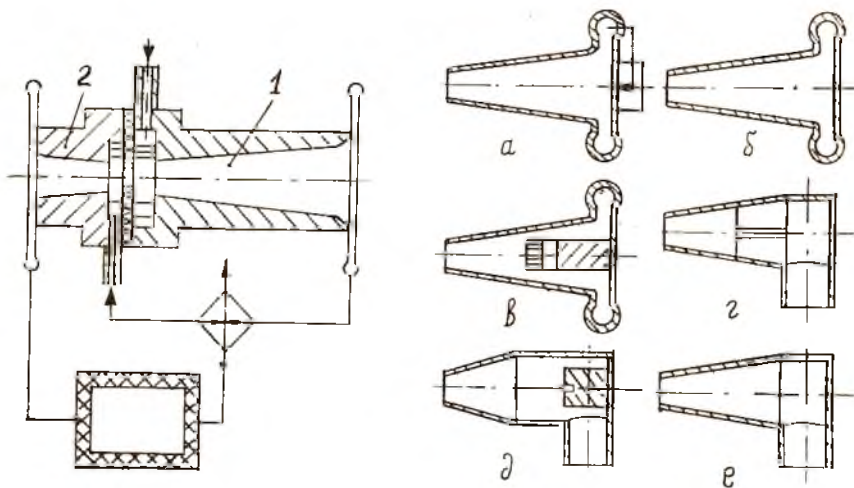


В.В.Нагребя, Ю.М.Симоненко

ВИХРЕВЫЕ ТРУБЫ С УТИЛИЗАЦИЕЙ
ЭНЕРГИИ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА

В известных вихревых установках с утилизацией энергии горячего потока [1] эжектор расположен за холодильной камерой. С целью уменьшения необратимости процесса ускорения пассивного потока в эжекторе исследовано устройство (рис.1), в котором охлажденный поток вихревой трубы 1, сохраняя интенсивное вращение, вводится непосредственно в осевую зону вихревого эжектора 2, установленного соосно вихревой трубе [2]. Испытания проведены на влажном воздухе

$\varphi_c = 100\%$ с использованием вихревых труб диаметром 10 мм. Для выявления оптимальной конструкции восстановителя энергии давления горячего потока изучены шесть вариантов конических и коническо-цилиндрических камер энергоразделения (рис.2).



Р и с. 1. Вихревая труба с эжектором на холодном потоке

Р и с. 2. Различные типы камер энергоразделения

Необходимость сравнительных испытаний обусловлена стремлением учесть совокупное влияние на КПД установки в целом энергетических характеристик адиабатной вихревой трубы и давления горячего газа,

используемого в качестве активного потока в вихревом эжекторе с вполне определенным значением $\eta_{\text{э}}$. В качестве одного из критериев при сопоставлении устройств, представленных на рис.2, принят показатель

$$\alpha = \frac{\pi_r - 1}{\pi_x - 1}, \quad (I)$$

где $\pi_r = p_r/p_x$ и $\pi_x = p_c/p_x$ соответственно степень недорасширения горячего потока и степень расширения холодного потока.

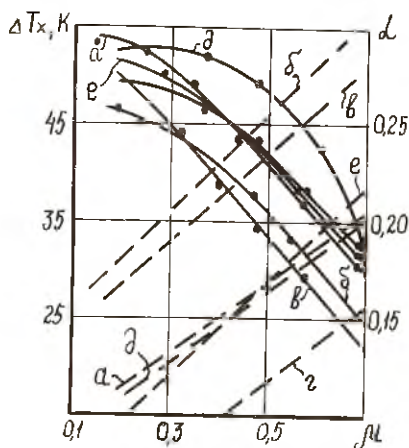
По данным А.П.Меркулова для крупномасштабных вихревых труб этот показатель достигает значения $\alpha = 0,33$ и слабо зависит от μ . Однако для вихревых аппаратов малого масштаба ($D=5...10\text{мм}$) величина существенно ниже и зависит от режимных и конструктивных факторов. Как показывают результаты экспериментов (рис.3), максимальные значения температурной и энергетической эффективности характерны для вихревой трубы с коническо-цилиндрической камерой и крестовиной (рис.2,д). В то же время наибольшие значения α и π_r наблюдались в вихревых трубах со щелевым диффузором и решеткой на торце камеры энергоразделения (рис.2,б,в) по сравнению с вариантами рис.2,а,г,е.

Для сопоставления рассмотренных конструкций вихревых труб с утилизацией энергии горячего потока в эжекторе использована зависимость

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{\eta'_{\text{ад}} (1 - \pi_0 \frac{1-k}{k})}{1 - \pi \frac{1-k}{k}},$$

где $\eta'_{\text{ад}}$ - адиабатный КПД одиночной вихревой трубы (без эжектора); $\pi_0 = \frac{p_c}{p_0} = \pi_x$ - действительная степень расширения в вихревой трубе с эжектором.

