

Л и т е р а т у р а

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. ГТИ, т.1. М.-Л., 1948.
2. Иваненко Д.Д., Соколов А.А. Классическая теория поля. Гостехиздат, 1951.
3. Чарный И.А. К теории вихревого холодильника. Известия АН СССР, отн. №6, 1962.

В.В. Бирюк, В.Е. Вилякин •

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДАЕМОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Для оценки возможности и преимуществ использования охлаждаемой вихревой трубы необходимо изучить влияние конструктивных факторов на её эффективность. Экспериментальные исследования проводились на стенде для испытания вихревых труб. Стенд позволяет подавать сжатый воздух под давлением $P_1 = 0,1 - 0,9$ МПа с температурой $T = 233 - 373$ К на вход в вихревую трубу.

Во время эксперимента замерялись массовый расход воздуха, давление и температура воздуха, массовый расход охлаждающей воды, температура охлаждающей воды и стенок горячего конца вихревой трубы.

В результате испытаний были определены оптимальные геометрические параметры охлаждаемой вихревой трубы $d = 30$ мм и диффузора холодного потока [1], при работе вихревой трубы на $\mu = 1$.

Так как при работе охлаждаемой трубы охлаждение потока достигается за счет теплопередачи на горячем конце трубы, длина его играет существенную роль. При определении влияния длины горячего конца на температурный эффект охлаждения испытывалась вихревая труба с различными величинами приведенной длины горячего конца

$l = 14, 20, 24, 30$. Для вихревой трубы с углом конусности $\gamma = 3^\circ$ при работе в интервале $\pi = 3 - 4,5$ с диффузором на холодном конце оптимальной длиной является $l = 24$. При длине вихревой зоны меньшей оптимальной потери кинетической энергии свободного вихря невелики, но площадь поверхности для теплопередачи тоже

мала и не обеспечивает достаточный теплосъём. При увеличении длины вихревой зоны, больше оптимальной, потери кинетической энергии в свободном вихре возрастают за счет трения о стенку, а интенсивность турбулентного переноса тепла становится недостаточной для обеспечения необходимого теплосъёма.

Значительный интерес представляет влияние угла конусности горячего конца на эффективность работы охлаждаемой вихревой трубы. Были исследованы вихревые трубы с углом конусности $\gamma = 0^\circ$; $1^\circ 36'$; 3° ; 6° . Цилиндрическая охлаждаемая вихревая труба при работе на $\mu = 1$ работала очень неустойчиво, температурный эффект охлаждения был в пределах $\Delta t_x = 10 - 15^\circ$. Данные о неустойчивом режиме работы цилиндрической трубы на $\mu = 1$ приводились и в [2]. Оптимальным углом раствора горячего конца трубы для охлаждаемой вихревой трубы является $\gamma = 3^\circ$, такой же угол конусности является оптимальным для неохлаждаемой трубы [3] длиной $l = 14$.

Оптимальный угол конусности обеспечивает цилиндрическую форму обратного осевого потока, движущегося к диафрагме. При малом угле конусности периферийные слои поджимают осевой поток, увеличивается давление на горячем конце, происходит запираание вихревой зоны. Поток разворачивается раньше, не доходя до дроссельного вентиля, кроме того уменьшается площадь боковой поверхности вихревой зоны.

При угле конусности больше оптимального увеличиваются потери за счет трения потока о стенку, происходит отрыв периферийного потока от стенок трубы, смещение его с осевым потоком — теплоотдача ухудшается.

По данным [4], чем чище обработана внутренняя поверхность вихревой трубы, тем эффективнее ее работа. Рекомендуется внутренняя полировка горячего конца вихревой трубы.

В другом источнике [5] говорится, что чистота изготовления внутренней поверхности вихревой трубы не оказывает существенного влияния на ее работу. Так, нарезка резьбы на внутренней поверхности вихревой трубы ухудшила температурный эффект охлаждения всего на 10 - 20%. В случае применения охлаждаемой вихревой трубы наибольшее термическое сопротивление возникает при теплоотдаче от периферийного вихря к внутренней поверхности горячего конца [6].

