

Автореферат
К 54

И

проф. Чумаку об.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

КНЯЗЕВ Александр Евгеньевич

УДК 621.565

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АДИАБАТНЫХ ВИХРЕВЫХ ТРУБ
С ЭЖЕКТОРАМИ ХОЛОДНОГО И ГОРЯЧЕГО ПОТОКОВ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты
холодильной и криогенной техники и систем
кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

Работа выполнена в Куйбышевском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте им. В. В. Куйбышева.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор В. И. Метанин

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Р. З. Алимов
– кандидат технических наук
А. И. Азаров

Ведущая организация – Куйбышевское агрегатное производственное объединение

Защита диссертации состоится 20 февраля 1989 г.
в 11.00 час на заседании специализированного Совета
К 068.27.01 Одесского технологического института холодильной промышленности: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан "___" _____ 198__ г.

Ученый секретарь
специализированного совета
ч., доцент

Р. К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В материалах XXVII съезда КПСС и в ряде последних постановлений партии и правительства отмечается, что коренной вопрос экономической стратегии – кардинальное ускорение научно-технического прогресса. При этом особое место отводится увеличению надежности и долговечности устройств в различных областях техники, в том числе кондиционирующих и охлаждающих.

Среди различных видов холодильных машин вихревые трубы отличаются простотой конструкции и высокой надежностью в работе. Однако, основным фактором, сдерживающим широкое применение вихревых труб, является, как известно, их низкая энергетическая эффективность.

Совершенствование конструкции и создание новых высокоэффективных вихревых охлаждающих аппаратов позволит расширить области их применения и во многих случаях заменит ими ранее использовавшиеся холодильные машины, получив при этом целый ряд существенных преимуществ.

Поэтому вопросы изучения рабочего процесса вихревых труб и создание вихревых охлаждающих аппаратов, имеющих большую энергетическую эффективность являются актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Цель работы – разработка и исследование вихревого охлаждающего аппарата (комбинированной вихревой трубы – КВТ), имеющего, без дополнительных энергетических затрат, большое значение холодопроизводительности и адиабатного КПД по сравнению с вихревыми трубами без утилизации энергии холодного и горячего потоков;

XV 1218
Институт холода
ОНАХТ
Библиотека

- экспериментальное исследование рабочего процесса адиабатных вихревых труб, входящих в состав КВТ;
- проведение газодинамических исследований для объяснения особенностей рабочего процесса диффузорной вихревой трубы с аэродинамической решеткой;
- теоретическое и экспериментальное исследование рабочего процесса струйно-вихревого эжектора, работающего от холодного потока диффузорной вихревой трубы;
- разработка методики расчета характеристик КВТ.

Научная новизна. На основании проведенных исследований определены особенности рабочего процесса диффузорной вихревой трубы, работающей при атмосферном давлении на входе. Выявлены закономерности течения газа в области аэродинамической решетки диффузорной вихревой трубы, определены оптимальные геометрические соотношения аэродинамической решетки и зарешеточного пространства. Исследовано влияние основных геометрических параметров на рабочий процесс струйно-вихревого эжектора, работающего от холодного потока диффузорной вихревой трубы, сняты его дроссельные характеристики, позволяющие определить область его использования. Разработана методика расчета характеристик вихревого охлаждающего аппарата (КВТ).

Основные научные положения, защищаемые в работе:

1. Утилизация энергии, выходящих из вихревой трубы потоков в эжекторах, эжектирующих соответственно холодную и горячую составляющие другой вихревой трубы, сопловой ввод которой сообщен с атмосферой, позволяет без дополнительных энергозатрат увеличить холодопроизводительность охлаждающего аппарата.
2. Рециркуляция части горячего потока с помощью аэродинамической решетки повышает температурный эффект охлаждения и

холодопроизводительность, а также увеличивает давление холодного потока диффузорной вихревой трубы, что позволяет эффективно утилизировать его кинетическую энергию в струйно-вихревом эжекторе.

