

УДК 629.7.05(075)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ КАК ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

© 2008 В.П. Алексеенко

Поволжское отделение секции прикладных проблем РАН, г. Самара

В статье рассматриваются вопросы исследования влияния геометрических параметров и режимных факторов на работу охлаждаемой вихревой трубы.

Вихревые системы термостатирования (ВСТ) просты по конструкции, надежны в эксплуатации и имеют высокий ресурс работы по сравнению с другими системами принудительного охлаждения. В системы могут входить вихревые энергоразделители различных конструкций, например охлаждаемая вихревая труба (ОВТ). Для оценки влияния режимных факторов и выбора оптимальных геометрических соотношений ОВТ были проведены ее экспериментальные исследования.

Схема экспериментальной ОВТ представлена на рис. 1 и состоит из следующих частей: 1 – входной патрубков вихревой трубы; 2 – входное устройство с регулируемой трехсопловой улиткой; 3 – горячий конец вихревой трубы; 4 – кожух; 5 – вентиль подвода воды; 6 – устройство, обеспечивающее постоянный расход охлаждающей воды; 7 –

вентиль, регулирующий расход охлаждающей воды; 8 – вентиль слива избыточной воды; 9 – магистраль подвода охлаждающей воды; 10 – магистраль отвода охлаждающей воды; 11 – дроссельный вентиль горячего потока; 12 – устройство замера расхода горячего потока, измерительным элементом которого являются нормальные расходные сопла; 13 – сменная диафрагма вихревой трубы; 14 – передняя щека диффузора; 15 – задняя щека диффузора; 16 – штифт направляющий; 17 – болт регулирующий; 18 – ресивер холодного потока; 19 – теплоизоляция; 20 – вентиль; 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 – термопары хромель-копелевые; 29, 30, 31 – приемники давления.

Работа установки осуществляется следующим образом: сжатый воздух, подготовленный на стенде, поступает через входной пат-

