

УДК 697.934

М. В. БОДРОВ, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой отопления и вентиляции;
И. П. ГРИМАЛОВСКАЯ, канд. техн. наук, доц. кафедры отопления и
вентиляции; **А. А. СМЫКОВ**, канд. техн. наук, доц. кафедры отопления и
вентиляции; **А. Н. ПЫЛАЕВ**, аспирант кафедры отопления и вентиляции

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ВИХРЕВЫХ ТРУБ КАК ГЕНЕРАТОРОВ ХОЛОДА

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-85; факс: (831) 430-19-36; эл. почта: tes84@inbox.ru

Ключевые слова: вихревая труба, осушка воздуха, холодопроизводительность, генерация холода.

На основе термодинамического анализа приведены способы оценки вихревых труб как экологически чистых генераторов холода. Приведена конструкция и рассмотрены принципы работы охлаждаемой вихревой трубы, рассмотрен регенеративный принцип в вихревых охлаждающих аппаратах.

При рассмотрении вопроса использования вихревых труб (ВТ) в системах кондиционирования воздуха, авторами была поставлена задача изучения природы возникновения вихревого эффекта энергетического разделения потока сжатого воздуха [1]. В настоящее время наиболее полно физическая сущность вихревого эффекта описана гипотезой взаимодействия вихрей, выдвинутой проф. А. П. Меркуловым [2]. Основные положения этой гипотезы сводятся к следующему: после истечения из тангенциальных сопел поток воздуха образует свободный вихрь, который распространяется до определенного радиуса и смещается по оси ВТ к дросселю.

Свободный вихрь является устойчивым к силам внутреннего трения и не разрушается ими, вихрь может начать разрушаться только на своих радиальных границах за счет трения о стенку и взаимодействия с приосевыми элементами. Интенсивность его при этом падает из-за снижения окружных скоростей при движении вихря вдоль трубы к дросселю (рис. 1), уменьшается радиальный градиент статического давления в вихревом потоке и вихрь все более распространяется к оси.

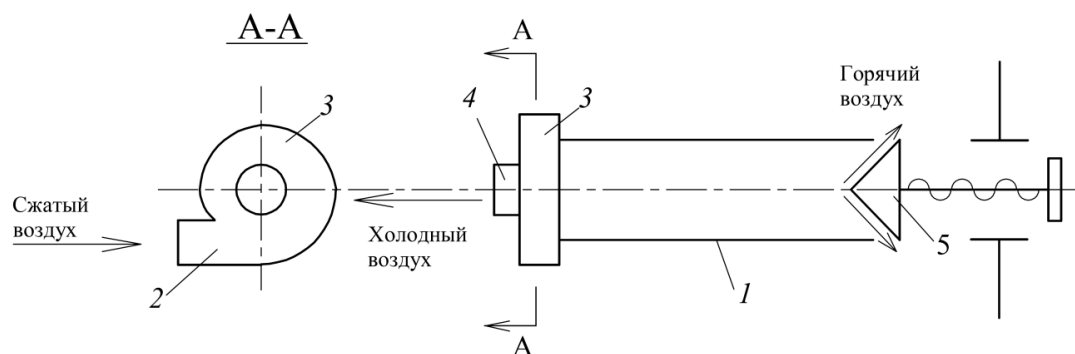


Рис. 1. Расчетная схема прямоточной вихревой трубы: 1 – цилиндрическая или коническая труба; 2 – тангенциальное сопло; 3 – улитка; 4 – диафрагма с осевым отверстием; 5 – дроссель

Уменьшение радиального градиента, в свою очередь, вызывает осевой градиент статического давления, который вынуждает попавший в приосевую область воздух изменять свое первоначальное направление осевого движения на противоположное и двигаться к сопловому сечению.

В процессе перехода в приосевую область элементы газа интенсивно турбулизуются. Высокая турбулентная вязкость вынуждает обратный приосевой поток вращаться по закону вращения твердого тела $\omega = \text{const}$ (где ω – угловая скорость, сек^{-1}). Обратный приосевой поток по мере продвижения к сопловому сечению закручивается все более интенсивным свободным вихрем.

Кроме передачи кинетической энергии вращения от свободного к вынужденному вихрю между ними происходит интенсивный турбулентный теплообмен при высоком градиенте статического давления, нормального к средней скорости движения потока.

Перемещение турбулентного элемента газа с радиуса на радиус происходит за счет радиальной турбулентной пульсационной скорости, при этом, попадая в зону более высокого или низкого давления, элемент газа будет изотропно сжиматься или расширяться.

Если после перемещения температура элемента газа окажется отличной от температуры окружающих ее элементов, то произойдет нагревание или охлаждение их, т.е. турбулентные элементы совершают холодильные циклы, отдавая тепло периферийным слоям, источником механической энергии является турбулентность.

Турбулентный перенос тепла прекратится ($q = 0$) при достижении изотропного распределения температуры T по радиусу r :

$$\frac{dT}{dr} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dr}, \quad (1)$$

где k – показатель изоэнтропы; p – давление газа, Па.

