

Зависимость перераспределения температуры в вихревой трубе от геометрии завихрителя

Михайленко К.И.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Проведено моделирование вихревой трубы для нескольких вариантов размера и формы улитки завихрителя. Записана математическая модель процесса. Вычислительное моделирование основывалось на методе LES с использованием алгоритма PIMPLE в вычислительном пакете OpenFOAM. Значительное внимание уделено использованию равномерных ортогонализированных сеток, при этом форма и размер улитки завихрителя определялись особенностью построенной сетки. Показано, что при определённых начальных условиях для некоторых форм завихрителя возможна инверсия эффекта температурной стратификации.

Ключевые слова: вихревая труба, математический эксперимент, вычислительная гидродинамика, 3D-сетка, OpenFOAM

1. Введение

В настоящей работе рассматриваются некоторые аспекты широко известного эффекта температурной сепарации потока сжимаемого газа в канале устройства, называемого вихревой трубой. Данный эффект носит имя Ранка–Хилша.

Сам эффект выражается в том, что подаваемый на вход вихревой трубы поток газа образует два направленных к разным торцам цилиндра трубы вихря, имеющих температуры выше и ниже исходной.

Впервые соответствующий эффект в вихревой трубе обнаружил и описал Ж.Ж. Ранк (Ranque G.J.) в 1933 г. [1]. Позднее им были получены патенты на соответствующее устройство [2]. Однако интерес к вихревой трубе возник лишь после публикации в 1947 г. работы Р. Хилша (Hilsch R.) [3], в которой описывается влияние входного давления и геометрии вихревой трубы на эффект, дается некоторое объяснение разделения энергии.

Возрастание интереса хорошо иллюстрируется обзорной работой Р. Уэстли (Westley R.) [4], содержащая 116 библиографических ссылок, из которых только 23 — до 1947 г.

В дальнейшем вихревые трубы получили широкое распространение в технике и промышленности, включая самые неожиданные точки применения, например, безопасное охлаждение оборудования при работе со взрывчатыми веществами [5], регулирование температуры воздуха при дайвинге [6], сепарации многофазных сред [7], поддержание температурного режима при магнитно-резонансных исследованиях [8].

Рассматриваемый эффект представляет большой теоретический и практический интерес, поэтому существует значительный объём работ, посвящённых различным аспектам исследования и применения вихревых труб. В качестве знаковых можно выделить обзоры, сделанные А.Ф. Гуцолом [10], а также более современные S. Eiamsaard и P. Promvonge [11], S. Subudhi и M. Sen [12]. Приведённые работы наглядно показывают неснижающийся интерес к исследуемому эффекту и сохраняющуюся актуальность. Особо стоит подчеркнуть, что во всех указанных работах отмечается, что механизм температурной стратификации остаётся неясным.

2. Математическая модель

Для моделирования завихренных потоков в канале трубы Ранка–Хилша решалась математическая модель, описывающая течение невязкого сжи-

маемого флюида в трёхмерной области. Модель включает в себя уравнение неразрывности, уравнения импульсов без вязкой составляющей, уравнение полной энергии и замыкается уравнением состояния идеального газа:

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

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

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

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

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.

Граничные условия стандартны для такого рода задач. На стенках вихревой трубы ставится условие проскальзывания; на входе задаётся постоянный расход при заданной температуре, а на выходах — условие протекания. Начальные условия задаются атмосферным давлением при той же температуре, при которой в дальнейшем подаётся газ на входе. Начальная скорость равна нулю.

3. Вычислительные средства

Вычислительное моделирование проводилось в пакете OpenFOAM [13]. Для учёта турбулентных эффектов был использован метод крупных вихрей (LES). Разностная схема для записанных уравнений в рассматриваемом пакете основывается на хорошо известном консервативном методе контрольного объёма. Выбранная последовательность решения уравнений и соответствующие итерации определялись алгоритмом PIMPLE. В вычислительном плане выбранный подход значительно выгоднее прямого численного моделирования [14] при аналогичных результатах вычислений.

Особое внимание при моделировании уделялось построению ортогонализированной структурированной вычислительной сетки. Такой подход позволяет снизить вычислительную погрешность и уменьшить количество узлов сетки, то есть ускорить вычислительный процесс [15].

