



ISSN: 2658-5782

Номер 3

Июль-Сентябрь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Воздействие дополнительной точки вдува, расположенной со стороны горячего выхода, на производительность вихревой трубы¹

Привалов Л.Ю.* , Михайленко К.И.**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

**Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

На основе численного моделирования изучается выход холодного и горячего воздуха из модифицированной противоточной вихревой трубы. Особенностью исследуемой модификации является дополнительная область подачи воздуха по оси трубы со стороны горячего выхода. Дополнительная точка вдува воздуха призвана перераспределить потоки газа на холодном и горячем выходах. Вычислительные эксперименты проведены в программном пакете OpenFOAM с использованием решателя sonicFoam на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности в предположении идеального газа. Исследовалась зависимость расхода и температуры воздуха на холодном и горячем выходах для разных длин основного канала вихревой трубы. Для всех рассматриваемых длин трубы были подготовлены конечно-объемные сетки, в которых соблюдалась предпочтительно прямоугольная форма ячеек и удалось избежать их чрезмерного растяжения. Для ускорения расчетов использовалась технология MPI; пространственная декомпозиция исходной сетки производилась утилитой decomposePar на равные части вдоль трубы. Такой подход позволил уменьшить время вычислений приблизительно в 3.5 раза при запуске на шести процессах. Результаты параллельного моделирования объединялись утилитой reconstructPar и в дальнейшем обрабатывались программой на языке Python, написанной с использованием библиотеки vtk. Таким образом были получены средние по времени и пространству значения основных физических характеристик на холодном и горячем выходах. Обсуждены результаты, демонстрирующие влияние длины вихревой трубы на величину температуры и расход воздуха на соответствующих выходах. Показано нестандартное для вихревой трубы поведение ее основных характеристик, сделано предположение о причине подобного поведения: столкновение быстротекущих потоков порождает неустойчивость. Сделаны предварительные выводы о выборе эффективной длины вихревой трубы с дополнительным каналом подачи воздуха, при которой соотношение температуры воздуха на горячем и холодном выходах является наибольшим.

Ключевые слова: эффект Ранка–Хилша, модифицированная вихревая труба, турбулентность, OpenFOAM

1. Введение

Вихревая труба — это устройство без движущихся частей, которое позволяет разделять поток сжатого воздуха, поданный тангенциально через специальный завихритель, на два вихря. При

этом один из вихрей имеет более низкую температуру, чем у подаваемого газа, второй — более высокую. Данный феномен был назван эффектом Ранка–Хилша в честь французского инженера Жоржа Жозефа Ранка, открывшего и запатентовавшего соответствующее устройство, и немецкого физика Рудольфа Хилша, который улучшил конструкцию вихревой трубы и вернул интерес к данному устройству [1, 2].

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

многих областях, где требуется охлаждение либо разделение смесей газов или жидкостей. Поэтому исследование устройств, реализующих вихревой эффект, является одним из основных направлений вихревой техники, особенно с учетом того факта, что механизм температурного разделения до сих пор не вполне ясен [3–6]. При этом поиск механизма ведется посредством исследования разнообразных эффектов, получаемых как на основе теоретических выкладок, например, связанных с ускорением тангенциальной скорости вихря благодаря акустическим эффектам [7], так и экспериментальным путем [8]. В подобных исследованиях часто демонстрируются эффекты, определяемые различным числом входных патрубков (от 1 до 5), длиной трубы и диаметром холодного выхода [9], формой основного канала. Так, в работе [5] определено существование оптимального малого конического угла основного канала трубы.

В целом рассматриваемый эффект интересен как в теоретическом, так и в практическом плане, поэтому следует отметить существование значительного числа работ, посвященных различным аспектам изучения и применения вихревых труб [3–5, 10–12]. Данный факт демонстрирует сохраняющийся интерес к исследуемому эффекту и актуальность проблемы, как это отмечено во многих обзорах по данной тематике [3, 4, 13].