Давление холодного потока вихревой трубы на входе в эжектор, в свою очередь, определялось из соотношения



Р и с. 3. Характеристики вихревых труб в зависимости от типа камеры

$$P_0 = \left[1 + \frac{1-M}{M} \cdot \frac{T_2}{T_0} \cdot \eta_2 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-K}{K}} \right] \right]^{\frac{M}{1-K}}, \quad (3)$$

где $T_2 \approx T_0$ - температура газа на входе в сопло эжектора;

η_2 - адиабатный КПД вихревого эжектора;

P_1, P_2 - давления горячего и холодного потоков.

В результате обработки экспериментальных данных для случая $\eta_2 = 0,12$ [3] получены характеристики, показывающие, что наиболее оптимальным вариантом конструкции камеры энергоделения является вариант, представленный на рис.2,д. При экспериментальной проверке работы вихревой трубы с крестовиной в совокупности с эжектором на ее холодном потоке получены значения адиабатного КПД $\eta_{ад} = 0,256 \dots 0,251$ при $\pi_x = 5,0 \dots 8,0$ соответственно. Анализ экспериментальных зависимостей показал, что увеличение на 20 % адиабатного КПД установки не может быть объяснено только возрастанием степени расширения вихревой трубы путем эжектирования ее холодного потока. Достижение таких характеристик комбинированной установки возможно при повышении η_2 более 40 %, однако для рассматриваемых условий такой уровень эффективности эжектора нельзя реализовать даже с учетом снижения необратимости процесса при вакуумировании закрученного пассивного потока.

Дальнейшее исследование установки (см.рис.1) показало, что вдув в камеру эжектора горячего потока, предварительно охлажденного до уровня температуры сжатого газа, способствует увеличению эффективности работы вихревой трубы (рис.4). Изучено два способа ввода потока в камеру при отключенном сопловом вводе эжектора: через осевой патрубок диаметром $0,4 d$, размещенный на расстоянии от плоскости диафрагмы, где $d = 0,58$ диаметр диафрагмы (кривая 2);

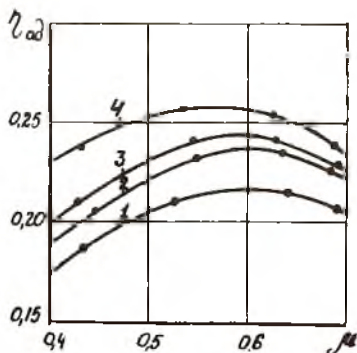
через радиальный патрубок с диаметром, равным $1,2 d$ (кривая 3).

Из-за влияния вдува КПД одиночной вихревой трубы возрастает на 16 %. Вдув потока сопровождается возрастанием количества тепла, отводимого в теплообменнике от горячего потока. При этом общая доля холодного потока системы в целом равна $M = 1$, а расход холодного потока вихревой трубы изменялся в пределах $M = 0,4 \dots 0,7$.

В результате вдува газа через тангенциальное сопло вихревого эжектора наблюдалось дальнейшее повышение КПД установки (кривая 4) по сравнению с вдувом без закрутки потока (кривые 2 и 3). Сопоставление эффективности работы установки при радиальном и тангенциаль-

ном вдуве потока позволило определить величину адиабатного КПД эжектора, которая в исследуемом диапазоне характеристик изменялась от 0,08 при $\mathcal{L}_x = 8$ и $\mu = 0,7$ до 0,16 при $\mathcal{L}_x = 5$ и $\mu = 0,4$.

Обладая преимуществами охлаждаемых вихревых труб, исследованные устройства характеризуются повышенными значениями адиабатного КПД при больших степенях расширения и допускают использование взамен пластинчатой камеры энергоразделения теплообменников, применяемых в соответствующих системах холодильной и криогенной техники. Это позволяет повысить надежность таких систем, упростить их проектирование и монтаж.



Р и с. 4. Зависимость адиабатного КПД $\eta_{ад}$ от доли холодного потока μ для $\mathcal{L}_x = 6$: 1 - базовая ВТ, 2 - ВТ с вдувом по оси; 3 - ВТ с радиальным вдувом, 4 - ВТ с эжектором

Библиографический список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. - 182 с.
2. А.с. III3974 (СССР). Холодильная установка / Дроздов А.Ф., Симоненко Ю.М. / Спубл. в Б.И. 1985. № 3.
3. Дубинский М.Г. Вихревой вакуумнасос // Изв. АН СССР. Сер. ОТН. 1955. № 8. С.3-10.
4. Азаров А.И. и др. Вихревые трубы с внутренним оребрением горячего конца: Мат-лы 2-й Всесоюзной научно-технической конференции "Вихревой эффект и его применение в технике". Куйбышев, 1976. С.113.