Практическая ценность работы заключается в реализации предложенной схемы КВТ, в получении научно обоснованных данных, методике и алгоритме расчета, необходимых при проектировании новых, более эффективных вихревых охлаждающих аппаратов различной производительности, а также в рекомендациях по оптимальным геометрическим соотношениям аэродинамической решетки и струйно-вихревого эжектора холодного потока диффузорной вихревой трубы.

Реализация результатов работы в промышленности.

Результаты проведенных исследований, рекомендации и методика расчета КВТ использованы при: - разработке вихревой холодильной камеры, предназначенной для технологической обработки деталей холодом;

- вихревых труб для охлаждения твердосплавного инструмента;
- различных конструкций кондиционирующих устройств для охлаждения электронных систем управления станков с ЧПУ, внедренных на Куйбышевском агрегатном производственном объединении на Куйбышевском авиационном заводе, на заводе "Респиратор" г.Орехово-Зуево Московской обл.

Суммарный годовой экономический эффект, подтвержденный актами внедрений, составил более 200 тыс.руб.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на областной научно-технической конференции "60-летию СССР - ударный труд, знания, инициативу и творчество молодых", Куйбышев, 1982г.; на третьей научно-технической конференции молодых уче-

ных и специалистов КуАИ, Куйбышев, 1984г.; на областной научно-технической конференции "Молодежь и научно-технический прогресс", Куйбышев, 1984г.; на научном семинаре в Дальневосточном политехническом институте, Владивосток, 1987г.; на четвертой и пятой Всесоюзных научно-технических конференциях "Вихревой эффект и его применение в технике", Куйбышев, 1983 и 1987 гг..

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 2 авторских свидетельства на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографии из 82 наименований и приложений. Содержит 117 страниц машинописного текста и 60 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены направления и задачи исследования диссертационной работы, сформулированы научные положения.

В первой главе приводится обзор литературных источников по способам повышения эффективности процесса вихревого энергетического разделения газов.

Анализ конструктивных решений, повышающих энергетическую эффективность вихревых труб и вихревых холодильных аппаратов, позволил выявить, что утилизация энергии выходящих из вихревой трубы потоков — один из путей повышения их экономичности. Установлено, что наибольший температурный эффект охлаждения и холодопроизводительность имеют диффузорные вихревые трубы с аэродинамической решеткой, в которых процесс энергоразделения газа протекает при постоянном периферийном статическом

давлении по длине камеры энергетического разделения.

Отмечено, что одной из перспективных областей использования вихревых труб, является кондиционирование локальных объемов. Особой актуальностью отличается разработка вихревых кондиционеров для обеспечения необходимого теплового режима работы промышленной электроники, в частности электронных систем управления станков с ЧПУ.

Предлагается новое техническое решение (а.с. № 1078213) вихревого охлаждающего аппарата — комбинированной вихревой трубы (КВТ), его принципиальная схема представлена на рис.1. КВТ состоит: из активной вихревой трубы (АВТ) 1, питаемой от системы сжатого газа, холодный и горячий потоки которой направляются в эжектора холодного (ЭХП) 2 и горячего (ЭГП) 3 потоков в качестве эжектируемых соответственно холодный и горячий потоки пассивной вихревой трубы (ПВТ) 4, сопловой ввод которой сообщен с атмосферой.

Такая конструкция КВТ позволяет получить охлажденный поток из ПВТ без дополнительных энергетических затрат, благодаря использованию энергии выходящих из АВТ потоков, и тем самым увеличить холодопроизводительность и адиабатный КПД охлаждающего аппарата.

На основании проведенного анализа конкретизируются задачи работы:

- исследование рабочих процессов и получение характеристик элементов, входящих в состав КВТ;
- разработка конструкции и исследование рабочего процесса КВТ;
- разработка инженерной методики расчета характеристик КВТ.