На данный момент активно ведутся исследования нестандартных конфигураций вихревой трубы с точки зрения их влияния на ее характеристики. Существуют упоминания вихревой трубы с двумя контурами [14], с альтернативными формами горячего выхода [15], а также с видеоизмененным главным цилиндром [16].

В настоящей статье рассматривается влияние длины вихревой трубы на эффективность ее работы при наличии дополнительного вдува вдоль оси трубы со стороны горячего выхода, расположенном соосно.

2. Постановка задачи

В настоящей работе проводится вычислительное моделирование противоточной вихревой трубы с дополнительным вдувом воздуха, расположенным соосно основному каналу трубы со стороны диафрагмы горячего воздуха, как это показано на схеме рис. 1. При моделировании газодинамических процессов для вихревой трубы приняты следующие геометрические параметры в соответствии с обозначениями на рис. 1: диаметр трубы $D = 4.7$ см; диаметр дополнительного вдува взят равным диаметру холодного выхода $r = d = 0.9$ см; ширина диафрагмы горячего воздуха $h = 0.5$ см; размеры основных каналов подачи воздуха $s = 0.45$ см, $q = 1$ см и $m = 4$ см; длина холодного выхода $\ell = 2.5$ см. Длина трубы L является изменяемой и варьируется от 20 до 80 см.

На вход завихрителей воздух подается при температуре 300 К и постоянном расходе 0.02 м³/с, а на дополнительном вдуве — 0.002 м³/с при той же температуре. Стоит отметить, что на холодном и горячем выходах задано неотражающее условие протекания для скорости и температуры, давление на этих границах постоянно и равно 10^5 Па. На стенках ставится условие прилипания и адиабатическое условие по температуре. В уравнения импульсов и энергии введены вязкие члены для расчетов с использованием $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Выбор $k - \varepsilon$ модели турбулентности определяется необходимостью поиска наиболее адекватных подходов к моделированию рассматриваемого процесса. Ранее [10, 11] рассматривался LES подход к моделированию вихревой трубы, показавший недостаточную точность при использовании доступных вычислительных ресурсов.

Динамика газа в канале вихревой трубы описывается на основе стандартной системы уравнений:

- уравнение неразрывности

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

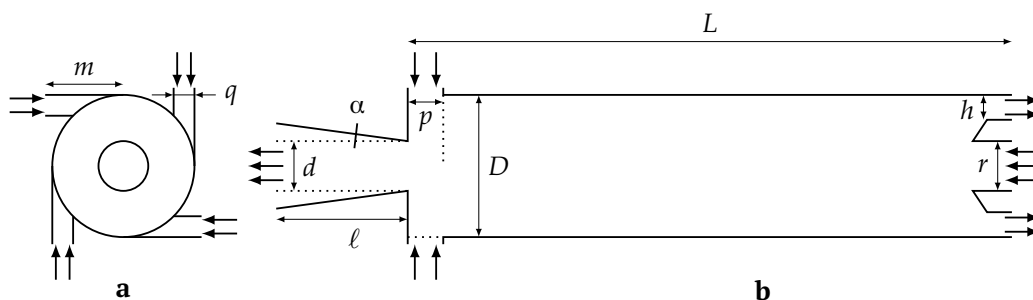


Рис. 1. Схема вихревой трубы: а) вид со стороны холодного выхода и завихрителя; б) продольный разрез

- уравнение импульса

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

- уравнение энергии

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

- уравнение состояния идеального газа

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

Здесь \mathbf{U} — вектор скорости; ρ — плотность; p — давление; $E = e + \frac{1}{2}|\mathbf{U}|^2$ — удельная полная энергия; e — удельная внутренняя энергия; γ — показатель адиабаты; $\boldsymbol{\tau}$ — тензор вязких напряжений, определяемый 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, вычисляемая из предположений $k - \varepsilon$ модели турбулентности [17]:

- кинетическая энергия турбулентности

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

- уравнение скорости диссипации турбулентности

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) - \frac{2}{3} C_1 \rho (\nabla \mathbf{U}) \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$ и $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

