Секция II

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

В.П. Алексеев, А.И. Азаров, А.В. Анисимов, Ю.М. Симоненко

ВИХРЕВЫЕ ТРУБЫ С ВНУТРЕННИМ ОРЕБРЕНИЕМ ГОРЯЧЕГО КОНЦА

Повышение удельной холодопроизводительности маломасштабной вихревой трубы, работающей в качестве дополнительного потребителя сжатого воздуха от реальной пневмосистемы (например, от пневмосистемы транспортного объекта), является актуальной задачей.

Возможности увеличения теплосъема в обычной вихревой трубе очень ограничены, так как поверхность гладкостенного горячего конца не может быть увеличена.

В работах [1], [2] рассмотрены методы интенсификации процесса в неадиабатной трубе путем отсоса пограничного слоя с периферии вихря и нестационарного выпуска горячего потока через дроссель. Применение этих методов в маломасштабных вихревых трубах (D = 5 мм), питаемых неосушенным и неочищенным сжатым воздухом, позволило приблизиться к уровню адиабатного к.п.д. около 22%, однако для дальнейшего повышения эффективности потребовалось разработать новую конструкцию вихревой трубы, особенность которой состоит в выполнении оребрения на части поверхности горячего конца, омываемой периферийными слоями вихревого потока. Нами исследованы, прежде всего, простые и технологичные конструкции с плоским оребрением, не требующим пайки, сварки и т.п. Набранный в виде пакета из чередующихся штампованных теплопроводных пластин и герметизирующих дистанцеров- прокладок, горячий конец представляет по существу " тонкослойный" пластинчатый теплообменник, остов которого заключают в жидкостную рубашку, либо в воздуховод для охлаждающего воздуха. Плоское внутреннее оребрение перпендикулярно к оси вихревой трубы, т.е. расположено к потоку под некоторым углом атаки, нарастающим по мере удаления от соплового сечения.

Рассмотрим геометрические характеристики внутреннего оребрения. Если внутренний диаметр гладкой трубы на участке длиной L' равен D_r, то поверхность ее, омываемая вихрем, равна

$$F_r = \pi D_r L' \qquad (I)$$

Заменяя эту поверхность набором ребер толщиной δ_p с дистанцерами, получим

$$F_{op} = \frac{\pi D_p L'}{S} = \left[\frac{D_p}{2S}\left(n^2 - t\right) + m + n\left(1-m\right)\right], \qquad (2)$$

где D_p – диаметр центрального отверстия в пластине-ребре;

$n = \frac{D_n}{D_p}$ – относительный диаметр центрального отверстия в дистанцере;

S – шаг оребрения;

$m = \frac{\delta_p}{S}$ – относительная толщина ребра.

Будем называть геометрическим коэффициентом оребрения отношение

$$K_r = \frac{F_{op}}{F_r}. \qquad (3)$$

Используя выражения (I) и (2) и полагая, что $D_p = D_r$, получим из выражения (3):

$$K_r = K_{np} + K_{цр} + K_{цп}, \qquad (4)$$

где $K_{np} = \frac{n^2-1}{2t}$ – коэффициент оребрения, создаваемый плоскими поверхностями ребер;

$K_{цр} = m$ – коэффициент оребрения, приходящийся на цилиндрические поверхности ребер, омываемые вихрем (на радиусе $D_p/2$);

$K_{цп} = n(1-m)$ – коэффициент оребрения, приходящийся на цилиндрические поверхности дистанцеров (на радиусе $D_n/2$);

$t = \frac{S}{D_r}$ – относительный шаг оребрения.

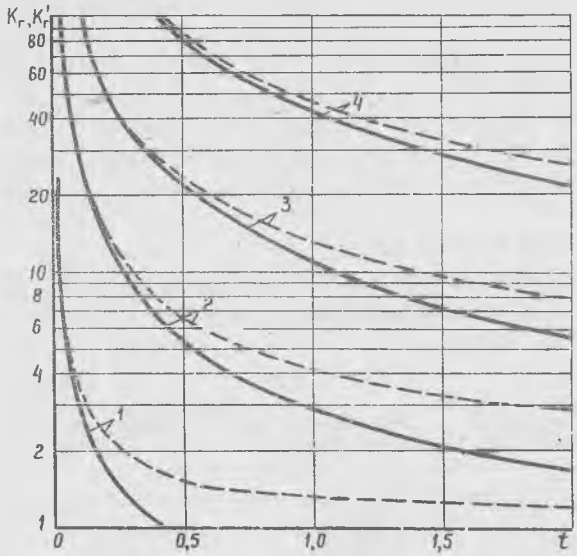
В случае, если дистанцеры изготовляются из неметаллического материала, то последним слагаемым в выражении (4) следует пренебречь. Тогда

$$K_r' = \frac{n^2-1}{2t} + m. \qquad (5)$$

Из выражения (5) следует, что величина геометрического коэффициента оребрения K_r' быстро увеличивается при $t \to 0$, а также с ростом n. Но с уменьшением относительного шага t в реальных условиях возрастает опасность засорения узких межреберных ще-