Однако, при уменьшении количества узлов сетки и соблюдении требований ортогонализированности и структурированности, радиальный размер завихрителя подводящих воздух каналов увеличивается. Таким образом, увеличивается и радиальный размер проекции входящего потока воздуха,

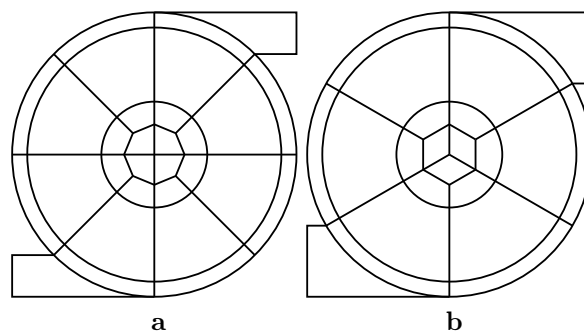


Рис. 1. Две схемы размещения блоков вычислительной сетки в радиальном сечении вихревой трубы в области завихрителя: с разбиением на восемь секторов (а) и на шесть секторов (б)

что демонстрируется на схемах рис. 1. На этом рисунке приведены два варианта поблочного построения вычислительной сетки с помощью утилиты blockMesh пакета OpenFOAM: с разбиением сечения вихревой трубы на восемь секторов (а) и на шесть секторов (б). При этом в общем случае для разбиения (б) количество узловых точек уменьшается, но, как легко увидеть, увеличивается вертикальный размер подводящего канала улитки завихрителя.

Такое изменение входящего потока может приводить к тому, что температура выходящих потоков меняет своё распределение: на дальнем конце происходит отбор газа с температурой меньше исходной, а на ближнем, наоборот, большей. В настоящий момент неясно, определяется ли описанный эффект обратной температурной сепарации особенностями модели, численного метода или существует на практике. Дальнейшая работа призвана прояснить указанный момент.

4. Обсуждение результатов

Ряд вычислительных экспериментов был проведен для описанной выше модели. Моделировалась динамика газа в канале вихревой трубы для двух основных, описанных в предыдущем разделе, конфигураций сетки узловых точек (контрольных объёмов). Использовались несколько конфигураций разностных сеток, при этом основной упор делался на сравнение результатов для случаев двух показанных на рис. 1 схем.

В обеих конфигурациях сеток заданы одинаковые начальные и граничные условия. В качестве начальных условий берётся неподвижная среда ($\mathbf{U} = 0$ м/с) при нормальных условиях ($p = 10^5$ Па, $T = 300$ К). На стенках установ-

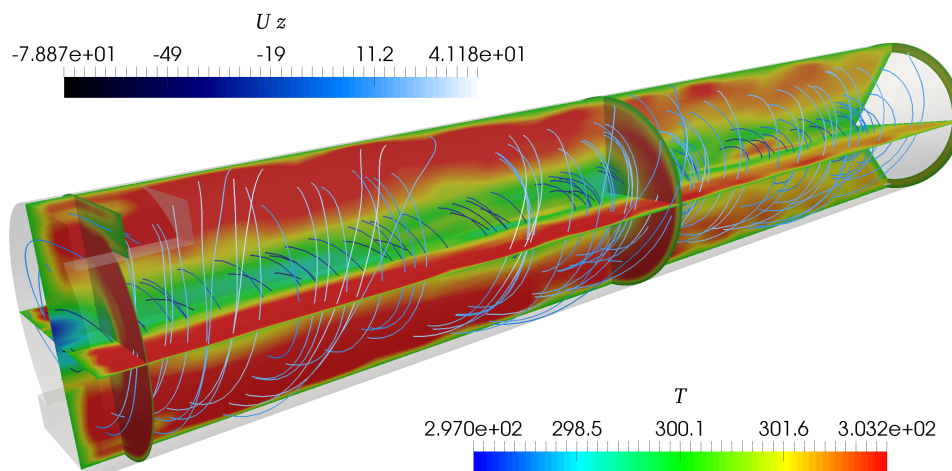


Рис. 2. Распределение температуры T и линии тока в канале вихревой трубы при использовании вычислительной сетки с разбиением на восемь секторов