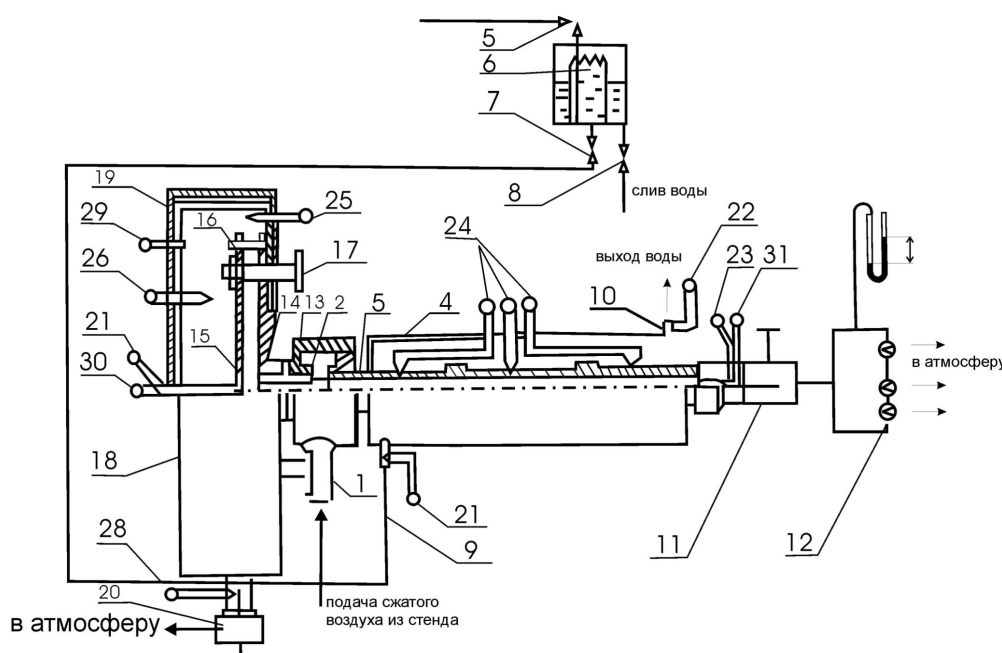


Рис. 1. Охлаждаемая вихревая труба на испытательном стенде

рубок 1 (рис. 1) на входное устройство ОВТ 2. Пройдя через сопловые входы в вихревую трубу, интенсивно закрученный поток движется к дроссельному вентилю 11, передавая тепло охлаждающей воде, подаваемой между кожухом 4 и горячим концом вихревой трубы 3. Охлаждающая вода подается через вентиль 5 в устройство для обеспечения ее постоянного расхода 6. Излишки воды сливаются через сливной вентиль 8. Регулирующий вентиль 7 обеспечивает необходимый расход охлаждающей воды, которая затем по магистрали 9 подается в кожух и по магистрали 10 удаляется из него.

Холодный поток из вихревой трубы через отверстие диафрагмы 13 поступает в раскруточный щелевой диффузор, состоящий из передней 14 и задней 15 щек, соединенных по окружности тремя центрирующими штифтами 16 и тремя регулировочными болтами 17. Зазор диффузора можно регулировать в диапазоне $\Delta_{\text{диф}} = 0...10$ мм или полностью снимать заднюю щеку диффузора.

Из диффузора воздух подается в ресивер холодного потока 18, в котором для уменьшения внешнего теплопритока установлена внутренняя теплоизоляция 19. Затем через вентиль 20 холодный поток выбрасывается в атмосферу. С помощью вентиля 20 в ресивере холодного потока можно создать давление $(0,1...2) \cdot 10^5$ Па.

При работе вихревой трубы на $\mu < 1$ часть воздуха через дроссельный вентиль 11 подается в мерное устройство 12 с нормальными соплами и затем выбрасывается в атмосферу. Долю холодного потока можно изменять в пределах $\mu = 0...1$.

С помощью термопар 21, 22 замеряется температура охлаждающей воды на входе и выходе из кожуха. Термопара 23 позволяет контролировать температуру горячего потока. С помощью термопар 24 замеряется температура стенок горячего конца трубок. Средняя температура холодного потока замеряется термопарами 25, 26, 28. С помощью термопары 27 замеряется температура на оси у задней щеки диффузора. С помощью приемников давления 29, 30, 31 замеряются давления в ресивере холодного потока на оси у задней щеки диффузора и на горячем конце вихревой трубы.

Влияние геометрических параметров на работу охлаждаемой вихревой трубы

За базовый вариант принята ОВТ с диаметром соплового сечения 30 мм. Так как при работе ОВТ поток охлаждается за счет теплопередачи через стенки камеры энергетического разделения, длина и форма горячего конца ОВТ играют существенную роль. При определении влияния длины и конусности горячего конца ОВТ на температурный эффект охлаждения испытывалась ОВТ с различной приведенной длиной $\bar{L} = 14, 20, 24, 30$ и углами конусности $\gamma = 0^\circ, 1^\circ 36', 3^\circ, 6^\circ$. Цилиндрическая ОВТ при работе на доле холодного потока $\mu = 1$ работала неустойчиво, на так называемом срывном режиме, эффект охлаждения находился в диапазоне $\Delta T = 10...15$ К. На рис. 2 приведена зависимость температурной эффективности от угла конусности ОВТ. На рис. 2 не приведены значения температурной эффективности цилиндрической ОВТ, т.к. зафиксировать точное значение температуры холодного потока при $\mu = 1$ оказалось невозможно. Оптимальным углом раствора камеры энергетического разделения ОВТ является $\gamma = 3^\circ$ такой же, как и у неохлаждаемой вихревой трубы длиной $\bar{L} = 14$. Оптимальной длиной ОВТ с $\gamma = 3^\circ$, при работе в интервале перепада давлений $p = 3...4,5$ с диффузором на холодном конце является \bar{L}