лей, а чрезмерное увеличение относительного диаметра n приводит к снижению эффективности (к.п.д.) ребра. Кроме того, рост n и уменьшение t сопровождаются возрастанием сопротивления межреберных каналов.

Для выявления предпочтительных значений t на первом этапе эксперимента определены при μ = I температурные характеристики четырех образцов вихревых труб с внутренним оребрением (D =0,005м, n = 2,4, m = 0,5), различавшихся между собой только величиной t (рис.I) и (табл.I,2).



Р и с.I. Зависимость коэффициента оребрения от относительных размеров: при m = 0,5; 1- n = 1,2 ; 2- n = 2,4 ; 3- n = 4,8 ; 4- n = 9,6 — — — K_r ; ——— K_r'

Полученные результаты показывают, что с уменьшением t (и ростом коэффициента оребрения K_r) достижимая температура холодного потока монотонно снижается. Каждый из образцов с внутренним оребрением обеспечивал относительную температуру холодного потока $(\theta_x)_{op}$ существенно лучшую, чем $(\theta_x)_{гл}$ у гладкостенной неадиабатной вихревой трубы [I] при μ =I; например, при t = = 0,I4 относительное превышение температурного эффекта

$$\bar{\theta}_{\mu=1} = \left[\frac{1-(\theta_x)_{op}}{1-(\theta_x)_{гл}} - 1\right] 100, \ \% \qquad (6)$$

составило II9,I69 и 420%, при π равном соответственно 5,I; 3,0; I,9. Таким образом, преимущество оребренной вихревой трубы быстро возрастает с уменьшением π .

Таблица I

Основные размеры исходных вариантов вихревой трубы с неперфорированным оребрением горячего конца

($D = 0{,}005$ м ; $F_c = 0{,}104$; $d_0 = 0{,}64$; $L = 16D$; $L_{op} = 14D$; $F_B = 0{,}0126$ м^2 x) ; $m = 0{,}5$; $D_n = 0{,}012$ м).

δ_p, м	S, м	t	K_r (по уравн 4)	Примечание
0,35 · I0^{-3}	0,7 · I0^{-3}	0,I4	I8,7	Лучший образец
I I0^{-3}	2 I0^{-3}	0,40	7,65	
3 I0^{-3}	6 I0^{-3}	I,2	3,68	
5 I0^{-3}	I0 I0^{-3}	2,0	2,89	

Таблица 2

Основные результаты испытаний вихревых труб с неперфорированным оребрением горячего конца

($P_x = 0{,}11$ Мпа ; $\mu = 1$; $\varphi = 100\%$; $g_м = (0{,}2 \div 0{,}4)$ xx) 10^{-3} кг/кг)

Отношение давлений H	Температура сжатого воздуха T_c K	Температурный эффект ΔT K	Относительная температура холодного потока
I,9	300,I	I7,2	0,9428
3,0	303,5	2I,2	0,9320
5,I	308,3	26,3	0,9I45
I,9	298,5	I4,0	0,953I
3,0	302,3	20,0	0,9339
5,I	308,5	24,3	0,92II
I,9	303,3	I4,6	0,95I5
3,0	303,7	I7,4	0,9427
5,I	308,3	22,7	0,9265
I,9	297,3	I0,9	0,9634
3,0	30I,0	I6,0	0,9469
5,I	307,7	23,I	0,9249

x) F_B – наружная поверхность горячего конца, омываемая охлаждающей водой;

xx) φ, $g_м$ – влажность сжатого воздуха и содержание в нем смазочного масла.

Полученный за счет оребрения прирост холодопроизводительности значительно меньше величины K_r, что прежде всего свидетельствует о неполном использовании располагаемой поверхности ребер.

Монотонное изменение величины $\bar{p}_k$ по длине горячего конца можно использовать для осуществления более рациональной циркуляции горячего потока вдоль оребрения.