Эта гипотеза позволяет оценить предельные возможности вихревого эффекта в предположении, что в сопловом сечении полностью завершился энергообмен между вихрями.

Используя законы распределения скоростей по радиусу для свободного и вынужденного вихрей, условия механического равновесия газа, изэнтропного распределения статической температуры по радиусу вынужденного вихря, механической и тепловой сопряженности вихрей, можно получить выражения для распределения параметров по радиусу соплового сечения, а при заданной геометрии – определить среднеинтегральные температуры холодного и горячего потоков вихревой трубы, как функцию от весовой доли μ холодного потока:

$$\mu = \frac{G_x}{G_1}, \quad (2)$$

где G_x , G_1 – секундные массовые расходы холодного потока и через входные сопла соответственно.

Расчетная температура холодного потока газа T_x^* является функцией следующих величин:

$$T_x^* = f(T_1^*, p_1^*, p_x, k, \bar{F}_c, \bar{d}_d, \mu), \quad (3)$$

где T_1^* , p_1^* – полные температура и давление сжатого газа перед соплами;

p_x – давление холодного потока;

$\bar{F}_c = \frac{4 \cdot F_c}{\pi \cdot D^2}$ – относительная площадь сопла вихревой трубы;

D – диаметр вихревой трубы;

$\bar{d}_d = \frac{d_d}{D}$ – относительный диаметр отверстия диафрагмы.

Основными величинами, характеризующими основные термодинамические свойства ВТ, являются относительная температура холодного потока θ_x и степень расширения газа в вихревой трубе π :

$$\theta_x = \frac{T_x^*}{T_1^*}; \quad \theta_x = f(\pi, \mu, \bar{F}_c, \bar{d}_d); \quad (4)$$

$$\pi = \frac{p_1^*}{p_x}. \quad (5)$$

Основой энергоразделения в вихревой является необратимый турбулентный перенос, поэтому энергетическая эффективность вихревой трубы довольно низкая. Для оценки термодинамического совершенства вихревой трубы ее работу сравнивают с различными процессами.

Наиболее широко распространено сравнение эффекта охлаждения в вихревой трубе с эффектом охлаждения при изэнтропном расширении от параметров входящего потока газа до давления холодного потока.

Температурная эффективность η представляет собой отношение температурного эффекта охлаждения ΔT_x к эффекту охлаждения при изэнтропном расширении ΔT_S [3]:

$$\eta = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_S}; \quad (6)$$

$$\Delta T_x = T_1^* - T_x^*; \quad \Delta T_s = T_1^* \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (7)$$

По данным аналитических расчетов и экспериментальным данным проф. А. П. Меркулова [2], оптимальные значения коэффициента температурной эффективности лежат в пределах $\eta = 0,5 \dots 0,6$.

Сравнение холодопроизводительности вихревой трубы и идеальной турбины возможно проводить, используя величину энергетического или адиабатного к.п.д. η_e :

$$\eta_e = \mu \cdot \eta. \quad (8)$$

Проведенный авторами анализ применения расчетного адиабатного к.п.д. η_e позволяет сделать вывод, что экономически выгодно использовать вихревую трубу при больших значениях μ и больших значениях $\bar{d}_d$, где вихревая труба может дать наибольшее значения η_e . Наиболее высокое значение адиабатного к.п.д. η_e в теплоизолированных цилиндрических вихревых трубах достигает величины $\eta_e = 0,235$, в конических вихревых трубах – $\eta_e = 0,26 \dots 0,28$ [4].

Для улучшения термодинамических характеристик вихревой трубы целесообразно применять охлаждаемые вихревые трубы, работающие на $\mu = 1,0$. При довольно высокой температурной эффективности они могут охлаждать весь подаваемый в них поток сжатого воздуха.

Общий вид охлаждаемой вихревой трубы приведен на рис. 2. Она состоит из трубы 1 (цилиндрической или конической), тангенциальных сопел 2, диафрагмы 4 с центральным отверстием, регулирующего вентиля (дросселя) 5, охлаждающей рубашки 6, входа и выхода воды 7 и 8.

С помощью регулирующего вентиля в охлаждаемой вихревой трубе можно весь поток направить в отверстие диафрагмы ($\mu = 1,0$). В этом случае охлаждение газа осуществляется за счет передачи тепла свободным вихрем охлаждающей жидкости.

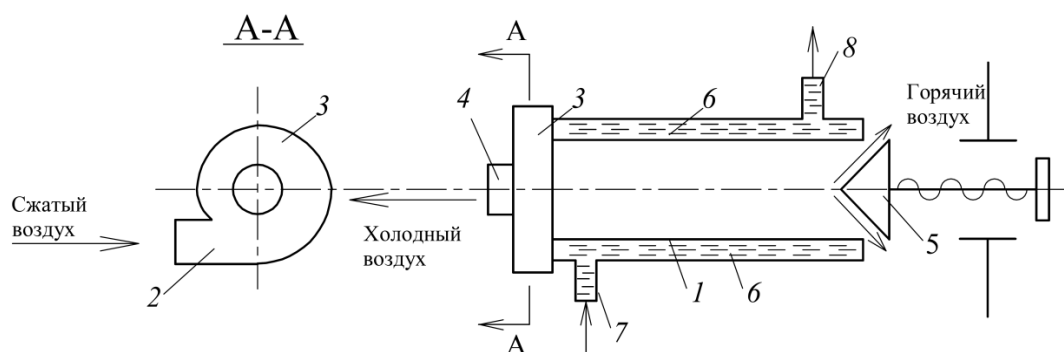


Рис. 2. Расчетная схема охлаждаемой вихревой трубы: 1...5 – см. данные на рис. 1; 6 – охлаждаемая водой рубашка вихревой трубы; 7 – вход охлаждаемой воды; 8 – выход охлаждаемой воды