Оребрение её должно увеличить площадь теплопередающей поверх-

ности и улучшить работу охлаждаемой вихревой трубы в целом.

Однако оребрение вихревой трубы $\bar{l} = 24$ не принесло положительных результатов, так как эта длина оптимальная для гладких труб при исследованном перепаде давления $\pi = 3 - 4,5$. Нарезка на горячем конце увеличивала боковую поверхность трубы. Иные результаты получены при испытании трубы длиной $\bar{l} = 14$. Вихревая труба $\bar{l} = 14$ оребрялась со стороны дросселя канавками. Приведенные длины оребренной части и величина коэффициента оребрения внутренней поверхности трубы были соответственно

$$\bar{l}_{op} = 3,5; K_{op} = 1,2; \bar{l}_{op} = 7; K_{op} = 1,37.$$

Оребрение короткой трубки $\bar{l} = 14$ позволило увеличить температурный эффект охлаждения особенно при больших степенях расширения. При достижении определенной степени расширения π энергия подаваемого потока недостаточна для преодоления трения по нарезанной поверхности и температурный эффект охлаждения несколько уменьшается. Необходимо отметить, что приведенная боковая площадь короткой трубы приближалась к оптимальной приведенной площади трубы с $\bar{l} = 24$, равной $F_{\sigma} = 146$; $\bar{l} = 14$, $F_{\sigma} = 76,4$; $\bar{l} = 14$, $\bar{l}_{op} = 3,5$; $F_{\sigma} = 91,5$; $\bar{l} = 14$, $\bar{l}_{op} = 7$, $F_{\sigma} = 121$.

Следовательно, зону вихревого течения можно сократить за счет оребрения внутренней поверхности до оптимального значения $F_{\sigma} = 146$ при начальном диаметре трубы $d = 30$ мм, оставив начальный участок (прилегающий к соплам) неоребранным.

При уменьшении масштаба вихревой трубы, как указывается в [7], ухудшается эффект охлаждения холодного потока за счет увеличения влияния подмешивания пограничного слоя диафрагмы к холодному потоку. Значительный интерес представляет влияние масштабного фактора на эффективность охлаждаемой вихревой трубы. Нами была исследована зависимость температурной эффективности вихревых труб диаметром $d = 10$ и 30 мм. В интервале степеней расширения $\pi = 3 - 6$ при $\mu = 1$ эффект охлаждения вихревой трубы $d = 10$ мм отличается от температурного эффекта охлаждения трубы $d = 30$ мм соответственно на $0,4 - 1,5^{\circ}$ ($\tau_t = 0,03 - 0,06$), т.е. влияние масштабного фактора у охлаждаемых труб сказывается значительно слабее, чем у неохлаждаемых. Если у неохлаждаемых труб разница в эффекте охлаждения при $\pi = 5$ и $\mu = 0,6$ достигает 11° при изменении

диаметров с 10 до 30 мм [7], то у охлаждаемых труб при тех же условиях эффект охлаждения отличается на 2°. Это происходит за счет того, что у охлаждаемых труб определяющим фактором является отношение боковой поверхности горячего конца к площади соплового сечения вихревой трубы. Определяющая относительная площадь остается при изменении диаметра постоянной. В нашем случае $\bar{F}_d = 76,4$. Влияние же пограничного слоя диафрагмы сказывается у охлаждаемых вихревых труб слабее, чем у неохлаждаемых, так как при $\mu = 1$ весь поток охлаждается и выходит через отверстие диафрагмы. Но на малых μ , когда влияние охлаждения уменьшается, разница в эффекте охлаждения увеличивается и достигает μ неохлаждаемых вихревых труб.

