

Л и т е р а т у р а

1. Ильин А.В. Исследование вихревого эжектора для сжатия водяных паров с целью их утилизации в теплоиспользующем оборудовании промышленных предприятий. - Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.-Куйбышев, 1982. - 128 с.
2. Меркулов А.П., Волов В.Т., Ильин А.В. Оптимизация геометрических характеристик вихревого эжектора для сжатия водяных паров. - Куйбышев, 1981. - 16 с. - Рукопись представлена КуАИ им.С.П.Королева. Деп. ВИНТИ 6 авг. 1981, № 3940-81.
3. Епифанова В.И., Ивакин О.А., Шадрин В.Ю. Аналитическая методика расчета вихревых устройств. - В кн.: Криогенная техника и кондиционирование: Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1980, № 318, с. 106-116.
4. Волов В.Т. Влияние диффузоров на энергетические характеристики самовакуумирующейся вихревой трубы. - В кн.: Вихревой эффект и его промышленное применение. Труды Ш Всесоюзной научно-технической конференции. Куйбышев: КуАИ, 1981, с. 92-95.
5. Меркулов А.П., Волов В.Т., Ильин А.В. Экспериментальное сравнение вариантов геометрии вихревого эжектора. - Куйбышев, 1981. - 13 с. Рукопись представлена КуАИ им. С.П.Королева. Деп. ВИНТИ 6 авг. 1981, № 3941-81.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. - М.: Энергия, 3-е изд. перераб., 1974. - 592 с.

УДК 621.694

Н.Д.Колышев, В.Е.Виликин

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕЛ В САМОВАКУУМИРУЮЩЕЙСЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Основное преимущество самовакуумирующейся вихревой трубы (СВТ) перед другими типами ВТ заключается в ее способности создавать пониженные давления и высокие эффекты охлаждения в присоединенной области вихревой зоны.

Результаты проведенных исследований показывают, что несмотря на высокую плотность теплового потока на поверхности цилиндра, охлаждаемого в СВТ (до $30 \cdot 10^4$ Вт/м²), рассеиваемая им мощность довольно ограничена ввиду малой величины теплоотдающей поверхности.

Увеличение боковой поверхности охлаждаемого цилиндра за счет его длины или диаметра не позволяет увеличить холодопроизводительность СВТ, так как при росте относительного диаметра d цилиндра повышается температура оmyвающих его слоев вихря и уменьшается температурный на-

пор, а его удлинение увеличивает степень загромождения вихревой зоны, что снижает степень расширения в ней и, тем самым, повышает температурный уровень ВТ [1].

Одним из наиболее реальных путей интенсификации процесса охлаждения тел с тепловой нагрузкой является оребрение внешней поверхности цилиндров, охлаждаемых в СВТ. Оребрение внешней поверхности без изменения наружного диаметра цилиндра позволяет значительно увеличить внешнюю поверхность при той же величине относительной температуры цилиндра и, следовательно, увеличить допустимую тепловую нагрузку на цилиндр при том же его температурном уровне.

Сказанное выше, однако, будет справедливым, если оребрение внешней поверхности охлаждаемого в СВТ цилиндра не вызовет искажения картины обтекания его слоями вихря и не снизит степень расширения \mathcal{I}_{oc}^* в вихре, которая, в основном, определяет собой уровень температуры и коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра.

Для экспериментальной проверки этого предположения были проведены исследования на опытной установке, схематично представленной на рис.1.