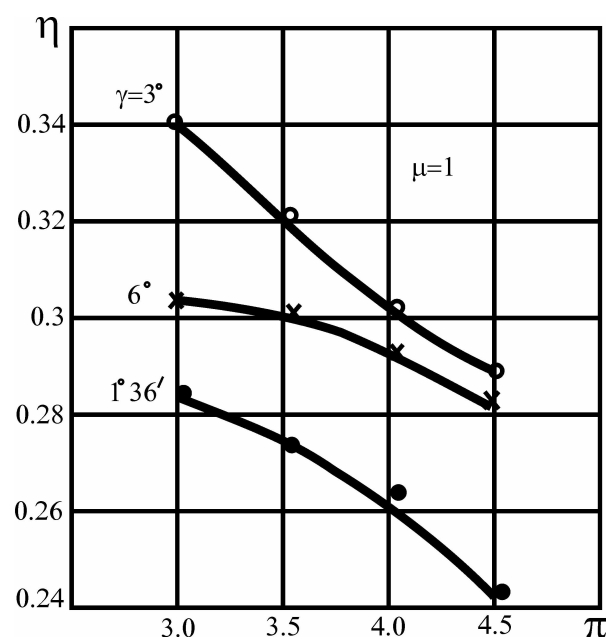


Рис. 2. Зависимость η от π и угла конусности ОВТ

= 24. При длине вихревой зоны меньше оптимальной потери кинетической энергии свободного вихря невелики, но площадь поверхности для теплопередачи тоже мала и не обеспечивает достаточного теплосъема. 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 теплосъема.

Габариты ОВТ удалось сократить за счет стыковки конического участка камеры энергетического разделения ОВТ с $\bar{L} = 14$ и цилиндрического с $\bar{L} = 10$.

Установка щелевого диффузора на холодном потоке ОВТ позволила увеличить эффект охлаждения на 1...5 К по сравнению с работой ОВТ без диффузора за счет некоторого увеличения степени расширения газа и ликвидации зоны вторичного вихревого течения в диафрагме. Диффузор препятствует возникновению такой зоны. Большее положительное влияние диффузор оказывает на работу ОВТ при $\mu = 1$, причем его влияние более существенно на коротких ОВТ с $\bar{L} = 14$.

Экспериментально определены оптимальные геометрические соотношения диффузора ОВТ $\bar{D}_{диф} = 5$, $\bar{\Delta}_{диф} = 0,1$.

Влияние относительной площади сопла и диаметра отверстия диафрагмы очень существенно сказывается на эффекте охлаждения в ОВТ. Если оптимальный диаметр отверстия диафрагмы при $\mu = 1$ находится в области $\bar{d}_o = 0,6$, то определить оптимальную площадь сопла ОВТ более сложно. Увеличение площади сопла \bar{F}_c вызывает рост расхода газа через ОВТ, повышение гидравлического сопротивления отверстия диафрагмы, снижает эффект охлаждения. Но, с другой стороны, это приводит к уменьшению влияния подмешивания к холодному потоку теплового пограничного слоя диафрагмы, что несколько увеличивает эффективность ОВТ.

После определенного максимума \bar{F}_c количество подаваемого воздуха становится велико для его эффективного охлаждения при постоянной боковой площади камеры энергетического разделения. С ростом абсолютного давления на входе в ОВТ оптимальная величина \bar{F}_c незначительно уменьшается.

