

УДК 621.573

Вихревая труба Ранка-Хилша как перспективное устройство получения низких температур

А.М. Белоусов belousoff.alexey@yandex.ru, **И.Х. Исрафилов,**

Набережночелнинский институт (филиал)

*ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
423810, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19 (1/18),*

С.И. Харчук,

*ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51*

Вихревая труба, или труба Ранка-Хилша, представляет собой устройство, позволяющее получить потоки холодного и горячего воздуха при подаче на вход сжатого газа и его последующей закрутке в камере энергоразделения. В данной статье рассматривается эффективность использования вихревой трубы в качестве охладителя. Обсуждены технические и экологические преимущества использования систем подобного рода. Приведены и описаны основные типы конструкций вихревых труб. В статье также приводится краткий обзор результатов экспериментальных исследований и численного моделирования, приведенных в предыдущих работах по изучению температурного разделения в вихревых трубах.

Ключевые слова: вихревая труба, труба Ранка-Хилша, температурное разделение, холодильная техника, экология

Ranque-Hilsch vortex tube as perspective device of low temperature obtaining

A.M. Belousov belousoff.alexey@yandex.ru, **I.K. Israphilov,**

Naberezhnye Chelny institute (branch) of Kazan Federal University,

423810, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Mira avenue, 68/19 (1/18),

S.I. Kharchuk,

Kazan State Power Engineering University,

420066, Republic of Tatarstan, Kazan, Krasnoselskaya street, 51

The vortex tube (the Ranque-Hilsch tube) is a device that enables the separation of hot and cold air as compressed gas flows tangentially into the vortex chamber through inlet nozzles. The paper describes on investigation of the effectiveness of the vortex tube as a refrigerator. Engineering and environmental advantages of such systems were discussed. The basic types of constructions of the vortex tubes were given and described. The paper also reviews the experimental investigations and numerical simulations presented in previous studies on temperature separation in the vortex tubes.

Keywords: vortex tube, Ranque-Hilsch tube, temperature separation, refrigeration, ecology.

Необходимость получения холода была и остается одной из важных задач для различных сфер жизнедеятельности. Как, например, в быту – для сохранения продуктов питания, так и в промышленности, где низкотемпературные технологии получили

широкое применение на всех этапах производственного цикла – от изготовления изделия, до его испытания [1].

Наиболее популярным решением в области холодопроизводства является применение парокомпрессионных машин. Однако, основным недостатком хладогенераторов подобного типа является необходимость использования хладагентов (фреон, аммиак), которые могут нанести вред как жизни и здоровью человека, так и окружающей среде [2].

Альтернативным способом получения холода является применение установок на основе вихревой трубы Ранка-Хилша. Суть вихревого эффекта заключается в разделении газа при закручивании в цилиндрической или конической камере на две фракции. На периферии образуется закрученный поток с большей температурой, а в центре – закрученный охлажденный поток, причем вращение в центре происходит в другую сторону, чем на периферии. На рис.1 представлена одна из возможных конструкций вихревой трубы [3].