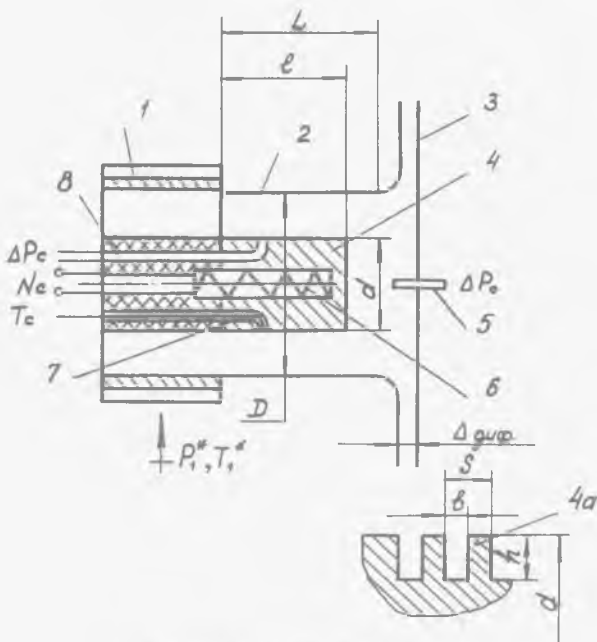
СВТ включает в себя: трехсложной ввод I с регулируемым выходным сечением F_c ; цилиндрический участок 2 диаметром и длиной 30 мм; щелевой диффузор 3, образованный двумя дисками диаметром 150 мм с регулируемым зазором $\Delta_{диф}$ между ними. По оси СВТ выводится охлаждаемый медный цилиндр 4 диаметром d и длиной l , снабженный внутренним электронагревателем 6 и термопарой 7 для измерения температуры $T_{ц}$ поверхности; канал 8, выведенный на поверхность цилиндра, позволяет измерить на ней статическое давление P_{cm} ; капиллярная трубка 5, введенная по оси СВТ со стороны диффузора, позволяет измерить давление на оси трубы и по нему рассчитать степень расширения в вихре $\mathcal{I}_{oc}^* = P_s^*/P_{oc}$.

Исследовалась теплоотдача в СВТ цилиндров как с гладкой поверхностью 4, так и с оребренной 4,а (рис. 1); при этом ребра образовывались цилиндрическими кольцевыми проточками глубиной h , шириной b , шагом S .

Коэффициент n оребрения поверхности цилиндра, представляющий собой отношение величины оребренной поверхности F_p цилиндра к величине его гладкой поверхности F_{2n} , можно вычислить по выражению

$$n = \frac{F_p}{F_{2n}} = \frac{d-2h}{2d} + \frac{2(d-h)h}{dS} + 0,5. \quad (I)$$

Полагая в первом приближении, что оребрение поверхности цилиндра, охлаждаемого в СВТ, не повлияет на характер обтекания его вихревым потоком, можно допустить, что средняя температура обтекающих цилиндр слоев вихря и коэффициент теплоотдачи α на его поверхности останутся прежними.



Р и с. 1. Общий вид СЭТ

При условии, что тепловая нагрузка N_{Σ} цилиндра не изменяется, справедливо равенство

$$\alpha \Delta T_{\Sigma,zn} F_{zn} = \alpha \Delta T_{\Sigma,p} F_p, \quad (2)$$

где

$$\Delta T_{\Sigma,zn} = T_{\Sigma,zn} - T_{\Sigma,0},$$

$$\Delta T_{\Sigma,p} = T_{\Sigma,p} - T_{\Sigma,0},$$

$T_{\Sigma,0}$ — температура поверхности цилиндра (гладкого или оребренного) при нулевой тепловой нагрузке ($N_{\Sigma} = 0$).

Более строгий подход к равенству (2) требует измерения температуры прилегающих к поверхности цилиндра слоев вихря, что представляет очень сложную задачу.

Как уже рассматривалось раньше [2], за указанную температуру можно принять предельную температуру, которую приобретает цилиндр при его тепловом равновесии с вихрем, т.е. при нулевой тепловой нагрузке ($N_{\Sigma} = 0$).

Введя понятия относительной температуры поверхности цилиндра при тепловой нагрузке N_{Σ}

$$\alpha_{ц} = \frac{T_{ц}}{T_{г}}$$

и в ее отсутствии ($N_{ц} = 0$)

$$\alpha_{ц,0} = \frac{T_{ц,0}}{T_{г}^*}$$

равенство (2) можно представить в виде

$$(\alpha_{ц,гп} - \alpha_{ц,0}) = (\alpha_{ц,р} - \alpha_{ц,0})\eta,$$

откуда следует, что

$$\alpha_{ц,р} = \alpha_{ц,0} + \frac{\alpha_{ц,гп} - \alpha_{ц,0}}{\eta}, \quad (3)$$

а также

$$\Delta \alpha_{ц,р} = \frac{\Delta \alpha_{ц,гп}}{\eta} \quad (4)$$

Выражение (3) позволяет определить относительную температуру оребренной поверхности цилиндра, охлаждаемого в СВТ по известным величинам $\alpha_{ц,гп}$ и $\alpha_{ц,0}$ [1, 2] и по выбранному значению η .

Выражение (4) позволяет сравнить повышение относительной температуры гладкого цилиндра и оребренного, вызванного одной и той же тепловой нагрузкой $N_{ц}$.

Оба эти выражения справедливы при условии, что высота ребер h относительно невелика, а коэффициент теплопроводности их достаточно высок, т.е. при коэффициенте эффективности ребра, близком к 1, что соответствует реальным условиям.