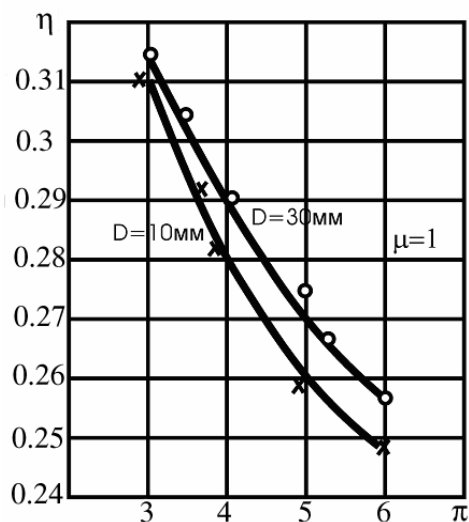


Рис. 3 Зависимость η от π при различных диаметрах ОВТ

При работе ОВТ с входным давлением $p_1 \geq 0,3$ МПа в области $p = 3...5$ оптимальная площадь сопла $\bar{F}_c = 0,07$. При уменьшении давления на входе до значения $p_1 = 0,3$ МПа оптимальная площадь сопла лежит в интервале $\bar{F}_c = 0,08...0,1$. При уменьшении диаметра ВТ происходит ухудшение эффекта охлаждения потока. В ОВТ, работающей при $\mu = 1$, влияние масштабного фактора существенно слабее. На рис. 3 представлены зависимости температурной эффективности ОВТ с $\mu = 1$ диаметрами $D = 10$ мм и 30 мм. В интервале степеней расширения $p = 3...6$ температурный эффект охлаждения ОВТ $D = 10$ мм меньше эффекта охлаждения ОВТ $D = 30$ мм соответственно на 0,5...1,5 К ($\Delta\Theta_x < 1\%$). Следовательно, влияние масштабного фактора у ОВТ незначительно. 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 $\bar{F}_o = 76,4$. 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.

Влияние режимных факторов на работу охлаждаемой вихревой трубы

Основным фактором, влияющим на эффект энергоразделения в ОВТ, так же как в

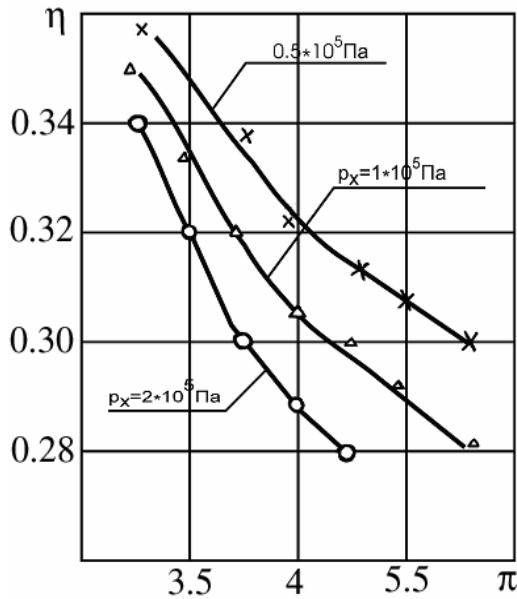


Рис. 4. Зависимость η от π при различных p_x

делящей вихревой трубе, является степень расширения p . При постоянной степени расширения и снижении уровня давлений p_1 и p_x эффект охлаждения незначительно возрастает (рис. 4). Возрастание прослеживается и для $\bar{L} = 24$ и $\bar{L} = 14$ калибров, с диффузором и без него, с оребрением внутренней поверхности камеры энергетического разделения и без оребрения. Улучшение эффективности ОВТ происходит за счет уменьшения расхода газа через сопло при уменьшении давления на входе. Так как площадь теплопередающей поверхности ОВТ