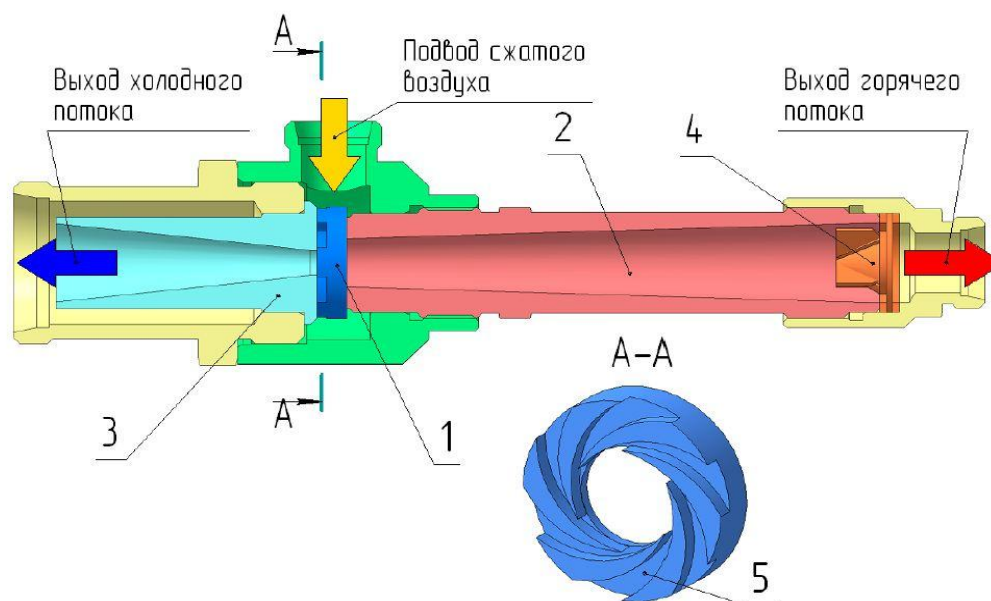


Рис. 1. Схема вихревой трубы [3]:

- 1 – сопловой ввод; 2 – камера энергоразделения; 3 – диффузор холодного потока;
4 – развихритель горячего потока; 5 – сопловой сужающийся канал.

Можно выделить следующие достоинства вихревых труб по сравнению с парокомпрессионными машинами:

1. отсутствие необходимости в хладагентах и теплоносителях;
2. простота конструкции, компактность;
3. дешевизна изготовления, простота обслуживания и ремонта;
4. отсутствие подвижных узлов и, как следствие, высокая надежность;
5. высокая скорость выхода на рабочий режим;
6. возможность осуществления нескольких процессов одновременно (охлаждение, нагрев, фазоотделение).

К недостаткам указанного способа получения холода можно отнести:

1. относительно низкая энергетическая эффективность;
2. необходимость использования мощного компрессора для получения низких температур.

Перечисленные положительные свойства вихревых труб позволяют придать технологическим системам такие качества, как безопасность, экологичность, технологичность, быстрое действие, простота в изготовлении и эксплуатации. Указанные достоинства уже позволяют конкурировать с парокompрессионными установками [4,5].

По энергетической эффективности и удельной холодопроизводительности вихревые трубы значительно уступают турбинным и парокompрессионным машинам. Поэтому в областях, где холод является постоянной необходимостью, вихревые аппараты неконкурентоспособны по отношению к другим видам холодильной техники. Однако, во многих технологических процессах требуется только периодическая потребность в получении холода: при подогреве термостатированных растворов, обработка зерна от вредителей, охлаждении деталей посадки и тормозов, фрикционных узлов, тиристоров, охлаждение блоков управления программных станков и т.д. [3,6] В этих случаях при отсутствии дополнительных производственных площадей для размещения холодильного оборудования, мелкосерийной продукции, когда нецелесообразно содержать стационарные установки, вихревые холодильники выигрывают по сравнению с фреоновыми.

Можно выделить следующие виды конструкций вихревых труб:

1. разделительные цилиндрические;
2. прямоточные;
3. разделительные конические;
4. охлаждаемые;
5. двухконтурные;
6. с искривленной геометрией.

Принцип работы цилиндрической вихревой трубы [7] заключается в следующем. Газ под высоким давлением подается тангенциально в вихревую камеру через закручивающее устройство. Расширяясь внутри трубы, он организует быстро вращающийся вихрь. Так как диаметр диафрагмы меньше диаметра трубы, то газ начинает двигаться аксиально в сторону конического дросселя по периферийной части трубы. По мере уменьшения закрутки потока по длине трубы возникает обратный градиент давления в приосевой области, вынуждающий газ двигаться от дросселя в сторону диафрагмы.

Особенностью прямоточной вихревой трубы является организация отвода холодного и горячего потоков с одной стороны камеры энергоразделения. Температуры истекающего холодного и горячего потоков для данных труб могут отличаться на 140-230°C. При этом на практике, как правило, используются температуры до -40°C. Данная конструкция оказалась малоэффективной по сравнению с другими и на практике используются редко [3].