Во второй главе представлены материалы исследования рабочего процесса ПВТ. Она представляет собой диффузорную вихревую

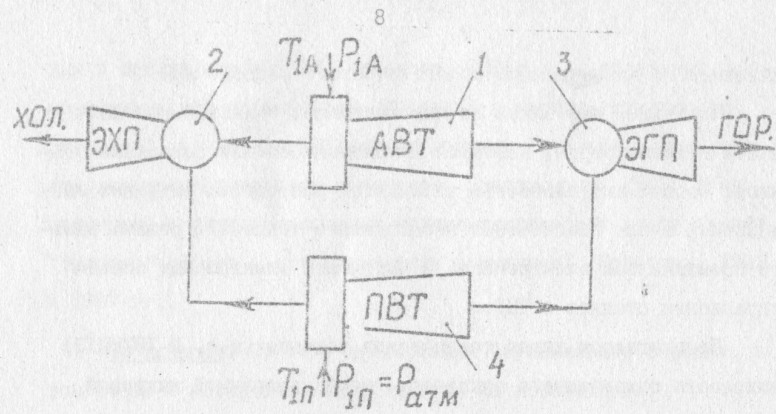


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной вихревой трубы
 1 - активная вихревая труба; 2 - эжектор холодного потока;
 3 - эжектор горячего потока; 4 - пассивная вихревая труба.

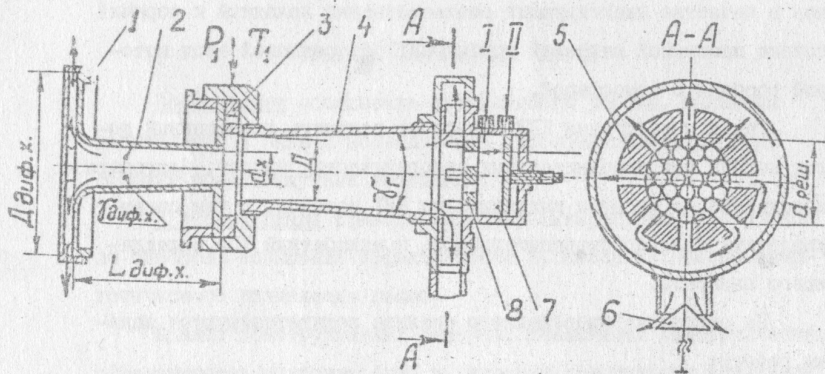


Рис. 2. Конструкция исследуемой пассивной вихревой трубы.
 1 - радиально-щелевой диффузор; 2 - осевой диффузор;
 3 - сопловой аппарат; 4 - камера энергетического разделения;
 5 - насадка выхода горячего потока; 6 - дроссель горячего потока;
 7 - регулируемое зарешеточное пространство;
 8 - аэродинамическая решетка.

трубу с аэродинамической решеткой рис.2. В схеме КВТ ПВТ работает при атмосферном давлении на входе и малых степенях расширения газа, что потребовало дополнительных экспериментальных исследований по установлению ее основных геометрических соотношений.

На первом этапе, методом факторного эксперимента, определялась оптимальная конструкция аэродинамической решетки и зарешеточного пространства, что было достигнуто поочередным изменением одного из трех основных геометрических параметров. В результате $\Delta T_{хп}$ и $q_{пвт}$ увеличились на 10-15%, кроме того было отмечено, что аэродинамическая решетка, в сочетании с зарешеточным пространством, позволяет увеличить давление и как следствие этого - кинетическую энергию холодного потока, выходящего из диафрагмы вихревой трубы.

Для полного понимания физической сущности процессов, происходящих на горячей стороне камеры энергетического разделения, проведено аэродинамическое исследование. Эксперимент проводился методом зондирования по радиусу, в двух сечениях зарешеточного пространства. В результате анализа полученных эпюр распределения осевой и радиальной составляющих скорости, а также статического давления для различных режимов работы вихревой трубы и конструкций аэродинамической решетки, представляется следующая картина газодинамических процессов.

