



О зависимости производства холодного воздуха от размера площади горячего выхода вихревой трубы

Ронжин Р.П. *, Михайленко К.И.**

* Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

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

Представлена модель противоточной вихревой трубы для исследования зависимости влияния площади горячего выхода на эффект температурного разделения. Проведены вычислительные эксперименты для 37 моделей при разных значениях площади кольца горячего выхода. В ряде экспериментов изменяется давление подаваемого на вход воздуха для учета возможного влияния вычислительной и модельной погрешностей. Получен аномальный результат при значении площади горячего выхода $\sim 30 \text{ см}^2$. Сделаны выводы о диапазоне наиболее приемлемых площадей горячего выхода для рассматриваемой конфигурации вихревой трубы.

Ключевые слова: математическое моделирование, газовая динамика, вихревая труба, эффект Ранка–Хилша, OpenFOAM, турбулентность

1. Введение

Вихревая труба — устройство, которое позволяет разделять поток сжатого газа, поданный через тангенциальные завихрители, 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 его в 1931 году при попытках совершенствования циклонов для очистки газов от пыли [1] и немецкого физика Рудольфа Хилша, который улучшил устройство и опубликовал экспериментальные исследования вихревой трубы [2].

По причинам простоты устройства возникают широкие возможности его применения: от обычных охладительных устройств до разделения смесей. Также большой интерес представляет тот факт, что при определенных условиях эффект температурного разделения наблюдается не только в газе,

но и в жидкостях [3].

В этой связи вихревые трубы вызывают законный интерес исследователей. К настоящему времени опубликовано значительное количество работ по итогам экспериментальных и теоретических исследований эффекта Ранка–Хилша [4–6]. Следует отметить, что в указанных обзорах подчёркивается тот факт, что до настоящего времени нет единой теории, которая бы в полной мере описывала рассматриваемый эффект. Не существует даже какого-либо общего мнения по поводу первопричин температурного разделения, поэтому ведётся множество теоретических и экспериментальных работ в данном направлении. В части работ, в первую очередь экспериментальных, рассматриваются разные конфигурации вихревых труб [7]. Теоретические работы более разнообразны. Большинство исследователей рассматривает воздействие сжимаемости, напряжения сдвига и турбулентной пульсации как причины возникновения эффекта, но в то же время существует альтернативное мнение о том, что причинами являются акустические эффекты, возникающие в трубе [8]. Также в последнее время стали рассматриваться более тонкие эффекты, связанные, например, с анализом произ-

водства локальной энтропии [9].

Отсутствие общепризнанной теории, объясняющей механизм рассматриваемого феномена не позволяет разрабатывать максимально эффективные конфигурации вихревой трубы. Сказанное определяет актуальность теоретических и экспериментальных исследований по этой теме. В представленной работе исследуется зависимость температурного разделения от площади горячего выхода средствами вычислительного моделирования с использованием среды OpenFOAM.

2. Постановка задачи

Рассмотрим противоточную вихревую трубу, схема которой приведена на рис. 1.

Происходящие в канале вихревой трубы процессы будем моделировать на основе системы уравнений газовой динамики, включающих:

- уравнение неразрывности

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

- уравнение импульсов

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

- уравнение энергии

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

- и уравнение состояния идеального газа для замыкания основной системы уравнений

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

Здесь использованы стандартные обозначения: \mathbf{U} — вектор скорости; ρ — плотность; p — давление; $E = \varepsilon + \frac{1}{2}|\mathbf{U}|^2$ — удельная полная энергия; ε — удельная внутренняя энергия; γ — показатель адиабаты; τ — 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; μ — вязкость среды; μ_t — турбулентная вязкость, вычисляемая исходя из k - ε модели турбулентности.

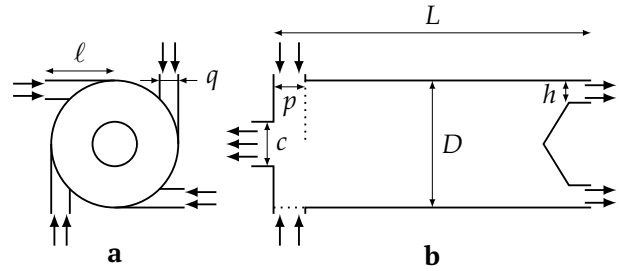


Рис. 1. Схема изучаемой противоточной вихревой трубы: а) вид с торца со стороны холодного выхода и завихрителей; б) разрез вдоль оси трубы. Обозначения: L — длина трубы; D — диаметр трубы; l, p, q — высота, длина и ширина канала завихрителя; c — диаметр сопла холодного выхода; h — размер горячего выхода (разность внешнего и внутреннего радиусов)

3. Вычислительные средства

При вычислительном моделировании турбулентной динамики жидкости и газа возможны несколько подходов. Наиболее простой с точки зрения алгоритма решения подход подразумевает использование прямого численного моделирования [10, 11]. Однако он сопряжен со значительными затратами как вычислительных ресурсов, так и машинного времени. Кроме того, дополнительную сложность может вызвать необходимость подготовки кода для параллельного исполнения на вычислительном кластере.