В тех случаях, когда приведенных в работах [1, 2] данных по $\alpha_{ц,гп}$ и $\alpha_{ц,0}$ окажется недостаточно, можно определить температуру поверхности оребренного цилиндра по формуле

$$T_{ц,р} = T_{ц,0} + \frac{N_{ц}}{\alpha \eta F_{гп}} \quad (5)$$

Разделив уравнение (5) на $T_{г}^*$, получим выражение для относительной температуры поверхности цилиндра в виде

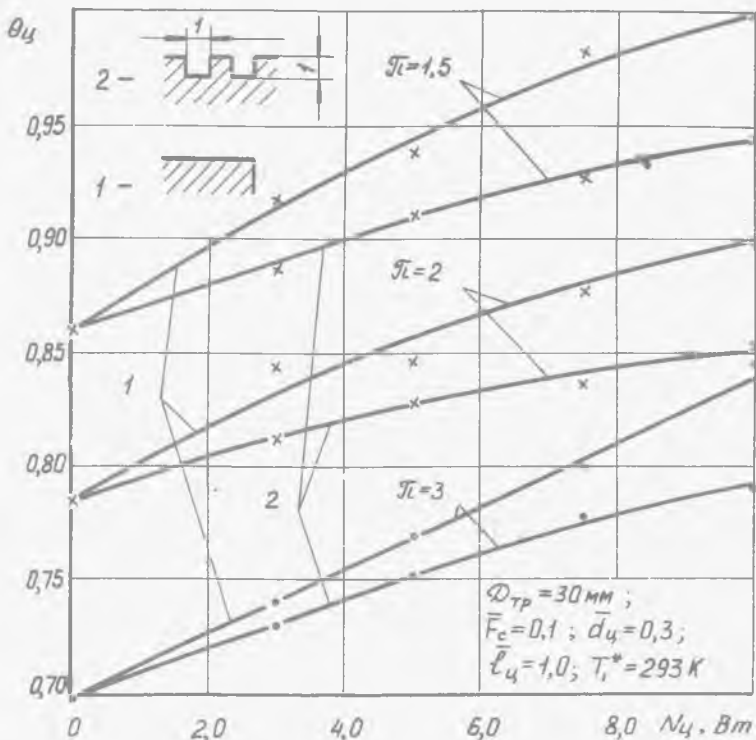
$$\alpha_{ц,р} = \alpha_{ц,0} + \frac{N_{ц}}{T_{г}^* \alpha \eta F_{гп}} \quad (6)$$

На рис. 2 приведены результаты испытаний цилиндров с гладкой поверхностью, диаметром $d = 9$ мм и длиной $l = 30$ мм, охлаждаемых в СВТ при различной тепловой нагрузке $N_{ц}$ и различных степенях расширения $T = P_{г}^* / P_{н}$, где $P_{н}$ - давление окружающей среды.

Оребренная поверхность характеризуется параметрами: $h = b = 1$ мм, $s = 2$ мм.

Как и предполагалось, наличие неглубокого оребрения на поверхности цилиндра не повлияло на характер обтекания его вихрем, на что указывает практически одинаковая величина $\alpha_{ц,0}$ при $N_{ц} = 0$ для оребренной гладкой поверхности цилиндра.

Некоторый разброс экспериментальных точек $\alpha_{ц,р} = f(N_{ц})$ не позволяет установить определенный закон изменения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{р}$ на оребренной поверхности по сравнению с $\alpha_{гп}$, но расчет при $N_{ц} = 10$ Вт



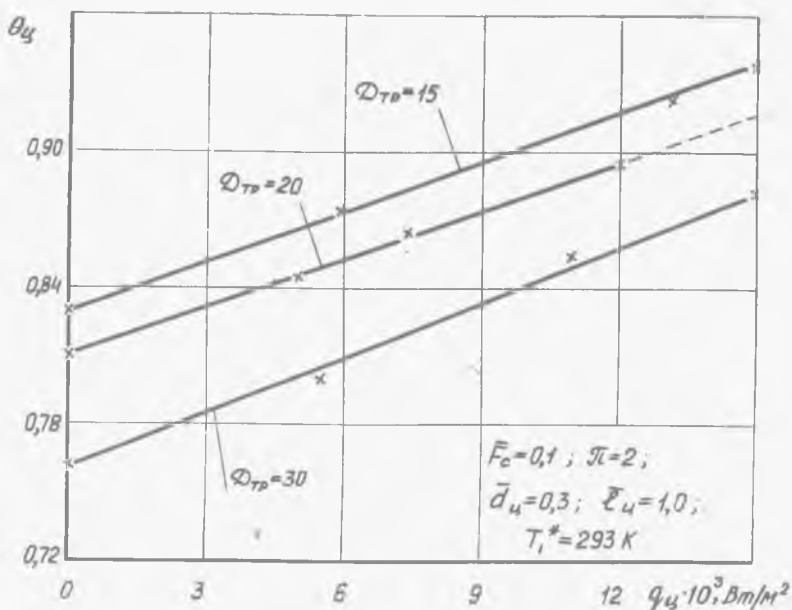
Р и с. 2. Зависимость относительной температуры гладкого и оребренного цилиндров от их тепловой нагрузки