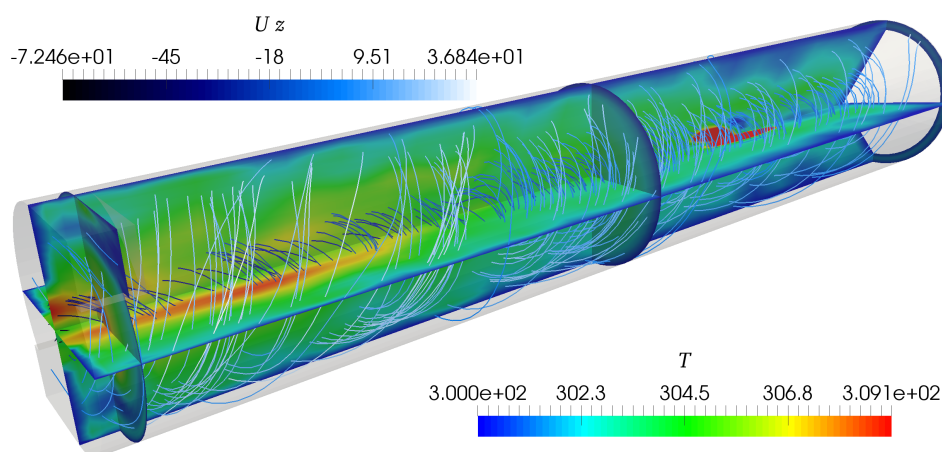


Рис. 3. Распределение температуры T и линии тока в канале вихревой трубы при использовании вычислительной сетки с разбиением на шесть секторов

лено условие проскальзывания, условие протекания на выходе и постоянного объемного расхода ($0.005 \text{ м}^3/\text{с}$) при постоянной температуре, равной тем же 300 К .

На рис. 2 показан результат расчёта для сетки с восемью секторами (см. схему на рис. 1 (а)), а на рис. 3 — результат расчёта для сетки с шестью секторами (схема на рис. 1 (b)). В обоих случаях расчёт велся до момента однозначного формирования в среднем постоянного по времени распределения параметров течения по пространству. Это время порядка $t = 0.5 \text{ с}$.

Как можно видеть, в обоих случаях автоматически формируется стандартная двухвихревая структура с противонаправленными центральным и периферийным вихрями. Данная структура про-

демонстрирована линиями тока на обоих рисунках. Линии тока также отнены цветовой градуировкой, характеризующей составляющую U_z вектора скорости (по направлению вдоль трубы).

Однако, для двух рассмотренных конфигураций вычислительной сетки, картина температурного распределения оказалась существенно различной. В первом случае мы можем наблюдать хотя и достаточно слабое на данной конфигурации вихревой трубы, но заметное распределение температуры, характерное для применяемых на практике устройств. Данное распределение описывается более горячим потоком на периферии и более холодном по центру канала. Во втором случае мы наблюдаем уже аномальное распределение температуры, когда из «холодного» выхода по центру получен по-

ток более горячего воздуха.

Наблюдаемый нами эффект температурной инверсии, как уже отмечалось выше, может определяться вычислительными эффектами и требует дальнейшего изучения.

5. Заключение

В представленной работе показано, что пакет моделирования гидродинамики OpenFOAM позволяет моделировать процессы в трубе Ранка–Хилша с применением относительно простых ортогонализированных структурированных сеток.

Показано, что использованные модели позволяют получать нестандартные эффекты. Различие в распределении температуры в канале вихревой трубы в двух рассмотренных в статье случаях может определяться рядом факторов, действующих совместно или по отдельности. К таким факторам могут относиться: различия в геометрии подводных патрубков завихрителя; погрешности вычислений на крупных ячейках; ограниченность использованной математической модели; проблемы в реализации граничных условий. Первые два фактора можно постараться в дальнейшем исключить, произведя массовые вычислительные эксперименты, в которых будут варьироваться форма и размер вычислительных блоков, количество узлов вычислительной сетки, форма завихрителя. Ограниченность модели может заключаться в выборе уравнения состояния. Возможно стоит обратить внимание на более сложные его реализации, включая широкодиапазонные [16].