Более продуктивным следует, по-видимому, считать подход, связанный с использованием какой-либо модели турбулентности. Нами выбрана в достаточной мере зарекомендовавшая себя k - ε модель.

Так как процессы в вихревой трубе проходят при значительных скоростях, вплоть до звуковых, в качестве базового решателя выбран sonicFoam — решатель в составе OpenFOAM, обеспечивающий вычисления для моделей потоков сжимаемых сред со звуковыми скоростями при возможном наличии ударных волн.

При обработке полученных результатов возникла необходимость вычисления среднего по времени и сечению значения температуры и давления для значительного числа проведённых вычислительных экспериментов. Для этого используется двухэтапный подход. На первом этапе вызывается утилита surfaceCut из состава OpenFOAM, позволяющая получить сечение моделируемой области по заданной поверхности и сохранить значения заданных физических величин в формате VTK во

всех просчитанных моментах времени. На втором этапе вызывается скрипт на языке Python, обрабатывающий полученные файлы VTK на заданном промежутке времени и вычисляющий средние значения по поверхности, а затем по времени. Таким способом вычисляются средние значения плотности и температуры на холодном и горячем выходах, а также в области перехода из вихревой трубы в канал холодного выхода.

4. Вычислительный эксперимент

Производится моделирование вихревой трубы, имеющей следующие параметры (см. рис. 1): $L = 52$ см; $D = 9.4$ см; $k = 9.4$ см; $p = 2$ см; $q = 1$ см; $c = 18$ см. Параметр h принят изменяемым. При исследовании влияния площади горячего выхода на эффект Ранка–Хилша параметра h варьировался таким образом, чтобы указанная площадь изменялась в диапазоне от 5 см² до 50 см² с шагом 5 см².

Для указанных параметров была построена трёхмерная конечно-разностная сетка, вид которой приведен на рис. 2. При подготовке сетки были учтены особенности цилиндрической конфигурации области и возможного влияния конечно-разностной сетки на результаты вычислений [12], поэтому качеству сетки было уделено особое внимание [13].

При моделировании использовались начальные данные, имитирующие нормальные условия: давление в области равномерно и равно атмосферному (10^5 Па); температура по всей области комнатная (300 К); газ (воздух) — неподвижен ($U = 0$ м/с).

Во время расчётов задаются граничные условия, характерные для работающей вихревой трубы. На вход подаётся газ комнатной температуры (300 К) при высоком давлении ($\sim 4 \cdot 10^5$ Па). На выходе задается атмосферное давление (10^5 Па), а для температуры и скорости — условие протекания. На стенках трубы задаётся условие прилипания, стенки термоизолированы.

В ряде вычислений давление на входе задавалось отличным от $4 \cdot 10^5$ Па. Полные серии вычислений проводились для случаев $4,01 \cdot 10^5$ Па и $3,99 \cdot 10^5$ Па. Также для дополнительного анализа особенности распределения параметров при площадях горячего выхода около 30 см² проводились вычисления при давлении на входе $4,1 \cdot 10^5$ Па и $3,9 \cdot 10^5$ Па.

Таким образом? посчитано 37 случаев, каждый из которых просчитывался до момента времени 0,07 с, когда течение в вихревой трубе становится полностью развитым.

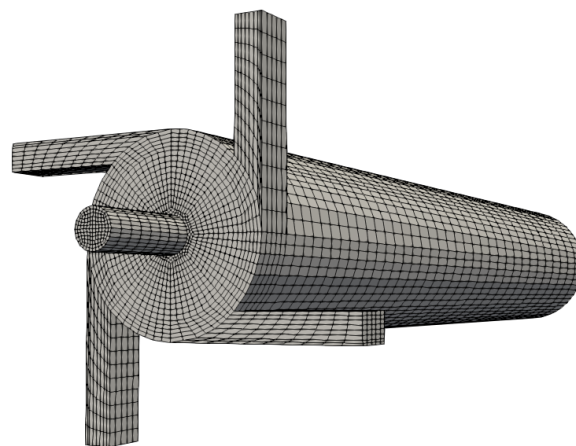


Рис. 2. Общий вид используемой конечно-разностной сетки

5. Обсуждение результатов

Для каждого расчёта были получены три средних по сечению и времени значения температуры и давления. Указанные значения были осреднены по следующим сечениям: площадь холодного выхода; площадь горячего выхода; сечение примыкания сопла холодного выхода к основному каналу вихревой трубы. Для того чтобы сгладить вносимые турбулентностью пульсации, указанные значения осреднялись также по последним вычисленным шагам по времени $t = 0,6 \dots 0,7$.