показывает незначительное снижение d_p : $d_p = (0,92 \dots 0,98) d_{пл}$

Авторами экспериментально исследована зависимость $\theta_u = f(2, q_u)$ при $\bar{d} = 0,3 = idem$, графически показанная на рис. 3. С этой целью проводилось охлаждение цилиндров с диаметрами $\bar{d} = 9,6$ и $4,5$ мм соответственно в СВТ с диаметрами $D = 30, 20$ и 15 мм. Тепловая нагрузка цилиндров применялась в диапазоне $Nu_0 = 0-10$ Вт, на рис. 3 ей соответствует удельная тепловая нагрузка

$$q_u = \frac{Nu_0}{F_u} \cdot \text{Вт/м}^2$$

С уменьшением диаметра СВТ снижается эффект охлаждения цилиндра (повышается θ_u), что объясняется увеличением влияния подмешивания пограничного слоя диафрагмы к холодным слоям вихря, омывающим цилиндр. Это явление прослеживается во всем диапазоне тепловых нагрузок. Сле-



Р и с. 3. Зависимость относительной температуры поверхности цилиндра от его удельной тепловой нагрузки и диаметра СВТ

дует отметить, что при нулевой тепловой нагрузке ($N_4 = 0$) можно определить поправку $\Delta \theta_4$ на влияние масштабного фактора по аналогии с известной зависимостью [3]:

$$\Delta \theta_4 = 0,005(D_{TP} - 30) \quad (7)$$

С учетом этой поправки минимальная относительная температура цилиндра, охлаждаемого в СВТ диаметром D (при $N_4 = 0$), определится выражением

$$\theta_{4(D)} = \theta_{4(D=30)} + \Delta \theta_4$$

При наличии тепловой нагрузки ($N_4 > 0$) зависимость (7) изменяется и при $q_4 = 15 \cdot 10^3 \text{ BT/m}^2$ принимает вид

$$\Delta \theta_4 \approx 0,004(D_{TP} - 30).$$

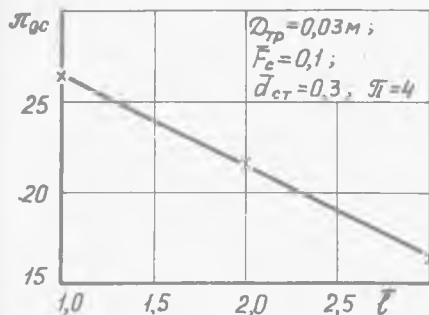
Более точно указанная зависимость описывается эмпирической формулой (для $\bar{d} = 0,3$)

$$\theta_4 = 0,821 - 0,00673D + (0,035 - 0,001D)N_4 + (0,0025 + 0,005D)(14,2 - \pi)^3 \quad (8)$$

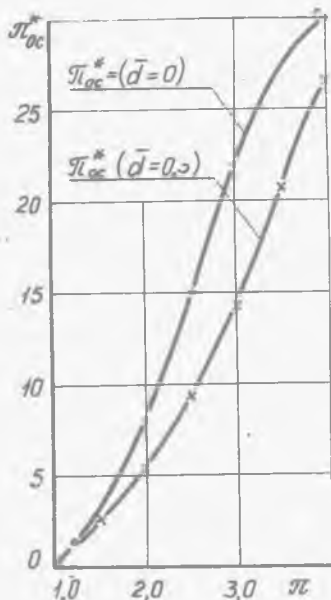
Была проведена экспериментальная оценка влияния увеличения $\bar{L} = L/D$ (и пропорционального ей увеличения L) на степень расширения в вихре СВТ. Исследована работа СВТ $D = 30$ мм с охлаждаемым в ней цилиндром $d = 9$ мм ($\bar{d} = 0,3$) при изменении длины трубы в диапазоне $\bar{L} = 1,0 - 3,0$.