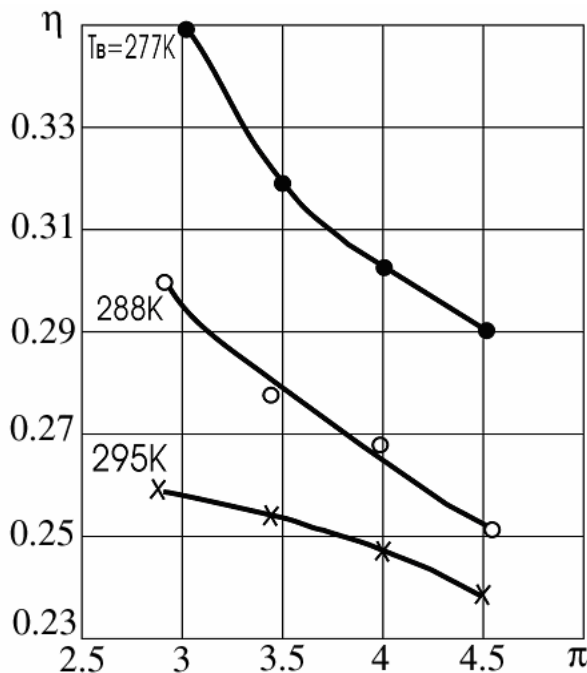


Рис. 5. Зависимость η от π при различных T_0

остается постоянной и постоянными остаются все остальные факторы вихревого эффекта, меньшее количество воздуха охлаждается до меньшей температуры.

Существенное влияние на работу ОВТ оказывает изменение температуры на входе в охлаждающую рубашку и расход охлаждающей жидкости. При малых расходах охлаждающей воды ($G_6 = 0,05$ кг/с) изменение температуры входящей воды на 1 К вызывает изменение ΔT_x на 0,16 К, а при значительных расходах ($G_6 = 0,2$ кг/с) ΔT_x меняется на 0,35 К. Более высокая чувствительность ΔT_x при больших расходах вызвана тем, что при малых расходах средняя температура охлаждающей воды значительно превышает температуру воды на входе. На рис. 5 представлен характер изменения температурной эффективности ОВТ в зависимости от значения средней температуры воды. Из графика следует, что на всех степенях расширения изменение средней температуры воды на 1К вызывает изменение эффекта охлаждения на 0,35 К.

Так как в ОВТ, работающей на $\mu = 1$, эффект охлаждения определяется только теплопередачей от охлаждаемого газа к охлаждающей жидкости, большой интерес представляет зависимость эффекта охлаждения от отношения температуры охлаждающей жидкости к температуре сжатого воздуха на входе в ОВТ. На рис. 6 видно, что результаты экспериментов ($\Delta T_x = f(\Theta_0)$, где $\Theta_0 = T_6/T_1$)

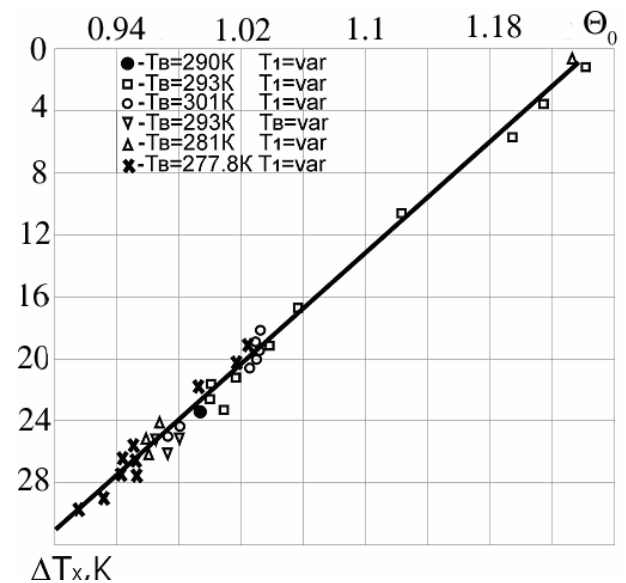


Рис. 6. Зависимость ΔT_x от приведенной температуры охлаждающей жидкости (θ_0)

хорошо укладываются на прямую. Отсюда можно сделать вывод, что охлаждение воздуха в ОВТ прекращается, когда И принимает значение 1,237 для $\pi = 3,5$.

Уменьшение длины камеры энергетического разделения ОВТ

Применение достаточно длинных ОВТ ($\bar{L} = 24$) в авиационных системах охлаждения затруднительно из-за ее увеличенных габаритов, поэтому значительный интерес представляет возможность сокращения длины ОВТ желательна при сохранении высокой температурной эффективности. Так как при жидкостном охлаждении ОВТ наибольшее термическое сопротивление возникает при теплоотдаче от периферийного вихря к внутренней поверхности камеры энергетического разделения, то увеличение теплоотдачи возможно получить с помощью оребрения.