Часть периферийного вихря через отверстия в решетке, расположенные на относительном радиусе $\bar{R} = \frac{r_l}{R_{реш.}} = 1,0-0,8$, входит в зарешеточное пространство с осевой скоростью близкой по значению ($W_{\Omega} = 150-190 \text{ м/с}$) к осевой составляющей периферийного вихря. При этом происходит раскрутка потока. Зашедший за решетку поток газа, имеющий высокое давление, разво-

рачивается и постепенно ускоряясь движется к центру. Через центральные отверстия в решетке поток устремляется в осевую и приосевую зоны камеры энергетического разделения, имеющую пониженное давление. Величина скорости потока, выходящего из зарешоточного пространства, зависит от давления за решеткой, которое в свою очередь связано с режимом работы вихревой трубы, а также от размеров отверстий в осевой области аэродинамической решетки, выполняющих роль сопел.

Таким образом, рециркуляция части периферийного вихря через зарешоточное пространство в осевую область камер энергетического разделения позволяет:

- снизить периферийное статическое давление горячего потока, что приводит к увеличению расхода газа через сопловой впуск вихревой трубы (при постоянном P_1);
- увеличить статическое давление в зарешоточном пространстве и повысить давление холодного потока выходящего из диафрагмы;
- интенсифицировать энергообмен в камере энергетического разделения за счет дополнительной турбулизации осевого вихря, струями газа, выходящими из-за решетки;
- увеличить холодопроизводительность вихревой трубы, за счет увеличения расхода газа через сопловой аппарат и повторного участия рециркулирующего потока в процессе энергетического разделения.

Совокупность этих факторов и обуславливает положительное влияние аэродинамической решетки на рабочие характеристики диффузорной вихревой трубы.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования эжектора холодных потоков КВТ. Принимая во

внимание специфику работы ЭХП в схеме КВТ, высокую скорость холодного потока, выходящего из диафрагмы АВТ (достигающую критического значения), а также его низкое полное давление, была предложена конструкция струйно-вихревого эжектора (см. рис.3), сопло активного потока в котором непосредственно примыкает к диафрагме вихревой трубы.

В ходе исследований определено влияние основных конструктивных элементов эжектора на его характеристики.

Для выяснения рабочих возможностей ЭХП были получены его дроссельные характеристики, зависимости вида $\Pi_2 = f(\Pi_x)$ (рис.4) в диапазоне практического использования АВТ, т.е. при $\mu_A = 0,3 - 0,8$ и различных размерах камер смещения. Анализ полученных зависимостей показывает, что они схожи с характеристиками прямоструйного эжектора и качественно отличаются от аналогичных характеристик прямооточного вихревого эжектора. Дроссельные характеристики ЭХП существенно зависят от режима работы АВТ, т.е. от расхода и давления активного потока эжектора. Так с увеличением μ_A достижимый коэффициент эжекции становится меньше, характеристика приближается к оси ординат, пересекаясь с ней в точке соответствующей $\Pi_x = 0$, при этом обеспечиваются наиболее высокие значения Π_2 .

На производительность ЭХП влияет и основная геометрическая характеристика $f_{к.с.} = \frac{F_{к.с.}}{F_{АВ}}$. Это влияние существенно больше, чем на прямоструйном аналоге.

В качестве АВТ применялась конструкция диффузорной вихревой трубы с аэродинамической решеткой и комбинированным диффузором горячего потока, состоящим из осевого, переходящего в радиально-щелевой. Такая конструкция АВТ позволила получить более высокие давления выходящих из вихревой трубы потоков:

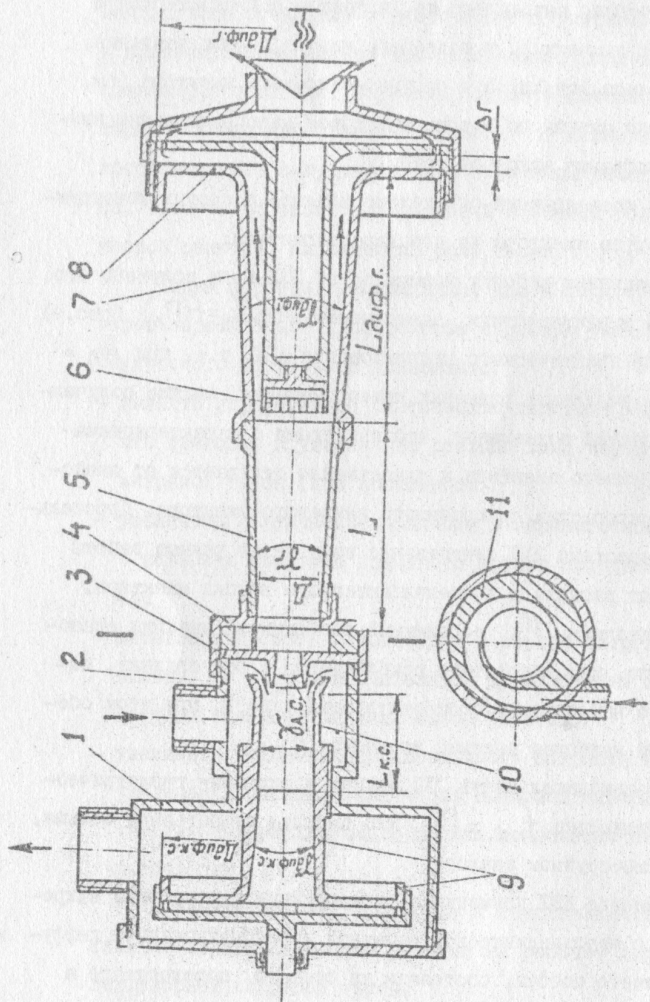


Рис. 3. Конструкция эжектора холодного потока.
 1 - ресивер смеси газов; 2 - ресивер пассивного потока; 3 - солено активного потока - диафрагма вихревой трубы; 4 - корпус соплового аппарата; 5 - камера энергоразделения; 6 - азрогинами-ческая решетка; 7 - осевой диффузор горячего потока; 8 - радиально-щелевой диффузор горячего потока; 9 - осевой и радиально-щелевой диффузоры смеси газов; 10 - камера смешения эжектора; 11 - сопловой аппарат.

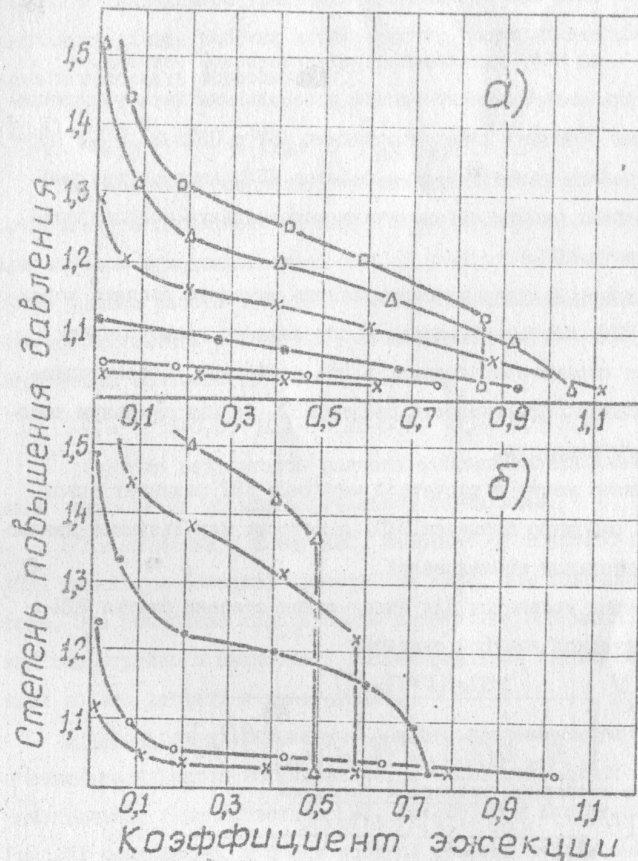


Рис. 4. Дроссельные характеристики эжектора холодных потоков комбинированной вихревой трубы.

$D = 21 \text{ мм}; d_x = d_{ac} = 0,48D; f_{к.с.} = 2,56.$

а) $P_{1A} = 0,4 \text{ МПа};$ б) $P_{1A} = 0,6 \text{ МПа}$

* $\mu_A = 0,3; \circ - \mu_A = 0,4; \bullet - \mu_A = 0,5; \times - \mu_A = 0,6; \Delta - \mu_A = 0,7; \square - \mu_A = 0,8$

горячего – за счет утилизации кинетической энергии в диффузорах;

холодного – за счет установки аэродинамической решетки.