При анализе влияния граничных условий возможно заключение вихревой трубы в значительный объём, в котором на границах будут заданы нормальные условия. Однако такой подход вызовет значительный рост числа узловых точек, в связи с чем необходимо обратить внимание на методы повышения производительности, связанные как с экстенсивным увеличением количества узлов вычислительной системы, так и с модификацией используемых алгоритмов [17–19].

Таким образом, вопрос проявления температурной инверсии требует дальнейших исследований.

Также следует отметить, что проведённые исследования пока не позволяют подтвердить или опровергнуть гипотезу [14] о механизме температурного перераспределения в канале вихревой трубы, связанную с резким расширением и охлаждением подаваемого в трубу газа с последующим выдавливанием образовавшейся холодной фракции центральным вихрем, играющим роль поршня.

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] Ranque G.J. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two outputs of fluid at different temperatures. US patent 1:952,281, 1934.
- [3] 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.
- [4] Westley R. A bibliography and survey of the vortex tube. College of Aeronautics, Cranfield, UK. 1954. 38 p.
- [5] Bruno T.J. Applications of the vortex tube in chemical analysis. Part I: introductory principle // *Am.Lab*. 1993. V. 25. Pp. 15–20.
- [6] Baz A, Uhler D. A compressed gas powered heating system for underwater divers // *Ocean Engineering*. 1986. V. 13, No. 3. Pp. 273–290.
- [7] Riu K.-J., Kim J, Choi I.-S. Experimental investigation on dust separation characteristics of a vortex tube // *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*. 2004. V. 47, No. 1. Pp. 29–36.
- [8] 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 // *Journal of Magnetic Resonance*. 2004. V. 168, No. 2. Pp. 202–209.
- [9] Korkmaz M.E., Gümüsel L., Markal B. Using artificial neural network for predicting performance of the Ranque–Hilsch vortex tube // *International Journal of Refrigeration*. 2012. V. 35, No. 6. Pp. 1690–1696.
- [10] Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // *Успехи физических наук*. 1997. Т. 167, № 6. С. 665–687.
- [11] Eiamsa-ard S., Promvong P. Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 1. Pp. 1822–1842.
- [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.
- [13] OpenFOAM® — The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com/> (дата обращения: 21.10.2016).
- [14] Марьян Д.Ф., Михайленко К.И., Хазиев Л.Х. Прямое численное моделирование эффекта Ранка // *Параллельные вычислительные технологии*

- (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.) – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2011. С. 539–547.
- [15] 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.
- [16] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Пространственное моделирование процесса формирования струи вскипающей воды при истечении из тонкого сопла // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 5 (107). С. 783–794.
- [17] Газизов Р.К., Лукашук С.Ю., Михайленко К.И. Разработка параллельных алгоритмов решения задач механики сплошной среды на основе принципа пространственной декомпозиции // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2003. Т. 4, № 1. С. 100–107.
- [18] Марьин Д.Ф., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш., Михайленко К.И. Ускорение молекулярно-динамических расчетов с помощью быстрого метода мультиполей и графических процессоров // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14, № 1. С. 483–495.
- [19] Михайленко К.И. Высокопроизводительный алгоритм для решения явных конечно-разностных задач по технологии MPI // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2016. Т. 11, № 2. С. 247–253.

Dependence of the temperature distribution in the vortex tube on the geometry of the swirler

Mikhaylenko C.I.

Mavlutov Institute of Mechanics, Ufa

Modeling of the vortex tube for several variants of the size and shape of inlets of the swirl is carried out. A mathematical model of the process is written. Computational modeling was based on the LES method using the PIMPLE algorithm in the OpenFOAM computational package. Considerable attention was paid to using uniform orthogonalized meshes, while the shape and size of the swirl of the swirl was determined by the feature of the mesh constructed. It is shown that, under certain initial conditions, the effect of thermal stratification can be inversed for some forms of the swirler.

Keywords: vortex tube, computational experiment, CFD, 3D meshes, OpenFOAM