3. Проведение вычислений

Компьютерное моделирование проводилось в среде OpenFOAM с использованием решателя sonicFoam [10], который позволяет получать решения при наличии ударных волн, быстро сходится и дает хорошее приближение к точному решению, зависящее от количества итераций метода PISO. Также в модели строилась конечно-объемная сетка, для которой предусматривалась равномерность и ортогонализированность, так как такой подход позволяет увеличивать шаг по времени без существенного роста погрешности [11]. Помимо этого при увеличении длины трубы увеличивалось число разбиений в направлении оси основного канала

для предотвращения растяжения сетки и, соответственно, роста погрешности.

Важным моментом при подготовке параллельных вычислений является разбиение сетки на несколько приблизительно равных подсеток, что позволяет выполнить по ним параллельный расчет. Решатели пакета openFoam содержат параллельный вариант запуска средствами MPI. Для этого средствами утилиты decomposePar производилось разбиение на шесть подобластей плоскостями, ортогональными оси трубы, для минимизации числа ячеек, в которых происходит взаимодействие подсеток. Последующий расчет велся на шестиядерном процессоре. Таким образом в дальнейшем каждая конфигурация трубы рассчитывалась параллельно на шести процессах, а ускорение расчетов достигало 3.5 раз.

Моделируемое время для «коротких» каналов вихревой трубы (то есть для $L \leq 50$ см) ограничивалось 150 мс, причем по шагам на заключительных 50 мс производилось осреднение для уменьшения влияния на результат турбулентных пульсаций. Авторы полагают, что уже к моменту времени 100 мс и далее процесс является установившимся, что наблюдалось как последовательность схожих между собой значений физических величин, осредненных по площади сечения в каждый дискретный момент времени. Расчеты для длин $L > 50$ см проводились на увеличивающихся отрезках времени, вплоть до 210 мс, так как с увеличением длины трубы, увеличивалось и время, за которое происходит установление течения.

4. Результаты моделирования

На рис. 2–4 представлены графики температуры, скорости и массового расхода для диафрагм горячего и холодного воздуха. Для указанных графиков можно наблюдать характерное для вихревых труб поведение, выражающееся в росте температуры на горячем выходе и падении на холодном. В рассматриваемой постановке задачи эти процессы монотонно продолжают до достижения основным каналом вихревой трубы длины $L \sim 50$ см.

Все графики показывают, что удлинение основного канала вихревой трубы положительно сказывается на такой ее характеристике, как отношение температуры выходящего из горячей и холодной диафрагм воздуха.

На горячем выходе наблюдается достаточно гладкая монотонная картина поведения рассматриваемых физических величин. Температура выходящего воздуха растет почти равномерно, как это показано на рис. 2(а). Если же рассматривать графики модуля скорости (рис. 3(а)) и массового расхода

