

Р и с. 2. Зависимость  $\mu\eta_t$  от  $\mu$ : 1)  $L_1 = 3D_1, \epsilon = 3$ ; 2)  $L_1 = 3D_1, \epsilon = 4,5$ ; 3)  $L_1 = 6D_1, \epsilon = 4,5$ ; 4)  $L_1 = 9D_1, \epsilon = 4,5$ ; 5) охлаждаемая вихревая труба МВИ,  $D_1 = 28 \cdot 10^{-3}$  м;  $\epsilon = 5,8$ ; 6) охлаждаемая вихревая труба Е.Оттен,  $D_1 = 20 \cdot 10^{-3}$  м,  $\epsilon = 6,3$

В результате испытаний охлаждаемых вихревых труб получены максимальные значения [1]:  $\mu\eta_t = 26-27\%$  (кривая 5); [3]  $\mu\eta_t = 25\%$  (кривая 6). А.И.Азаровым [2] получены значения  $\mu\eta_t = 33,7\%$  при степени расширения  $\epsilon = 1,9$  и  $\mu = 1$ . Полученные авторами значения к.п.д. ( $\mu\eta_t = 0,38-0,39$ ) выше, чем у охлаждаемых вихревых труб, на 44%. Это обусловлено наличием комбинированного охлаждения вихревого холодильника и циркулирующего потока промежуточного давления, подводимого внутрь вихревой трубы, что улучшает процесс энергоразделения.

#### В ы в о д ы

Адиабатный к.п.д. двухкаскадного охлаждаемого вихревого холодильника превосходит к.п.д. известных охлаждаемых вихревых труб примерно на 44%.

Рациональная область применения вихревого холодильника для  $\mu = 1-0,8$ , при этом  $\mu\eta_t = 0,3-0,39$ , что позволяет использовать его в системах кондиционирования и регенеративных схемах охлаждения.

УДК 633.697.3

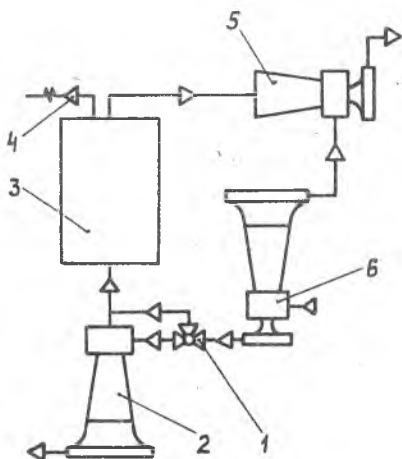
В.В.Бобров, В.И.Метенин

#### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЦИКЛА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ВИХРЕВОГО ХОЛОДИЛЬНОГО АППАРАТА

Рассматриваемый низкотемпературный двухступенчатый вихревой холодильный аппарат (ДВХА), в отличие от ранее известных вихревых холодильников, обеспечивает глубокое охлаждение воздуха, поступающего в камеру холода (до 198К) при сравнительно низком давлении питающего сжатого газа ( $P_1 \leq 0,6$  МПа) и без регенерации тепла.

Высокий температурный эффект охлаждения достигается за счет значительной степени утилизации энергии газовых потоков в различных элементах ДВХА.

Рабочий процесс ДВХА, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, осуществляется следующим образом: разделение сжатого газа ( $P_1, T_1$ ) на холодный ( $P_{x1}, T_{x1}$ ) и горячий ( $P_{г1}, T_{г1}$ ) потоки в вихревой трубе 6; разделение холодного потока ВТ-6 на охлажденный ( $P_{x2}, T_{x2}$ ) и подогретый ( $P_{г2}, T_{г2}$ ) потоки в вихревой трубе 2; охлаждение объектов в камере холода 3, вакуумируемой противоточным вихревым эжектором 5 [1, 2]; сжатие холодного потока вихревой трубы 2 до давления  $P_{см}$  в эжекторе 5, где активным газом является горячий поток вихревой трубы 6; сжатие подогретого потока вихревой трубы 2 в диффузорах и выброс его в атмосферу.



Р и с. 1. Принципиальная схема ДВХА: 1 - ВТ-1; 2 - ВТ-2; 3 - камера холода; 4 - противоточный вихревой эжектор; 5 - трехходовой кран; 6 - предохранительный клапан

ДВХА, работающий по указанному принципу, обеспечивает в камере холода уровень температуры, недостижимый (при одинаковых параметрах газа на входе) в известных вихревых холодильных аппаратах. Однако количество газа, протекающего через камеру холода в этом случае, невелико, поэтому время выхода на режим довольно значительно. Для расширения рабочего диапазона ДВХА по холодопроизводительности и сокращения времени выхода на режим минимальных температур в его конструкции предусмотрено переключение потоков газа таким образом, чтобы в камеру холода при необходимости подавался весь холодный поток первой ВТ-6. В этом случае величина температурного эффекта охлаждения снижается, а холодопроизводительность увеличивается. Рассмотрим работу ДВХА в этом режиме.