В результате проведенных исследований авторами получено значение $\eta_e = 0,23$ при $\mu = 1,0$, а при применении конической охлаждаемой вихревой трубы с углом раскрытия $\gamma = 3,6^\circ$ можно достигнуть высокого значения адиабатного к.п.д. $\eta_e = 0,26$.

Ввиду того, что в процессе охлаждения объекта холодный воздух выходит из камеры холода с довольно низкой температурой, его можно использовать для предварительного охлаждения сжатого воздуха, подаваемого в вихревую трубу, т.е. использовать физический принцип регенерации. Существенной особенностью регенеративного цикла с вихревой трубой является то, что на регенерацию холода подается только μ кг холодного воздуха, в то время как на вход в трубу подается 1 кг сжатого воздуха. Эта особенность значительно повышает возможности достижения более низких температур вихревыми холодильниками.

В работе [5] авторами приводится методика расчета вихревой трубы совместно с теплообменником, а также системы уравнений, описывающих работу установки по этой методике, а также можно построить распределение температуры по всему тракту вихревого аппарата.

В качестве *выводов* по проведенным исследованиям отметим, что для создания экономичной энергоэффективной охлаждающей установки с довольно высокой температурной эффективностью необходимо применять охлаждаемые вихревые трубы, работающие с возможно большим значением μ (в пределе $\mu = 1$), в регенеративных схемах. Для решения этой задачи, авторами планируется проведение следующих экспериментальных и теоретических исследований.

1) Провести с помощью лабораторной базы ННГАСУ экспериментальные исследования работы охлаждаемой вихревой трубы при различных температурах охлаждающей жидкости, работающей на $\mu = 1$.

2) Теоретически исследовать предельные возможности регенеративного цикла вихревой холодильной установки с охлаждаемой вихревой трубой цилиндрического и конического типов.

3) Апробировать на практике методику расчета [5] регенеративного цикла вихревой установки с охлаждаемой вихревой трубой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бодров, М. В. Применение вихревых труб для охлаждения насыпи сочного растительного сырья / М. В. Бодров, А. Н. Пылаев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – 2023, № 4. – С. 107–113.
2. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 183 с. – Текст: непосредственный.
3. Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1970. – Том 1. – 492 с. – Текст : непосредственный.
4. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 256 с. – Текст : непосредственный.
5. Термодинамическое обоснование применения вихревых труб в системах кондиционирования воздуха / М. В. Бодров, И. П. Грималовская, М. С. Морозов, А. Н. Пылаев. – Текст: непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – 2025, № 1. – С. 69–76.



BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, associate professor, holder of the chair of heating and ventilation; GRIMALOVSKAYA Irina Pavlovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heating and ventilation; SMYKOV Aleksandr Anatolevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heating and ventilation; PYLAEV Aleksandr Nikolaevich, postgraduate student of the chair of heating and ventilation

METHODS FOR EVALUATING THE OPERATION OF VORTEX TUBES AS COLD GENERATORS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: +7 (831) 430-54-92; fax: +7 (831) 430-19-36; e-mail: tes84@mail.ru.

Key words: vortex tube, air drying, cooling capacity, cold generation.

Based on thermodynamic analysis, methods for evaluating vortex tubes as environmentally friendly cold generators are presented. The design is given and the principles of operation of a cooled vortex tube are considered, the regenerative principle in vortex cooling devices is considered.

REFERENCES

1. Bodrov M. V., Pylaev A. V. Primenenie vihrevykh trub dlya ohlazhdeniya nasypi sochnogo rastitelnogo syrya [The use of vortex tubes for cooling a mound of juicy vegetable raw materials]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Volga Scientific Journal], NNGASU, Nizhny Novgorod, 2023, № 4, P. 107–113.
2. Merkulov A. P. Vihrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 183 p.
3. Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum mechanics]. Tom 1. Moscow, Nauka, 1970. 492 p.
4. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V., Chizhikov Yu. V. Vihrevye apparaty [Vortex apparatuses]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 256 p.
5. Bodrov M. V., Grimalovskaya I. P., Morozov M. S., Pylaev A. N. Termodinamicheskoe obosnovaniye primeneniya vihrevykh trub v sistemakh kondicionirovaniya vozduha [Thermodynamic justification of the use of vortex tubes in air conditioning systems]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal], 2025, № 1, P. 69–76.

© М. В. Бодров, И. П. Грималовская, А. А. Смыков, А. Н. Пылаев, 2025

Получено: 05.04.2025 г.