Стремление сократить длину вихревой трубы привело к созданию конструкции с конической формой камеры энергоразделения. Угол раскрытия конической части обычно составляет 3° - 6° при длине 5-9 калибров. Исследования вихревых труб данной конструкции показали, что создаваемый ими эффект охлаждения выше, чем у цилиндрической при одинаковых условиях.

С целью увеличения эффективности вихревой трубы путем отбора части тепла периферийного вихря была создана конструкция охлаждаемой трубы. Принцип ее работы основан на том, что энергия отводится не только потоком горячего газа, но и дополнительным охлаждающим веществом. Отбор тепла можно осуществлять путем использования рубашки охлаждения или дополнительного внешнего оребрения.

А.П. Меркулов и Ш.А. Пиралишвили [8] предложили для повышения изоэнтропного КПД вводить в приосевую зону камеры энергоразделения со стороны дросселя дополнительный поток газа. Двухконтурные вихревые трубы позволяют сократить потребляемую мощность на получение заданной холодопроизводительности за счет увеличения расхода холодного воздуха при сохранении температуры.

Вихревая труба с искривленной геометрией пока достаточно редкая конструкция. Она может быть использована в тех случаях, когда, в силу своих габаритов, не могут быть применены трубы стандартной конфигурации. Искривленные вихревые трубы уступают обычным по получаемой разнице температур, но позволяют достичь большей холодопроизводительности [9].

Таким образом, на сегодняшний день существует множество различных типов конструкций вихревой трубы. Но, несмотря на широкое использование эффекта энергоразделения, на данный момент среди ученых нет единого мнения о природе его возникновения. Сложность изучения данного явления связана со сложностью движения потока в вихревой трубе, а также наличием значительных турбулентных пульсаций. Существующие на сегодняшний день гипотезы, объясняющие природу вихревого эффекта, подразделяются на четыре группы:

1. центробежные гипотезы;
2. гипотезы, использующие «Демон Максвелла»;
3. гипотеза радиальных потоков Хилша-Фултона;
4. гипотеза взаимодействия вихрей.

В настоящее время основными методами изучения процессов, происходящих в вихревой трубе, являются экспериментальные исследования и численное моделирование.

Рассматривая проведенные экспериментальные исследования, можно выделить две основные группы: исследования влияния геометрии вихревой трубы и параметров входного потока на ее эффективность и изучение макроструктуры потока. В таблице 1 приведены некоторые результаты опытных изысканий разных лет, начиная с обнаружения вихревого эффекта в 1933 году.

Таблица 1

Сводная таблица экспериментальных исследований вихревых труб [10]

Год	Исследователь	Диаметр вихревой камеры, D, мм	Входное давление, P _i , атм	Температура торможения, °С		Доля массового расхода холодного воздуха μ _c
				T _h -T _i	T _c -T _i	
1933	Ranque	12	7	38	-32	-
1947	Hilsch	4,6	11	140	-53	0,23
1950	Webster	8,7	-	-	-	-
1951	Scheper	38,1	2	3,9	-11,7	0,26
1956-1957	Hartnett, Eckert	76,2	2,4	3,5	-40	-
1956	Мартыновский, Алексеев	4,4/28	12	-	-65	-
1957	Scheller, Brown	25,4	6,1	15,6	-23	0,506
1958	Otten	20	8	40	-50	0,43
1959	Lay	50,8	1,68	9,4	-15,5	0
1960	Suzuki	16	5	54	-30	1
1960	Takahama, Kawashima	52,8	-	-	-	-
1962	Sibulkin	44,5	-	-	-	-
1962	Reynolds	76,2	-	-	-	-
1962	Blatt, Trusch	38,1	4	-	-99	0
1965	Takahama	28/78	-	-	-	-
1966	Takahama, Soga	28/78	-	-	-	-
1968	Vennos	41,3	5,76	-1	-13	0,35
1969	Bruun	94	2	6	-20	0,23
1973	Soni	6,4/32	1,5/3	-	-	-
1982	Schlenz	50,8	3,36	-	-	-
1983	Stephan и др.	17,6	6	78	-38	0,3
1983	Amitani и др.	800	3,06	15	-19	0,4
1988	Negm и др.	11/20	6	30	-42	0,38
1994	Ahlborn и др.	18	4	40	-30	-
1996	Ahlborn и др.	25,4	2,7	30	-27	0,4
2001	Guillaume, Jolly III	9,5	6	-	-17,37	0,4
2003	Saidi, Valipour	9	3	-	-43	0,6