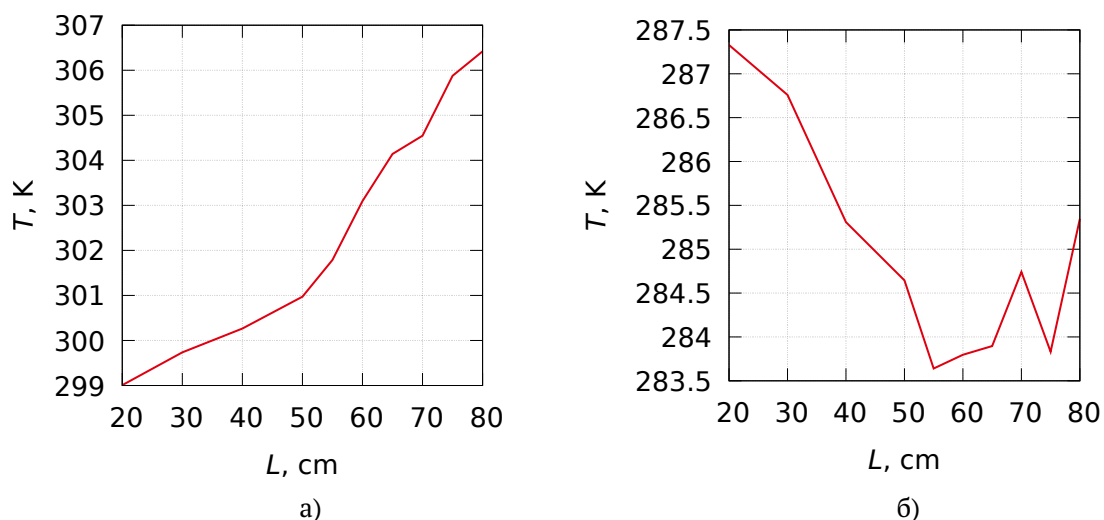


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха на горячей (а) и холодной (б) диафрагмах от длины трубы

(рис. 4(а)), то для них наблюдается также гладкая монотонная картина, однако эти физические величины уменьшают свое значение с ростом длины основного канала вихревой трубы. Причины небольшого отклонения при $L = 70$ см обсудим ниже.

Однако, для диафрагмы холодного воздуха полученные результаты не являются обратными, как можно было ожидать. Так, если обратить внимание на температуру (рис. 2(б)) и модуль скорости (рис. 3(б)) воздуха на выходе из холодной диафрагмы, то для них наблюдается немонотонное поведение, заключающееся сначала в уменьшении измеряемых значений с ростом длины канала до раз-

мера $L = 50$ см и $L = 55$ см, после чего указанные физические величины возрастают. Подобная немонотонность не наблюдалась для модели «стандартной» противоточной вихревой трубы [18], где эти физические величины гладко растут с увеличением длины основного канала.

Таким образом, можно предположить, что физика наблюдаемых процессов при наличии дополнительного вдува несколько отличается. Дополнительную подачу воздуха по оси канала со стороны горячей диафрагмы можно рассматривать как своеобразный «поршень», дополнительно толкающий образующийся по центру канала слой охлажденно-

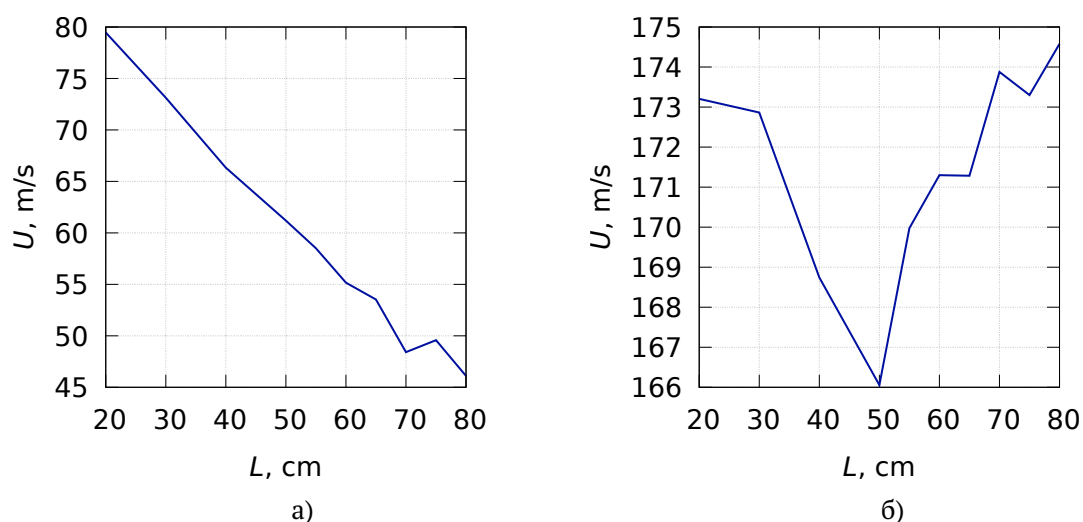


Рис. 3. Зависимость модуля скорости воздуха на горячей (а) и холодной (б) диафрагмах от длины трубы