Сжатый газ разделяется в ВТ-6 на холодный и горячий потоки.

Холодный поток через трехходовой кран I подается непосредственно в камеру холода 3. Часть газа из камеры холода поступает в эжектор в роли пассивного потока, а часть попадает через отверстие диафрагмы во внутреннюю полость ВТ-2 и захлаживает ее, излишек газа выбрасывается из камеры холода в атмосферу через предохранительный клапан 4.

При одноступенчатом энергетическом разделении газа холодопроизводительность ДВХА максимальна, поэтому обеспечивается быстрое захлаживание объектов в камере холода. За счет этого при переключении ДВХА на режим двухступенчатого расширения сокращается время достижения минимальной температуры.

С целью определения влияния различных факторов на рабочий процесс ДВХА проведен термодинамический анализ его действительного цикла на режимах одноступенчатого и двухступенчатого расширения сжатого газа при различной холодопроизводительности. В основу метода теплового расчета положены результаты исследования диффузорных ВТ и противоточного вихревого эжектора, являющихся основными функциональными элементами ДВХА.

На основании результатов, полученных при расчете действительного цикла (рис. 2), можно сделать следующие выводы.

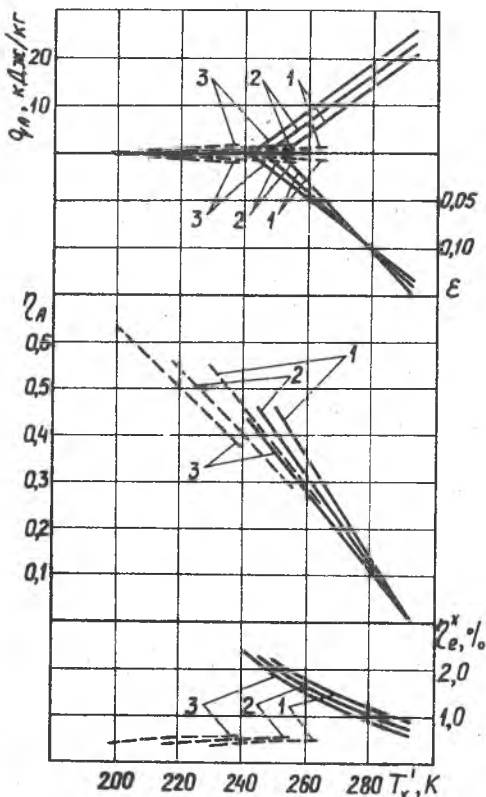
Максимальная холодопроизводительность аппарата и наибольшее значение холодильного коэффициента достигаются при одноступенчатом расширении сжатого газа.

Максимальная температурная эффективность аппарата достигается в том случае, когда его холодопроизводительность и холодильный коэффициент равны нулю. Работать при малых значениях холодопроизводительности термодинамически невыгодно. Однако на практике такие режимы работы имеют место. Например, при термостатировании без внутренних источников тепла, когда тепло, притекающее в камеру холода извне, отводится в окружающую среду и охлаждаемый объект находится в условиях постоянной низкой температуры.

Наибольшее значение эксергетического к.п.д. аппарата отмечается при одноступенчатом расширении газа, так как в этом случае давление в камере холода и расход холодного потока через камеру больше, чем при двухступенчатом расширении.

Анализ действительного цикла показывает, что внешние тепловые потери оказывают незначительное влияние на характеристики аппарата.

Термодинамический анализ действительного цикла ДВХА позволяет однозначно определить оптимальный режим понижения температуры охлаждаемых объектов до минимума, при котором предварительное заоживание производится холодным потоком вихревой трубы первой ступени расширения 6, а для окончательного охлаждения в камеру подается холодный поток второй вихревой трубы 2.



#### Л и т е р а т у р а

1. Б о б р о в В.В., М е т е н и н В.И., С а в е л ь е в С.Н. Вихревой эжектор. А.с. № 640048. Бюллетень изобретений, № 48, 1978.
2. М е т е н и н В.И., Б о б р о в В.В., С а в е л ь е в С.Н., О б м о и н В.В., Б е р б е н ц е в В.Н. Вихревой эжектор. А.с. № 545776. Бюллетень изобретений, № 5, 1977.