На рис. 3–5 представлены графики зависимости средней температуры воздуха, проходящего через соответствующие сечения, от размера площади горячего выхода.

На рис. 3 показана вышеописанная зависимость для холодного выхода. Здесь мы наблюдаем,

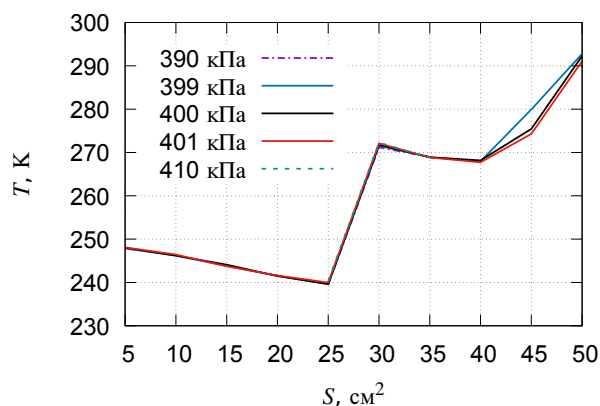


Рис. 3. Зависимость температуры в сечении холодного выхода от площади горячего выхода

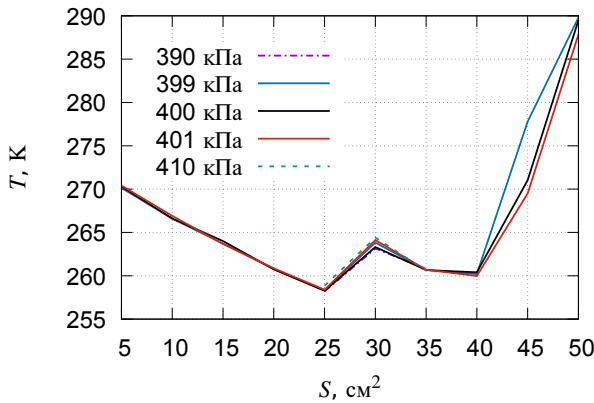


Рис. 4. Зависимость температуры в зоне перехода в холодное сопло от площади горячего выхода

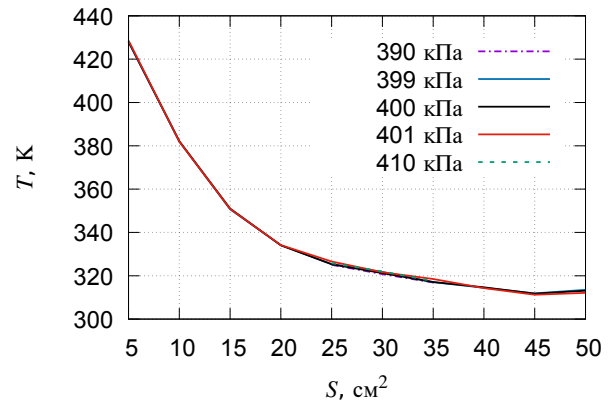


Рис. 5. Зависимость температуры в сечении горячего выхода от площади горячего выхода

что поведение представленных параметров достаточно слабо зависит от малых изменений давления подаваемого на вход воздуха. Большой интерес вызывает наличие повышенной относительно соседних точек средней температуры выходящего воздуха при площади горячего выхода $S = 30 \div 35 \text{ см}^2$. Следует отметить, что одинаковая картина наблюдается для всех проведённых расчётов.

Аналогичная по сути картина наблюдается и на рис. 4. Здесь показаны средние значения температуры воздуха в сечении перехода из основной трубы в сопло холодного выхода. Также, как и в предыдущем случае, можно видеть повышение температуры при площади горячего выхода $S = 30 \div 35 \text{ см}^2$ (то есть в том же интервале).

В дополнение к расчётам при давлении подаваемого воздуха $(4 \pm 0,01) \cdot 10^5 \text{ Па}$ для исследования ситуации с повышением температуры выходящего газа при площади сечения горячего выхода $S \sim 30 \text{ см}^2$ были проведены вычисления для давления на входе $3,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $4,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для значения площади сечения горячего выхода $S = \{25, 30, 35\} \text{ см}^2$. Однако и в этом случае наблюдаемая картина не претерпела качественных изменений. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемое распределение не является случайным выбросом. Однако дать объяснение указанному эффекту в настоящий момент не представляется возможным.

