] Subudhi S., Sen M. Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 52. Pp. 172–178.
DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.103

- [13] Valipour M.S., Niazi N. Experimental modeling of a curved Ranque–Hilsch vortex tube refrigerator // *Int. J. of Refrigeration*. 2011. V. 34, No. 4. Pp. 1109–1116. DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013)
- [14] Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. V. 34, No. 8. Pp. 1367–1374. DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010)
- [15] Khait A., Noskov A., Alekhin V., Bianco V. Analysis of the local entropy generation in a double-circuit vortex tube // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 130. Pp. 1391–1403. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2017.11.136](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.136)
- [16] Mikhaylenko C.I. Simulation of the vortex tube: design of a hexagonal mesh for computational experiments in OpenFOAM // *Proc. of Mavlyutov Institute of Mechanics*. 2016. V. 11, No. 1. Pp. 112–118 (in russian). DOI: [10.21662/uim2016.1.017](https://doi.org/10.21662/uim2016.1.017)
- [17] Ronzhin R.P., Mikhaylenko C.I. On the dependence of a cold air production on the size of a hot air output area of the vortex tube // *Multiphase Systems*. 2018. V. 13, No. 3. Pp. 29–35 (in russian). DOI: [10.21662/mfs2018.3.004](https://doi.org/10.21662/mfs2018.3.004)
- [18] Borisoglebskiy I.K., Metusova M.V., Mikhaylenko C.I. The dependence of the Ranque–Hilsch effect on the cold outlet geometry // *Multiphase Systems*. 2018. V. 13, No. 3. Pp. 52–58 (in russian). DOI: [10.21662/mfs2018.3.008](https://doi.org/10.21662/mfs2018.3.008)