2004	Promvonge, Eiamsa-ard	16	3,5	-	33	0,33
2005	Promvonge, Eiamsa-ard	16	3,5	25	30	0,38
2005	Aljuwaihel и др.	19	3	1,2	-11	0,1
2010	Valipour, Niazi	19,05	3	26	-21	0,3
2007	Dincer	9	3	$T_h - T_c = 56$		0,9
2011	Dincer	6x9	4	$T_h - T_c = 67,6$		0,9
2012	Xue и др.	60	2,6	1,4	-7,2	-

С развитием методов численного решения задач гидрогазодинамики некоторые исследователи перешли к изучению вихревого эффекта путем математического моделирования на основе уравнений Навье-Стокса и законов сохранения. Особенно активное развитие это направление исследований получило с конца 90-х гг. с появлением вычислительной техники достаточной производительности. Первые модели имели большое количество допущений и показывали только качественную сходимость. С развитием компьютерной техники стали применяться более точные модели, обеспечившие более достоверные результаты численных экспериментов (таблица 2).

Таблица 2

Сводная таблица экспериментов по численному моделированию [10]

Исследователи	Модель потока	Модель вязкости	Сходимость результатов с натурными экспериментами
Linderstrom-Lang (1971)	Несжимаемый	Алгебраическая модель вязкости	Сходимость низкая, но улавливается тенденция к сходимости
Schlenz (1982)	2D, сжимаемый	Алгебраическая модель вязкости	Низкая, но качественная сходимость
Amitani и др. (1983)	2D, сжимаемый	Алгебраическая модель вязкости	Достаточная, но предположения сомнительны
Борисов и др. (1993)	Несжимаемый	Алгебраическая модель вязкости	Качественная сходимость
Guston, Bakken (1999)	2D, сжимаемый	к-ε модель	Достаточно высокая
Frohlingsdorf, Unger (1999)	2D, сжимаемый	к-ε модель	Достаточно высокая

Promvonge (1999)	2D, сжимаемый	ASM и k-ε модели	Высокая
Behera и др. (2005)	3D, сжимаемый	k-ε и RNG k-ε модели	Достаточно высокая
Aljuwailhel и др. (2005)	2D, сжимаемый	k-ε и RNG k-ε модели	Достаточно высокая
Skye и др. (2006)	2D, сжимаемый	k-ε и RNG k-ε модели	Достаточно высокая
Eiamsa-ard, Promvonge (2006)	2D, сжимаемый	ASM и k-ε модели	Высокая
Secchioli, Ricci, Montelpare, D'Alessandro (2009)	2D, 3D, сжимаемый	RNG k-ε, RSM (для 2D), LES (для 3D) модели	Достаточно высокая
Baghdad, Ouadha, Imine, Addad (2011)	3D, сжимаемый	k-ε, k-ω, SST k-ω, RSM модели	Достаточно высокая (k-ε, k-ω, SST k-ω) Высокая (RSM)
Bovand, Valipour, Dincer, Tamayol (2013)	3D, сжимаемый	RNG k-ε модель	Достаточно высокая

Таким образом, вихревые трубы продолжают оставаться актуальным объектом изучения для исследователей. В настоящее время, в силу невысокой энергетической эффективности, охладителям подобного типа сложно конкурировать с традиционными холодильными установками. Однако, четкое понимание процессов, вызывающих вихревой эффект, позволит создать более точную математическую модель явлений, происходящих в вихревой трубе. Это, в свою очередь, даст возможность повысить энергоэффективность установок на основе трубы Ранка-Хилша, а также проводить оценку производительности разрабатываемых охладителей на ранних этапах проектирования.