Длина l цилиндра при этом увеличивалась так, что между задним диском диффузора и торцом цилиндра оставался зазор около 10 мм. Результаты представлены на рис. 4, из которого видно, что увеличение \bar{L} вызывает линейное снижение π_{oc}^* , что можно ориентировочно оценить выражением $\pi_{oc}^* \approx 30 - 4\bar{L}$.

Анализ данных рис. 2 и зависимости $\pi_{oc}^* = f(\pi)$ [3] показывает, что увеличение теплоотдающей поверхности цилиндра при возрастании \bar{L} компенсирует снижение температурного напора за счет уменьшения π_{oc}^* , и в результате тепловая нагрузка цилиндра может быть увеличена при той же температуре поверхности цилиндра (до двух раз). Очевидно, что помещенный по оси СВТ цилиндр даже небольшо-



Р и с. 4. Зависимость степени расширения в вихре от относительной длины вихревой зоны СВТ



Р и с. 5. Влияние охлаждаемого в СВТ цилиндра на степень расширения вихря в ней

го относительного диаметра ($\bar{d} = 0,3$) вызывает загромождение ее внутреннего пространства, что усложняет условия формирования вихря и снижает степень расширения в нем. Это иллюстративно подтверждается графиками на рис. 5. Наличие охлаждаемого тела ($\bar{d} = 0,3$), занимающего почти всю длину вихревой зоны, снижает степень расширения в вихре π_{oc}^* на 20–30% в диапазоне $\pi = 2-4$.

На основе изложенной выше методики расчета теплового потока и температурного поля для охлаждаемого в СВТ цилиндра с ребренной поверхностью произведен расчет линейного градиента температуры медного стержня, один конец которого охлаждается в СВТ, а другой выведен из нее наружу и несет тепловую нагрузку.

Расчет производился для гладкой и оребренной поверхности охлаждаемой части стержня ($\bar{\alpha} = 0,3$, $n = 2,3$). На одинаковых режимах работы ВТ ($\mathcal{T} = 2$, $P_i^* = 0,2$ МПа) оребрение стержня позволяет снизить температуру внешнего торца стержня на 12°C при тепловой нагрузке 5 Вт и на $23,4^{\circ}\text{C}$ при 10 Вт.

Таким образом, оребрение наружной поверхности тел, охлаждаемых в ВТ, экономически целесообразно и позволяет значительно расширить диапазон практического применения вихревых самовакуумирующихся труб.

Л и т е р а т у р а

1. Колышев Н.Д., Вилиякин В.Е. Исследование температурных режимов тел в самовакуумирующейся вихревой трубе. - В сб.: Вихревой эффект и его промышленное применение.- Куйбышев, 1981, с. 122-125.

2. Колышев Н.Д., Вилиякин В.Е. Влияние различных факторов на теплоотдачу в самовакуумирующейся вихревой трубе. - В сб.: Вихревой эффект и его промышленное применение.- Куйбышев, 1981, с. 126-128.

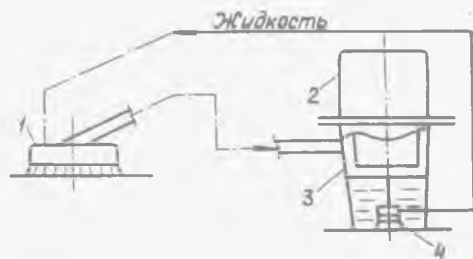
3. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969. - 183 с.

УДК 621.7.02.088.8

А.И.Солодков

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ МОУЩИХ УСТАНОВОК В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

С помощью вихревой моющей установки (ВМУ) обеспечивается механическая транспортировка и нанесение моющей жидкости на поверхности, производится очистка от пыли и различных масляных загрязнений, удаление грязи и шлака.



Р и с. 1. Схема вихревой моющей установки, созданной на базе бытового пылесоса: 1 - ВМГ; 2 - пылесос; 3 - приставка к пылесосу; 4 - жидкостный насос

ВМУ состоит (рис. 1 и 2) из следующих элементов: вихревой моющей головки (ВМГ); вакуумной системы, обеспечиваемой либо

пылесосом, либо вихревым вакуумным насосом (ВВН), также разработанным в лаборатории 9 КуАИ; расходного бака с системой наддува; системы по-