Воспользовавшись полученными дроссельными характеристиками, а также рабочими характеристиками АВТ и ПВТ $\Delta T_x, q_{\text{ВТ}} = f(\mu, \pi)$ были определены геометрические размеры ПВТ, которые при выбранных режимах работы обеспечивали максимальную холодопроизводительность КВТ.

В четвертой главе рассматривается методика расчета характеристик КВТ, которая сводится к определению геометрических и режимных параметров входящих в нее элементов, обеспечивающих наибольшую эффективность работы КВТ, ее максимальную холодопроизводительность.

Основное место в расчетной методике КВТ занимает вывод уравнений рабочего процесса ЭХП, в которых используются данные экспериментальных исследований.

Получены уравнения для определения степени сжатия ЭХП с цилиндрической камерой смещения

$$\pi_3 = \psi \frac{(1+n_x)(1+n_x\theta)}{\left[\frac{1}{\pi_{xА} \cdot q(\lambda_{xА})} + \frac{1}{\alpha \cdot \pi_{xА} \cdot q(\lambda_{xА})} \right] \cdot q(\lambda_{см})}$$

и камеры с изобарным процессом смещения

$$\pi_3 = \psi \frac{\sqrt{(1+n_x)(1+n_x\theta)}}{\bar{f} \left[\frac{1}{\pi_{xА} \cdot q(\lambda_{xА})} + \frac{1}{\alpha \cdot \pi_{xА} \cdot q(\lambda_{xА})} \right] \cdot q(\lambda_{см})},$$

где $\bar{f} = \frac{F_{см}}{F_{xА} + F_{xП}}$ и $\alpha = \frac{F_{xА}}{F_{xП}}$ – геометрические параметры камеры смещения.

Входящие в уравнения газодинамические функции $q(\lambda_{xА})$ и $q(\lambda_{см})$ определяются либо по экспериментальным зависимостям,

либо с использованием уравнений количества движения для ЭХП. Используя выведенное уравнение энергии для КВТ были получены выражения для ее рабочих характеристик, позволившие рассчитать и построить зависимости:

$$\Delta T_{\text{к.квт}}, q_{\text{квт}}, \gamma_{\text{ад.квт}} = f(\mu_{\text{квт}}).$$

На основании разработанной методики был составлен алгоритм расчета характеристик КВТ. Расчет проводился итерационным методом с использованием ЭЕМ. В результате были определены условия работы АВТ, ПВТ и ЭХП, обеспечивающие максимальную эффективность работы КВТ, ее максимальный адиабатный КПД. Этот режим соответствует

$$\mu_A = 0,55-0,6; \mu_P = 0,25-0,3; \Gamma_x = 0,5-0,6.$$

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение.

ЭХП, входящий в схему КВТ, работает от горячего потока АВТ, параметры которого существенно выше, чем холодного потока. Это позволило использовать в качестве ЭХП классический тип струйного эжектора и воспользоваться известными данными по его расчету и конструкции.

В пятой главе описываются области практического использования результатов исследования, а также приводятся экспериментальные характеристики КВТ. Анализ этих характеристик (рис.5) показывает, что они с одной стороны ограничены пунктирной линией, соответствующей режиму работы КВТ при $\Gamma_x = 0$, совпадающей с характеристиками АВТ, с другой – предельными режимами работы ЭХП, обеспечивающими наибольшие π_3 . Совмещение на одном графике характеристик АВТ и КВТ, позволяет наглядно проводить выбор наиболее экономичных режимов работы