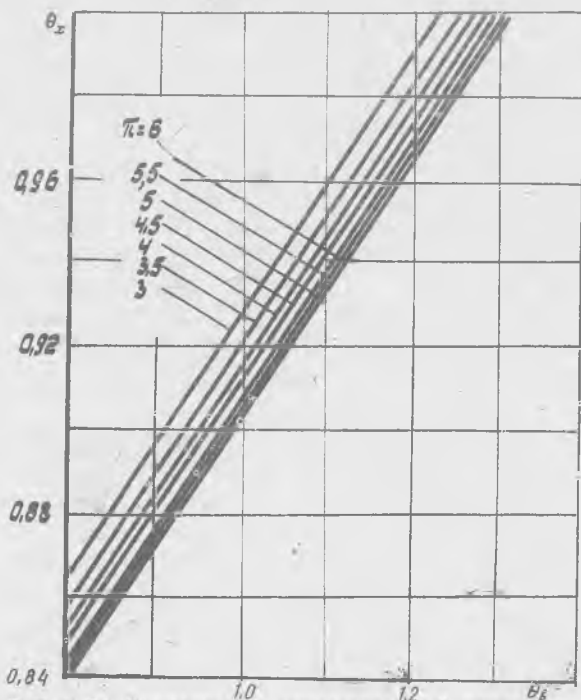
Для сопоставления характеристик были проведены подробные исследования неохлаждаемой конической вихревой трубы и охлаждаемой с $L = 14$. Анализируя их, можно отметить, что охлаждаемая вихревая труба работает более эффективно начиная с $\mu = 0,62 - 0,73$ до $\mu = 1$ в диапазоне $\pi = 3 - 6$. Затем, с уменьшением μ эффективность работы охлаждаемой трубы ухудшается. Это объясняется уменьшением влияния охлаждения при работе на малых μ и разницей в оптимальных геометрических размерах вихревых труб: у неохлаждаемой трубы $F_c = 0,1$, $d_g = 0,5$; у охлаждаемой $F_c = 0,07$, $d_g = 0,567$.

В неохлаждаемых вихревых трубах влияние давления подаваемого в вихревую трубу сжатого газа P_1 и давления холодного потока за отверстием диафрагмы P_x не является определяющим. Решающее влияние на работу неохлаждаемой вихревой трубы оказывает отношение этих давлений $\pi = \frac{P_1}{P_x}$. При постоянном π и снижении уровня давления P_1 и P_x эффект охлаждения незначительно уменьшается, что объясняется снижением общего расхода. В охлаждаемых трубах при уменьшении уровня давлений температурный эффект охлаждения несколько возрастает. Улучшение эффективности вихревой трубы происходит за счет того, что уменьшается полный расход воздуха через трубу. Так как площадь теплопередающей поверхности остается постоянной, то меньшее количество воздуха охлаждается до более низкой температуры. При малых μ , когда влияние охлаждения незначительно, характеристики охлаждаемой вихревой трубы вырождаются в характеристики неохлаждаемой трубы.

Существенное влияние на работу охлаждаемой вихревой трубы

оказывает изменение температуры на входе в охлаждающую рубашку и расход охлаждающей жидкости.

В охлаждаемой вихревой трубе, работающей на $\mu = 1$, эффект охлаждения определяется только передачей тепла от охлаждаемого газа и охлаждающей жидкости и температурой сжатого воздуха на входе (T_8 / T_1), зависит от отношения температуры охлаждающей жидкости. Можно отметить, что температурный эффект будет равен нулю в случае, когда отношение средней температуры воды к температуре воздуха на входе будет $\theta_c = \frac{T_8}{T_1} = 1,237$ для $\pi = 3,5$. На рис. I



Р и с. I. Зависимость относительной температуры холодного потока от относительной температуры охлаждающей жидкости;

$\bar{c} = 24$; $\mu = 1$; $\bar{\Delta} = 0,1$; $D = 30$ мм; $d_a = 0,57$; $P_x = 0,11$ МПа; $\bar{D}_{\text{эф}} = 5$

для исследованной вихревой трубы с $\bar{c} = 24$ при работе её на $\mu = 1$, приведен график зависимости ($\frac{T_x}{T_1}$) относительной

температуры холодного потока от приведенной температуры охлаждающей жидкости при различных значениях степени расширения в вихревой трубе.