Список литературы

1. Пархимович А.Ю. Имитационное моделирование температурной стратификации закрученных потоков в вихревых хладогенераторах: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.04.13 / Пархимович А.Ю.; Уфимский гос. авиационный техн. ун-т. – Уфа, 2008. – 124 с.
2. Ховалыг Д.М., Сеницына К.М., Бараненко А.В., Цой А.П. Энергоэффективность и экологическая безопасность техники низких температур // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. – 2014. - №1. – С. 2.
3. Хаит А.В. Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.04.13 /

- Хаит А.В.; Уральский фед. ун-т им. первого президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2012. – 199 с.
4. Носков А.С., Хаит А.В., Бутымова А.П., Плешков С.Ю., Ловцов А.В. Энергоэффективность и экономическая целесообразность применения систем искусственного климата на базе вихревой трубы // Инженерно-строительный журнал. – 2011. - №1. – С. 17-23.
 5. Носков А.С., Алехин В.Н., Ловцов А.В., Хаит А.В. Энергетическая эффективность систем искусственного климата на базе вихревой трубы // Академический вестник Уралниипроект РААСН. – 2011. - №3. – С. 65-69.
 6. Азаров А.И. Вихревые трубы в промышленности. Изобретатель – машиностроению. Энергосбережение и вихревой эффект: исследование и освоение инновационных проектов. – СПб.: Изд-во ЛЕМА, 2010. – 170 с.
 7. Алексеев Г.В. Математические методы в пищевой инженерии: Учебное пособие/ Г.В. Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Лукин Н.И. – СПб.: Лань, 2012. – 176 с.
 8. Меркулов, А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – М.: Машиностроение, 1969. – 184 с.
 9. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 414 с.
 10. M.S. Valipour, N. Niazi. Experimental modeling of a curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator// Int. J. Refrig. 34 (4) (2011) P.1109-1116.
 11. S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes// Renew. Sustain. Energy Rev. 12 (7) (2008) P.1822-1842.

References

1. Parhimovich A.Y. Simulation of temperature stratification of swirled flow in the vortex cold generators. – Ufa, 2008. – 124 p.
2. Khovalyg D.M., Sinitsyna K.M., Baranenko A.V., Tsoi A.P. Energy efficiency and ecological safety technicians of low temperature. *Science Journal of University ITMO Institute of Refrigeration and Biotechnologies*. – 2014. - №1. – P. 2.
3. Chait A.V. Research of energy separation effect in purpose of improvement of vortex tube. – Ekaterinburg, 2012. – 199 p.
4. Noskov A.S., Chait A.V., Butymova A.P., Pleshkov S.Y., Lovtsov A.V. Energy effectiveness and economics expediency of using of climatic systems based on vortex tube. *Magazine of civil engineering*. – 2011. - №1. – P. 17-23.
5. Noskov A.S., Alekhin V.N., Lovtsov A.V., Chait A.V. Energy efficiency of the climatic systems based on vortex tube and ways for its increasing. *Journal " Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN"*. – 2011. - №3. – P. 65-69.

6. Azarov A.I. Азаров А.И. Vortex tubes in industry. Researcher for engineering. Energy saving and vortex effect: research and development of innovative projects. – SPb.: LEMA, 2010. – 170 p.
7. Alex G.V. The Mathematical methods in food инженерии: Scholastic allowance. G.V. Alex G.V., Voronenko B.A., Lukin N.I. - SPB.: Fallow deer, 2012. - 176 s.
8. Merkulov A.P. Vortex effect and its using in industry. – M.: Mashinostroenie, 1969. 184 p.
9. Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M., Sergeev M.N. Vortex effect: experiment, theory, technical solutions – M.: ESPC «Energomash», 2000. – 414 p.
10. M.S. Valipour, N. Niazi. Experimental modeling of a curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator. Int. J. Refrig. 34 (4) (2011) P.1109-1116.
11. S. Eiamsa-ard, P. Promvonge. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes. Renew. Sustain. Energy Rev. 12 (7) (2008) P.1822-1842