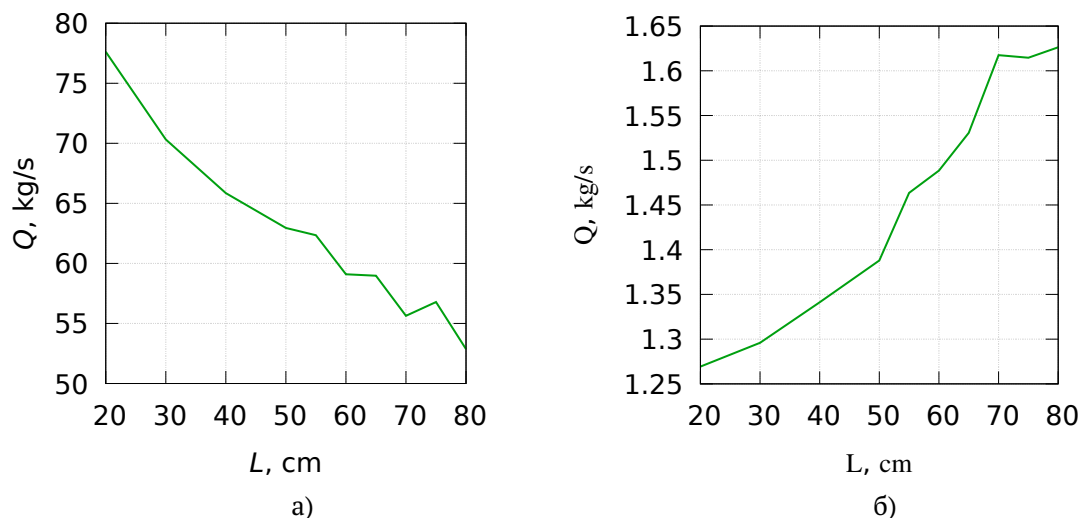


Рис. 4. Зависимость величины массового расхода воздуха на горячей (а) и холодной (б) диафрагмах от длины трубы

го воздуха в направлении холодной диафрагмы. С увеличением длины трубы область дополнительного вдува отодвигается от диафрагмы холодного воздуха и, соответственно, снижается ее влияние на выдув охлажденного газа. Когда длина основного канала вихревой трубы превышает длину $L \simeq 50$ см, «поршневое» действие поступающего из отверстия дополнительного вдува воздуха нивелируется. При дальнейшем удлинении вихревой трубы рассматриваемые физические параметры показывают качественную зависимость от длины основного канала аналогичную их зависимости для простой противоточной вихревой трубы [18].

Наконец, если рассматривать исключительно массовый расход воздуха через холодную и горячую диафрагмы (рис. 4), то как его величины, так и поведение в зависимости от длины канала повторяют величины и зависимости, наблюдаемые в случае обычной вихревой трубы [19].

Для всех графиков можно видеть некоторую неоднородность результатов на больших длинах ($L > 60$ см) основного канала вихревой трубы. Данная неоднородность может быть объяснена одной из двух причин. Во-первых, это может быть артефактом неравномерной конечно-объемной сетки, размер которой в проведенных вычислительных экспериментах изменялся скачкообразно, подстраиваясь под удобство пространственной декомпозиции для высокопроизводительных вычислений. Второе объяснение может быть связано с физикой процесса и основано на взаимодействии дополнительного потока воздуха с внешним и внутренним вихрями, определяющими эффект Ранка–Хилша. На данном этапе выбор между этими двумя объ-

яснениями затруднен, требует большего числа вычислительных экспериментов и является одной из целей дальнейших исследований.