На обоих приведённых графиках, если отвлечься от описанных выше выбросов, можно наблюдать постепенное снижение средней температуры при увеличении площади горячего выхода приблизительно до $S = 20 \div 25 \text{ см}^2$ и резкое увеличение после $S = 40 \text{ см}^2$. Отметим эти значения для обсуждения ниже.

В отличие от холодного выхода на горячем

конце вихревой трубы наблюдается плавная и естественным образом объясняемая картина (см. рис. 7). Рост площади горячего выхода с учетом того, что площадь холодного выхода фиксирована, приводит к снижению среднего давления в канале вихревой трубы и, как следствие, к падению температуры исходящего газа при, неизбежном росте его расхода через данный выход.

Аналогичная ситуация наблюдается и для давления на холодном и горячем выходах (рис. 6–7). Так, на холодном выходе наблюдается значительный рост давления истекающего газа в тех экспериментах, в которых площадь горячего выхода принимает значения $S = 30$ и $S = 35 \text{ см}^2$. При этом на противоположном конце вихревой трубы можно видеть плавное монотонное падение давления истекающего газа.

Также определенный интерес представляет во-

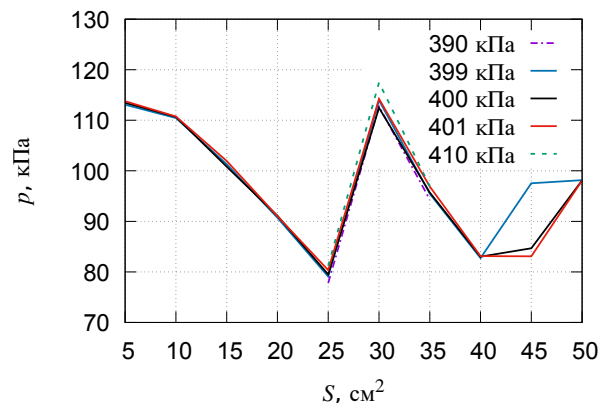


Рис. 6. Зависимость давления в сечении холодного выхода от площади горячего выхода

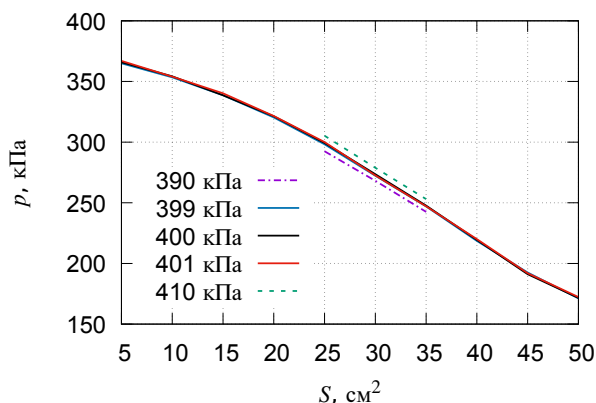


Рис. 7. Зависимость давления в сечении горячего выхода от его площади

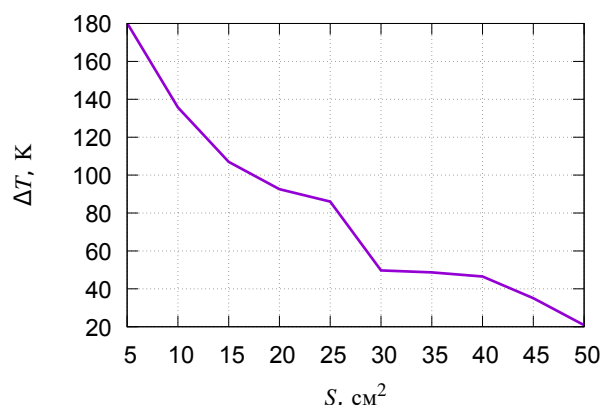


Рис. 8. Зависимость разности средних температур между горячим и холодным выходами от площади горячего выхода

прос разделения подаваемого газа на две температурные фракции. На рис. 8 приведена зависимость разности температуры между горячим и холодным выходами от площади последнего. Здесь можно видеть, что при малых площадях горячего выхода мы имеем достаточно высокую температуру исходящего из него воздуха, что обеспечивает высокую температурную разность между выходами. Но это объясняется тем, что, при малой площади горячего выхода через него осуществляется небольшой расход наиболее горячего газа, а основной поток направлен в холодный выход, на котором происходит повышение температуры.