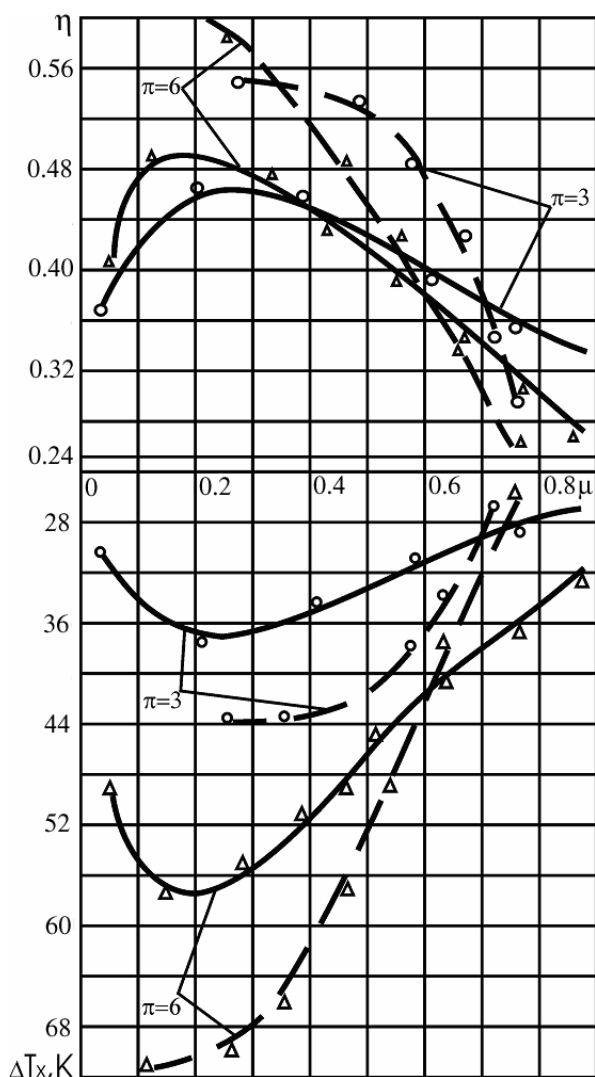


Рис. 7. Зависимость ΔT_x и η от μ и наличия охлаждения

Чем чище обработана внутренняя поверхность ВТ, тем эффективнее ее работа. Рекомендуется внутренняя полировка горячего конца вихревой трубы.

С другой стороны, считается, 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%. Оребрение ОВТ должно увеличить площадь теплопередающей поверхности и уменьшить длину камеры энергетического разделения.

Однако оребрение вихревой трубы $\bar{L} = 24$ не принесло положительных результатов, так как эта длина оптимальная для гладких труб при исследованном перепаде давления $p = 3...4,5$. Нарезка на горячем конце увеличивала боковую поверхность трубы. Положительные 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 $\bar{L} = 3,5, K_{op} = 1,2; \bar{L}_{op} = 7, K_{op} = 1,37$.

Оребрение короткой трубы $\bar{L} = 14$ позволило увеличить температурный эффект охлаждения особенно при больших степенях расширения. При достижении определенной степени расширения 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 $\bar{F}_o = 146; \bar{L} = 14; \bar{F}_o = 76,4; \bar{L} = 14, \bar{L}_{op} = 3,5; \bar{F}_o = 91,5; \bar{L} = 14; \bar{L}_{op} = 7, \bar{F}_o = 121$. Следовательно зону вихревого течения можно сократить за счет оребрения внутренней поверхности до оптимального значения $\bar{F}_o = 146$ при начальном диаметре трубы $d = 30$ мм, оставив начальный участок $\bar{L} = 4$ (прилегающий к соплам) нео-ребренным.