В ы в о д ы

1. В результате экспериментов по исследованию охлаждаемой вихревой трубы с диффузором на холодном конце, работающей на $\mu = 1$, выявлено влияние конструктивных и термодинамических параметров на её характеристики. Установлено, что охлаждаемая вихревая труба работает более эффективно по сравнению с неохлаждаемой в области $\mu = 0,6 - 1$, где наиболее существенно сказывается влияние охлаждения.

2. Получены обобщенные зависимости относительной температуры холодного потока (θ_x) как функции от относительной температуры охлаждающей жидкости (θ_f), позволяющие рассчитывать, как автономные охлаждаемые вихревые трубы, так и основанные на них регенеративные установки.

3. Определено, что в охлаждаемых вихревых трубах влияние масштабного фактора сказывается существенно меньше, чем в неохлаждаемых, за счет уменьшения влияния пограничного слоя диафрагмы с ростом μ .

4. Показана возможность уменьшения длины охлаждаемой вихревой трубы, обладающей оптимальной конусностью ($\gamma = 3^\circ$) за счет оребрения внутренней поверхности горячего конца.

Л и т е р а т у р а

1. Б и р ю к В.В., В и л я к и н В.Е. Исследование работы вихревой конической трубы с охлаждением горячего конца. Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленного применения. Куйбышев, 1974.
2. Hefner F.E., Characteristics of Jacketed vorten Tube. *Ashrae Journal*, vol 1, no 9, sept 1959.
3. Б о р и с е н к о А.И., С а ф о н о в В.А., Я к о в л е в А.И. Влияние геометрических параметров на характеристики конического вихревого холодильника. ИЖ, 1968, № 6.
4. Webster U.S. *An analysis of the Hilsch vorten Tube*, Refrigerating Engineering Febz 1950

5. Pazulekas V.B., *Reformation of Shaft varten Tube, Gonst Engzs (Indis) no 4. 1960.*
6. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Исследование параметров вихревого потока внутри трубы Ранка-Хилша, ИЖХ, т. XII, 1967, №5.
7. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М., "Машиностроение", 1969.

А.П. Меркулов, В.М. Кудрявцев, В.Г. Шахов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ЗАМЕРОВ ПАРАМЕТРОВ ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ
В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Принятые обозначения

v_x, v_y, v_z	- компоненты вектора осредненной скорости
G_x, G_r	- расходы холодного и основного потоков в вихревой трубе
μ	- относительный расход холодного потока
r, φ, z	- координаты цилиндрической системы
p	- давление
ρ	- плотность
τ_{ij}	- тензор напряжений
τ^l	- ламинарная составляющая тензора напряжений
ε_{ij}	- компоненты турбулентной вязкости
ν	- молекулярная вязкость

Экспериментальные исследования внутренней структуры осредненного течения в вихревой трубе позволяют получить поле основных характеристик газового потока - статического давления, плотности, компонент вектора скорости и температуры.

Это дает возможность приближенно рассчитать относительный порядок величин членов уравнений движения Рейнольдса и, в конечном счете, оценить турбулентные касательные напряжения в вихревой зоне.

Метод такой оценки описан в работе [1] и позволяет, используя лишь экспериментальные данные и не привлекая какие-либо гипотезы турбулентности проанализировать её влияние на осредненное течение, не рассматривая её детальной структуры. Авторы [1] указывают, что данный метод является распространением результатов *Hinze* и *Hegge Zijnen* [2] для незакрученных потоков на случай закрученных тече-