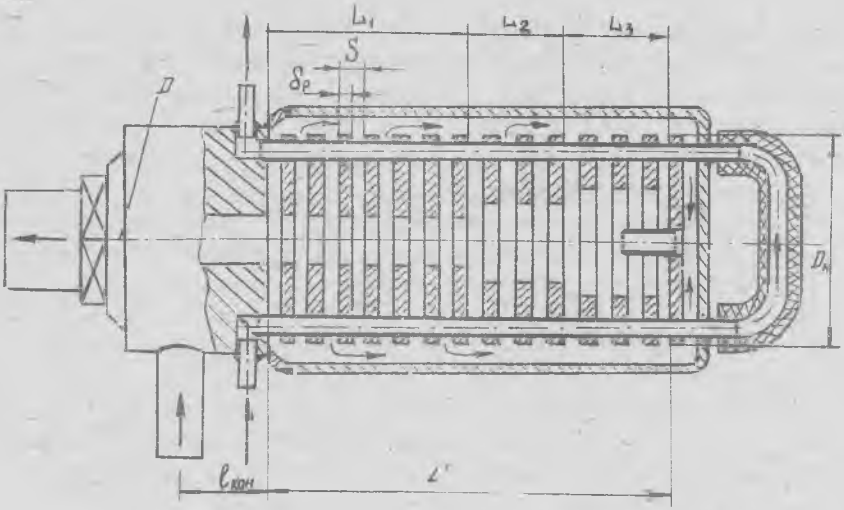
При длительной работе температурный эффект медленно ухудшался (при $g_м \approx (0,2 - 0,4) \cdot 10^{-3}$ кг/кг - на один - два градуса в течение первых часов работы), что можно объяснить накоплением масла в межреберных камерах. Для удаления масла из камер (например, при $\mu \approx 0,99$) необходимо предусматривать перфорацию на внутреннем оребрении.

Размещение ее на оребрении последующих экспериментальных образцов выбрано т.о., чтобы перфорация могла служить каналом для перепуска горячего потока из одной межреберной камеры в другую. Такой перепуск осуществляется за счет разности давлений в межреберных камерах по длине горячего конца.

Эффективность перепуска подтверждена при испытании вихревой трубы 5, (D =0,005м) в которой ребра были напаяны на две трубки для охлаждающей воды (рис.2). В образце 5 осуществлено охлаждение периферии горячего потока с возвратом последнего в хвостовую зону горячего конца. Максимальная холодопроизводительность достигнута при длине начального конического участка $\ell_{кон} = 4D$ и относительной площади сопла $\bar{F}_c$ = 0,II6. При температуре и массовом расходе охлаждающей воды равных, соответственно, температуре и расходу сжатого воздуха, адиабатный к.п.д. образца 5 составил 33,7%, 27,7%, 23,3%, 22,5% при отношении давлений I,9; 3,0; 5,I; 6,2, соответственно (μ =I).

Высокая эффективность при небольших отношениях давлений ($\pi \approx$ I,9) делает целесообразным применение оребренных вихревых труб в ступенчатых схемах с малыми значениями π_i отдельных ступеней.

Исследование и совершенствование оребренных вихревых труб в ОТИХП продолжается. Разработана наиболее технологичная конструкция вихревой трубы, в которой возлеосевые и периферийные участки перфорированных теплопроводных пластин образуют, соответственно внутреннее и внешнее оребрение горячего конца. Можно предвидеть, что на основе описанных конструкций с переходом к диаметрам вихревой камеры $D \geq$ 0,2м при работе на осушенном и очищенном сжатом



Р и с.2. Конструкция и основные размеры вихревой трубы (образец 5) с рециркуляцией охлаждаемого на оребрении горячего потока:

D = 0,5мм; $D_н$ = 40мм; S = 0,75мм; δ = 0,6 мм; L_1 =I5мм; L_2 = L_3 = I0 мм.

воздухе может быть достигнут уровень адиабатного к.п.д. в 40%, т.е. энергетическая эффективность вихревой трубы может быть существенно приближена к эффективности микротурбодетандеров.

Литература

I. Азаров А.И. Характеристики вихревой трубы с рециркулирующим горячим потоком. Сб. "Холодильная техника и технология". Киев, " Техніка ", I974, № I8.

2. Азаров А.И. Охлаждаемая вихревая труба с нестационарным горячим потоком. Сб. "Холодильная техника и технология".Киев, " Техніка ", I973, № I7.