Обратная картина будет при значительной площади горячего выхода. В этом случае основной поток слабо разогретого газа выходит через горячий выход, а с противоположной стороны получим малый поток успевающего прогреться газа.

Из сказанного следует, что при поиске наиболее эффективного варианта геометрии вихревой трубы именно с точки зрения температурного разделения, лучшей для вихревой трубы с рассматриваемыми параметрами представляется такая геометрия, в которой площадь кольца горячего выхода попадает в промежуток значений $S = 20 \div 40 \text{ см}^2$.

Таким образом, для малых площадей горячего выхода ($S < 20 \text{ см}^2$) мы получаем слабый поток очень горячего газа через кольцо горячего выхода и значительный поток слабо охлажденного газа через сопло холодного выхода. С другой стороны, для большой площади ($S > 40 \text{ см}^2$) на горячем выходе имеем большой поток слабо нагретого газа, а на холодном — малый поток слабо охлажденного газа.

6. Заключение

Представленная работа показывает, что среда вычислительного моделирования OpenFOAM обладает возможностями, подходящими для проведения массовых вычислительных экспериментов при теоретическом исследовании эффекта Ранка–Хилша.

Проведённые исследования показывают, что размер кольца горячего выхода вихревой трубы при неизменных остальных геометрических параметрах оказывает значительное влияние на исследуемый эффект.

В работе сделаны выводы о диапазоне значений площади горячего выхода, при которых температурное разделение наиболее эффективно.

В ходе работы выявлена особая область значений площади горячего выхода $S \sim 30 \text{ см}^2$. При указанной геометрии наблюдается резкое увеличение значений исследуемых физических величин (температура и давление). Эта особенность требует дополнительного изучения, так как на данный момент нет возможности объяснить данную аномалию.

Полученные результаты могут быть полезны и при изучении других применений вихревых труб. Так, осаждение дисперсной среды ударными волнами [14] может осуществляться в трубе Ранка–Хилша для очистки отходящего газа. При этом размер горячего выхода может оказывать существенное влияние на окончательный результат.

Список литературы

- [1] Ranque G.J. Experiments on expansion a vortex with Simultaneous Exhaust of hot air and cold air (in French) // J. Phys. Radium. 1933. V. 4. Pp. 112–114.

- [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](https://doi.org/10.1063/1.1740893))
- [3] Balmer, R. T., Pressure-Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids // *J. Fluids Eng.* 1988. V. 110(2). Pp. 161–164.
(DOI: [10.1115/1.3243529](https://doi.org/10.1115/1.3243529))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] Valipour M.S., Niazi N. Experimental modeling of a curved Ranque–Hilsch vortex tube refrigerator // *International Journal of Refrigeration*. 2011. V. 34(4). Pp. 1109–1116.
(DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.02.013))
- [8] Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. V. 34(8). Pp. 1367–1374.
(DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010))
- [9] 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))
- [10] Марьин Д.Ф., Михайленко К.И. Численное исследование механизма возникновения эффекта Ранка–Хилша в канале вихревой трубы // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4-3. С. 977–978.
- [11] Марьин Д.Ф., Михайленко К.И., Хазиев Л.Х. Прямое численное моделирование эффекта ранка // В сборнике: *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011) Труды международной научной конференции*. 2011. С. 539–547.
(<http://omega.sp.susu.ru/books/conference/PaVT2011/short/197.pdf>)
- [12] 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))
- [13] 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))
- [14] Михайленко К.И., Валеева Ю.Р. Моделирование осаждения мелкодисперсной взвеси из воздуха при прохождении волн давления // *Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии*. 2013. Т. 14, № 1. С. 328–333.
(http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2013/v14r136.html)



On the dependence of a cold air production on the size of a hot air output area of the vortex tube

Ronzhin R.P.*, Mikhaylenko C.I.**

* Ufa State Aviation Technical University, Ufa

** Mavlutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa

A model of a counterflow vortex tube is presented to investigate the dependence of the influence of hot exit area on the temperature separation. Computational experiments were done for 37 models for different values of the area of the hot exit ring. In a number of experiments, the pressure of the air supplied to the inlet varies in order to take into account the possible effects of computational and model errors. An anomalous result is obtained for the value of the hot exit area $\sim 30 \text{ cm}^2$. Conclusions are drawn about the range of the most suitable hot exit sizes for the considered configuration of the vortex tube.

Keywords: mathematical modeling, gas dynamics, vortex tube, Ranque–Hilsch effect, OpenFOAM, turbulence