5. Заключение

В ходе проведенных вычислительных экспериментов было продемонстрировано, что наличие дополнительного канала подачи воздуха, расположенного соосно основному каналу со стороны диафрагмы горячего выхода противоточной вихревой трубы оказывает заметное влияние на эффект Ранка–Хилша для «коротких» вихревых труб. В рассматриваемой конфигурации «короткими» являются трубы с длиной канала $L < 50$ см. Для таких труб зависимость температуры холодного воздуха от длины трубы имеет обратный характер по сравнению с классическим вариантом противоточной вихревой трубы. Объяснение этого, по-видимому, кроется в появлении некоторого направленного в сторону диафрагмы холодного воздуха мягкого «поршня» по центру, определяемого дополнительным каналом подачи газа. В целом это положительное свойство, которое может быть использовано для достижения большего выхода холодного воздуха на практике.

Также в процессе исследования обнаружена неустойчивость рассмотренных физических параметров в зависимости от длины основного канала для вихревых труб большой длины. Указанная неустойчивость не может быть объяснена в рамках проведенной работы и требует дополнительных исследований.

Список литературы

- [1] 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](https://doi.org/10.1063/1.1740893)
- [2] 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).
- [3] Eiamsa-Ard S., Promvongse 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](https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.006)
- [4] 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)
- [5] Thakare H.R., Monde A., Parekh A.D. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. V. 52. Pp. 1043–1071.
DOI: [10.1016/j.rser.2015.07.198](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.198)
- [6] 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)
- [7] 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.exptthermfluidsci.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.exptthermfluidsci.2010.06.010)
- [8] Majidi D., Alighardashi H., Farhadi F. Best vortex tube cascade for highest thermal separation // International Journal of Refrigeration. 2018. V. 85. Pp. 282–291.
DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2017.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.10.006)
- [9] Moraveji A., Toghraie D. Computational fluid dynamics simulation of heat transfer and fluid flow characteristics in a vortex tube by considering the various parameters // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 113. Pp. 432–443.
DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.095](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.095)
- [10] Михайленко К.И. Зависимость перераспределения температуры в вихревой трубе от геометрии завихрителя // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 174–179.
DOI: [10.21662/uim2017.2.026](https://doi.org/10.21662/uim2017.2.026)
- [11] Михайленко К.И. К моделированию вихревой трубы: подготовка гексагональной сетки для вычислительных экспериментов в среде OpenFOAM // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 112–118.
DOI: [10.21662/uim2016.1.017](https://doi.org/10.21662/uim2016.1.017)
- [12] Mikhaylenko C.I. Vortex tube modelling: outlet parameter dependencies of cold air production // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1158, No. 3. 032032.
DOI: [10.1088/1742-6596/1158/3/032032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/3/032032)
- [13] Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. 1997. Т. 167, № 6. С. 665–687.
DOI: [10.3367/UFNr.0167.199706e.0665](https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199706e.0665)
- [14] 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)
- [15] Rafiee S., Sadeghiazad M. Experimental and 3D CFD investigation on heat transfer and energy separation inside a counter flow vortex tube using different shapes of hot control valves // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 110. Pp. 648–664.
DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.08.166](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.166)
- [16] Liu J., Chen S., Gan M., Chen Q. Heat transfer and flow resistance characteristics inside an innovative vortex enhanced tube // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 144. Pp. 702–710.
DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.04.082](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.082)
- [17] Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3, No. 2. Pp. 269–289.
DOI: [10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [18] Адиуллин Б.Р., Михайленко К.И. Влияние длины канала вихревой трубы на температурное разделение воздуха // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 1. С. 36–43.
DOI: [10.21662/mfs2019.1.005](https://doi.org/10.21662/mfs2019.1.005)
- [19] Adiuillin B.R., Mikhaylenko C.I. Influence of the channel length of a vortex tube on the air temperature separation // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1268. 012001.
DOI: [10.1088/1742-6596/1268/1/012001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1268/1/012001)



The impact of an additional inlet point on the hot outlet side on the vortex tube productivity