Для сопоставления характеристик были проведены подробные исследования неохлаждаемой конической вихревой трубы и охлаждаемой с $\bar{L} = 14$ (рис. 7). Анализируя их, мож-

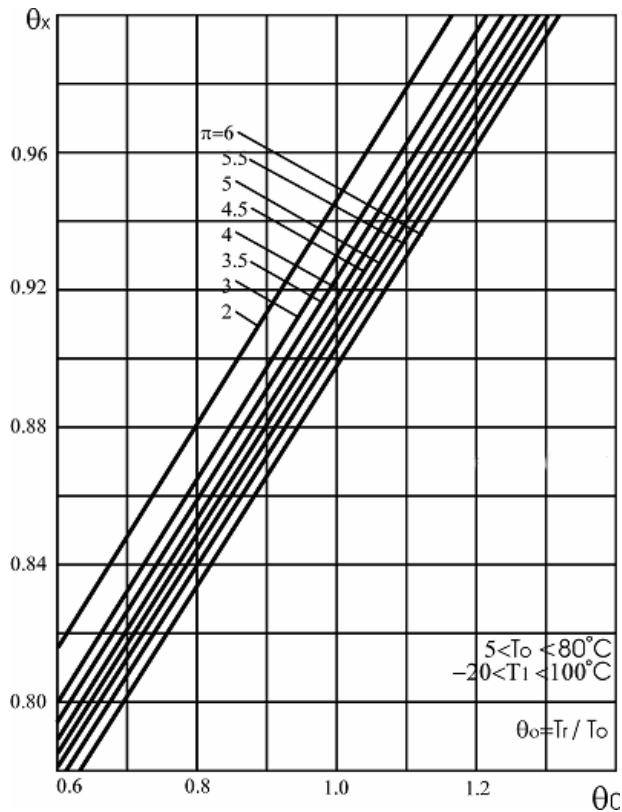


Рис. 8. Характеристики охлаждаемой ВТ

но отметить, что охлаждаемая вихревая труба работает более эффективно начиная с $\mu = 0,62 \dots 0,73$ до $\mu = 1$ в диапазоне $\pi = 3 \dots 6$. Затем, с уменьшением m , 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 $\bar{F}_c = 0,1$, $\bar{d}_o = 0,5$; у охлаждаемой $\bar{F}_c = 0,07$, $\bar{d}_o = 0,57$.

На рис. 8 приведены характеристики ОВТ с диффузором, углом конусности $\gamma = 3^\circ$, длиной $\bar{L} = 14$, с относительной площадью сопла $\bar{F}_c = 0,1$. Эти характеристики аппроксимированы математической зависимостью

$$\Theta_x = 0,3175 \cdot \Theta_o + \frac{0,6547}{\pi^{0,0627}} \quad (1)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В.П., Бирюк В.В., Леонович Г.И., Лукачев С.В. Вихревые системы термостатирования. Самара: СамНЦ РАН, 2005.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Самара, 1997.
3. Пиралливили Ш.А., Поляев В.М. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения, М.: УНПЦ "Энергия", 2000.
4. Бирюк В.В. Применение вихревого эффекта разделения газов в конверсионных разработках // Материалы Всероссийской НПК. Самара: СГАУ, 1994.
5. Бирюк В.В. Вихревая регенеративная установка // Труды 1-й ВНТК "Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленное применение". Куйбышев: КуАИ, 1974.
6. Серебряков Р.А., Бирюк В.В. Вихревой эффект энергетического разделения газов в системах охлаждения и кондиционирования // Вестник МАИ. 1994. №10.

THE COOLED VORTEX PIPE EXPERIMENTAL RESEARCH AS AN ELEMENT OF AVIONICS VORTICAL SYSTEM

© 2008 V.P. Alekseenko

Volga Branch of Applied Problems Section of Russian Academy of Sciences, Samara

The cooled vortex pipe experimental research as an element of avionics vortical system. Mode and geometry influence on vortex pipe technical parameters.