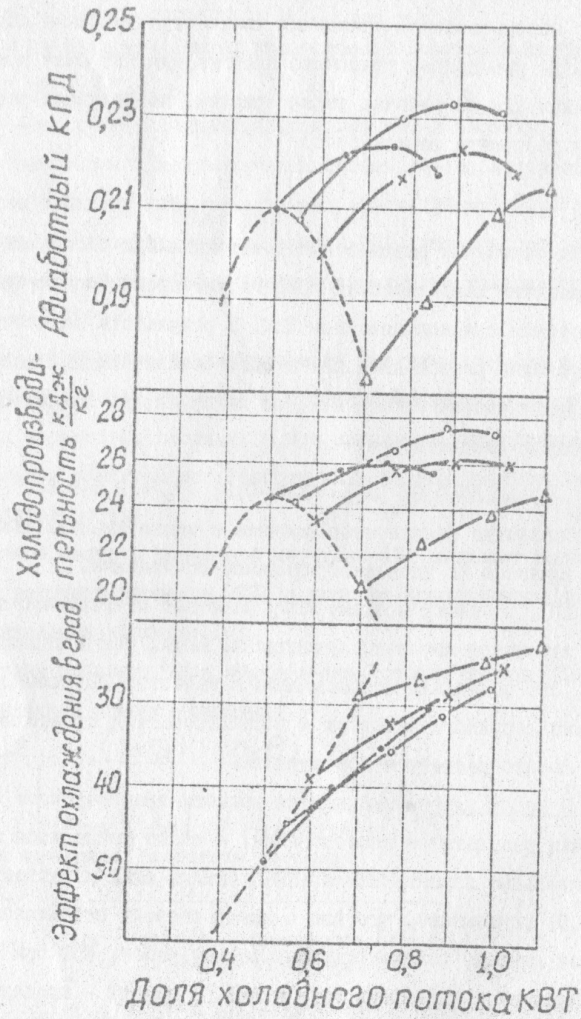


Рис. 5. Экспериментальные характеристики комбинированной вихревой трубы.

$P_{1A} = 0,6$ МПа, $P_{1П} = 0,103$ МПа, $T_{1A} = T_{1П} = 293$ К, $\mu_{П} = 0,3$, $f_{к.с.} = 3,24$
 $\bullet - \mu_A = 0,5$, $\circ - \mu_A = 0,55$, $\times - \mu_A = 0,6$, $\Delta - \mu_A = 0,7$
 --- характеристика АВТ, $d_A = 21$ мм ($\Pi_x = 0$).

КВТ. Из представленных характеристик видно, что прирост значений $q_{кат}$ и $\zeta_{ад.кат}$ по сравнению с максимальным значением у АВТ составляет 9-11%. Отмечается, что величина этого прироста не является предельной, т.к. имеются резервы дальнейшего совершенствования, прежде всего конструкции ЭХП.

Приводятся примеры промышленного использования вихревого микрохолодильника, разработанного на основе конструкции ПВТ. Его применение для охлаждения режущего инструмента, а также для охлаждения электронных блоков управления станков с ЧПУ оказалось экономически целесообразным.

Конструкции вихревых микрокондиционеров, на основе схемы КВТ и данных по исследованию ЭХП, предназначенные для промышленной электроники, позволили сократить простои дорогостоящего оборудования за счет увеличения надежности работы электронных систем. Исключить их отказы по причине нарушения теплового режима работы.

Отмечено, что перспективной областью применения схем КВТ, является получение низких температур. При этом, особенностью ее работы является то, что смесь холодных потоков из ЭХП, пройдя камеру холода и охладив изделия, поступает на вход ПВТ с температурой ниже окружающей среды. Это позволяет понизить температуру газа, выходящего из ЭХП за счет внутренней регенерации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Предложено и практически реализовано новое техническое решение вихревого охлаждающего аппарата (КВТ) по а.с. № 1078213, позволяющего без дополнительных энергетических затрат, за счет рационального использования энергии выходящих

XV 1218

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БИБЛИОТЕКА

из вихревой трубы потоков, увеличить его холодопроизводительность и адиабатный КПД на 9-11%.

2. Исследования газовых течений в области зарешеточного пространства аэродинамической решетки показали, что рециркуляция части периферийного потока газа через зарешеточное пространство интенсифицирует процесс энергоразделения в вихревой трубе, ведет к увеличению температурного эффекта охлаждения и холодопроизводительности, а также повышает давление холодного потока.