Privalov L.Yu.* , Mikhaylenko C.I.**

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

**Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRC of RAS, Ufa, Russia

Based on numerical simulation, the production of cold and hot air on a modified countercurrent vortex tube is studied. A feature of the modification under study is an additional air inlet area along the axis of the pipe from the hot outlet side. An additional point of blowing air is designed to redistribute the gas flows at the cold and hot outlets. Computational experiments were performed in the OpenFOAM software package using the sonicFoam solver based on the $k - \varepsilon$ turbulence model under the assumption of an ideal gas. The dependence of the flow rate and temperature at the cold and hot outlets for different lengths of the main channel of the vortex tube was studied. For all considered pipe lengths, finite-volume grids were prepared in which the rectangular shape of the cells was preferably observed and their excessive stretching was avoided. To speed up the simulations, MPI technology was used; spatial decomposition of the original mesh was performed by decomposePar utility into equal parts along the pipe. This approach allowed us to reduce the computation time by approximately 3.5 times when running on six processes. The results of parallel modeling were combined with the reconstructPar utility and further processed by a Python program written using the vtk library. Thus, average values of the main physical characteristics by time and space at the cold and hot outlets were obtained. Results are discussed that demonstrate the effect of the vortex tube length on temperature and air flow at the respective outputs. The behavior of its main characteristics, non-standard for a vortex tube, is shown, an assumption is made about the reason for this behavior: the collision of very fast flows makes instability. Preliminary conclusions are made about choosing the effective length of the vortex tube with an additional air inlet channel at which the ratio of air temperature at the hot and cold outlets is the largest.

Keywords: Ranque–Hilsch effect, vortex tube, turbulence, OpenFOAM

References

- [1] 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
- [2] 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).
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Majidi D., Alighardashi H., Farhadi F. Best vortex tube cascade for highest thermal separation // *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 85. Pp. 282–291.
DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.006
- [6] Moraveji A., Toghraie D. Computational fluid dynamics simulation of heat transfer and fluid flow characteristics in a vortex tube by considering the various parameters // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 113. Pp. 432–443.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.095
- [7] Thakare H.R., Monde A., Parekh A.D. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 52. Pp. 1043–1071.
DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.198
- [8] Mikhaylenko C.I. Dependence of the temperature distribution in the vortex tube on the geometry of the swirler // *Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*. 2017. V. 12, No. 2. Pp. 174–179 (in Russian).
DOI: 10.21662/uim2017.2.026
- [9] Mikhaylenko C.I. Simulation of the vortex tube: design of a hexagonal mesh for computational experiments in OpenFOAM // *Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*. 2016. V. 11, No. 1. Pp. 112–118 (in Russian).
DOI: 10.21662/uim2016.1.017

- [10] Mikhaylenko C.I. Vortex tube modelling: outlet parameter dependencies of cold air production // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1158, No. 3. 032032. DOI: [10.1088/1742-6596/1158/3/032032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/3/032032)
- [11] Gutsol A.F. The Ranque effect // *Physics-Uspekhi*. 1997. V. 40. Pp. 639–658. DOI: [10.1070/PU1997v040n06ABEH000248](https://doi.org/10.1070/PU1997v040n06ABEH000248)
- [12] 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](https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.006)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] Rafiee S., Sadeghiazad M. Experimental and 3D CFD investigation on heat transfer and energy separation inside a counter flow vortex tube using different shapes of hot control valves // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 110. Pp. 648–664. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.08.166](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.166)
- [16] Liu J., Chen S., Gan M., Chen Q. Heat transfer and flow resistance characteristics inside an innovative vortex enhanced tube // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 144. Pp. 702–710. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.04.082](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.082)
- [17] Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. V. 3, No. 2. Pp. 269–289. DOI: [10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [18] Adiullin B.R., Mikhaylenko C.I. The influence of the vortex tube channel length on the separation of air by its temperature. *Multiphase Systems*. 14 (2019) 1. 36–43 (in Russian). DOI: [10.21662/mfs2019.1.005](https://doi.org/10.21662/mfs2019.1.005)
- [19] Adiullin B.R., Mikhaylenko C.I. Influence of the channel length of a vortex tube on the air temperature separation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1268. 012001. DOI: [10.1088/1742-6596/1268/1/012001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1268/1/012001)