3. Исследован рабочий процесс адиабатной диффузорной вихревой трубы с аэродинамической решеткой, работающей при атмосферном давлении на входе и малых степенях расширения газа. Получены новые существенные данные о геометрических размерах соплового аппарата.

4. Исследование влияния геометрических параметров струйно-вихревого эжектора холодных потоков КВТ на его рабочий процесс, позволило разработать эффективную конструкцию эжектора, обеспечивающую работоспособность КВТ. Полученные дроссельные характеристики ЭЖ дали возможность определить область его применения и получить необходимые данные для расчета КВТ.

5. Проведенное сопоставление результатов расчета характеристик КВТ, выполненных по разработанной методике, с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение.

6. Результаты исследований использованы при разработке различных промышленных охлаждающих устройств, внедрение которых показало обоснованность полученных выводов, рекомендаций, метода расчета. Общий экономический эффект от их внедрения составил более 200 тыс. руб. (акты внедрений прилагаются).

Основные положения диссертации изложены
в следующих печатных работах:

1. Князев А.Е. Исследование влияния конструкции диафрагмы на эффективность работы вихревой трубы // Тезисы докладов научно-технической конференции "60-летию СССР ударный труд и творчество молодых". - Куйбышев, 1983, - С.227.
2. А.с. 1036962 СССР, МКИ F 04 F 5/42 Вихревой эжектор / В.И. Метенин, И.Н.Денисов, В.В.Черепанов, А.Е.Князев (СССР). - Оpubл. в Б.И., 1983, № 31.
3. Арефьев С.Ф., Князев А.Е. Экспериментальное исследование вихревой трубы // Тезисы докладов научно-технической конференции "60-летию СССР ударный труд и творчество молодых". - Куйбышев, 1983, - С.228.
4. Экспериментальное исследование вихревой трубы / Метенин В.И., Князев А.Е., Арефьев С.Ф., Бобров В.В. // В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев, КуАИ, 1984, - С.56-59.
5. А.с. 1078213 СССР, МКИ F 25 В 9/02. Вихревая труба / В.И. Метенин, А.Е.Князев (СССР). - Оpubл. в Б.И., 1984, № 9.
6. Князев А.Е., Рябушко Е.В., Балбеков А.И., Коллеров М.И. Влияние температур смешиваемых потоков на работу эжектора холодного потока вихревой трубы // Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодежь и научно-технический прогресс". - Куйбышев, 1984, - С.37.
7. Князев А.Е. Исследование влияния геометрических параметров активного сопла на работу эжектора холодного потока вихревой трубы // Тр.3 Науч.-техн.конф.мол.ученых и спец. КуАИ: Мех.жидкости и газа: Сборник / Куйбышев, 1984. - С.39-44. - Dep. в ВИНТИ 25.03.85, № 2977-85.

В. Метенин В.И., Книзев А.Е. Экспериментальное исследование эжектора холодного потока вихревой трубы // В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев, КуАИ, 1988. - С.53-56.

Условные обозначения

D - диаметр камеры энергетического разделения;
 ΔT_x - температурный эффект охлаждения, град;
 $q_{от}$ - удельная холодепроизводительность, $\frac{кДж}{кг}$;
 P_i - статическое давление на входе в вихревую трубу, МПа;
 μ - массовая доля холодного потока вихревой трубы;
 π - степень расширения газа в вихревой трубе;
 $\pi_{хл}$ - степень расширения активного холодного потока эжектора;
 $\pi_{э}$ - степень повышения давления эжектора; η - коэффициент эжекции; F - площадь, $м^2$; θ - отношение полных температур потоков смешиваемых в эжекторе; ψ - коэффициент потерь полного давления; $\zeta_{ад}$ - адиабатный КПД.

Индекс

A - активная вихревая труба;
 П - пассивная вихревая труба;
 См - смесь активного и пассивного газов;
 X - параметры холодного потока;
 З.пр. - зарешеточное пространство аэродинамической решетки;
 К.С. - камера смещения;
 А.С. - активное сопло