

Автореферат Н  
к 89

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

КУЗЬМИН Алексей Авенирович

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МИКРООХЛАДИТЕЛЕЙ  
НА БАЗЕ МИКРОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ ТРУБ

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1990

г.Одесса, ротاپронт СИМТЭ. Подписано к печати 24.09.90  
Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 1577-90.

Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

- Научный руководитель - кандидат технических наук, засл. изобретатель Латв. ССР АЗАРОВ А.И., г. Ленинград
- Официальные оппоненты - доктор технических наук АРТАМОНОВ Н.А., г. Москва
- кандидат технических наук КАЛЖИНИ В.А., г. Москва
- Ведущая организация - Куйбышевский авиационный институт

Защита состоится " " октября 1990г. в 11.00 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу: 270057, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ОИИТЭ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " сентября 1990г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
к.т.н., доцент

Р.К. Гикульшин

Исх. № 2003-1117

г.Одесса; ротапринт ОИИТЭ. Подписано к печати  
Объем 1,0. Тираж 100. Заказ 1430-90

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Микроохладители находят все более широкое применение в науке и технике. Выбор генератора холода для этих устройств производится с учетом различных технико-экономических и эксплуатационных факторов. При холодопроизводительности более 100 Вт предпочтительны (в диапазоне температур 230...270 К) пароконденсационные и турбохолодильные машины. Но при снижении потребного уровня холодопроизводительности энергетические и технико-экономические показатели таких микроохладителей резко ухудшаются.

Переход при этом к нетрадиционным методам генерации холода и, прежде всего, к использованию вихревого эффекта становится перспективным. Надежность и долговечность вихревых охладителей, а также возможность их применения в качестве эжекторов и сепараторов привлекает разработчиков новых технических систем. Слабая изученность совокупности эффектов, реализуемых в вихревых микроохладителях, делает актуальными исследования в этой области.

Задача исследования - изучить экспериментально и аналитически влияние масштабного фактора на работу микромасштабных вихревых труб (МВТ) диаметром менее 5 мм, определить рациональные эксплуатационные параметры и выделить предпочтительные конструктивные решения; создать и внедрить в практику эффективные вихревые микроохладители с использованием результатов исследования.

Научная новизна. Предложены соотношения, позволяющие в инженерных расчетах учитывать влияние пограничных слоев вихревой трубы на температурно-динамические и энергетические характеристики. Разработана методика для сравнения воздухоохлаждающих систем с различными генераторами холода. Получены данные, позволяющие проектировать и создавать эффективные вихревые микроохладители.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. С уменьшением диаметра вихревой трубы и возрастанием роли пограничных слоев (придиафрагменного, пристенного), увеличивается доля холодного потока, при которой реализуется режим максимальной температурной эффективности и уменьшается отношение давлений, при котором наступает критический режим работы.

2. Уменьшение относительной длины МВТ до шести диаметров (калибров), независимо от конструкции камеры энергоразделения, практически не снижает ее энергетическую эффективность.

Основные научные результаты:

- аналитически получены соотношения, позволяющие определить воз-

XV 1178  
ИНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
Библиотека

действие масштабного фактора (диаметра) на температурно-динамические и энергетические характеристики вихревой трубы;

- экспериментально определены рациональные конструктивные параметры вихревых микротруб;
- определена зона целесообразного использования микромасштабных вихревых труб (МВТ) в воздухоохлаждающих системах.

Практическая ценность работы. Полученные аналитические соотношения и экспериментальные данные позволяют создавать эффективные микроохладители, применение которых существенным образом расширяет область использования вихревых охладителей.

Получены новые экспериментальные данные, позволяющие оценить эффективность работы вихревой трубы в области малых диаметров и низких температур.

Реализация результатов работы. Созданы устройства медицинского назначения: гипотермическое устройство для лечения остеомиелита и устройство для нанесения лекарственных препаратов на зубную ткань и слизистую оболочку полости рта. Оба устройства используются в новых эффективных лечебных методиках. Аппарат для нанесения лекарственных препаратов на зубную ткань защищен авторским свидетельством.

Кроме того, создан эффективный микромасштабный вихревой сепаратор (МВС), примененный в ступени предварительного охлаждения гелиевой криогенной системы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на III Всесоюзной научно-технической конференции по холодильному машиностроению, М.: ЭНИН, 1982; на IV и V Всесоюзных научно-технических конференциях "Вихревой эффект и его применение в технике", Куйбышев, 1983 и 1987 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложений, и содержит 178 страниц машинописного текста, 50 рисунков и 5 таблиц

#### Краткое содержание работы

В первой главе приводится краткий обзор работ, объясняющих физическую суть вихревого энергетического разделения, отмечается, что наиболее полно разработанной и удобной в инженерных расчетах является гипотеза, выдвинутая А.П.Меркуловым. Анализ гипотез и критериев эффективности показал необходимость уточнения известных эмпирических соотношений, в частности поправки на масштаб ( $Z_2$ )

при использовании их для расчетов микромасштабных вихревых труб.

Проведен обзор конструкций вихревых труб для выявления решений предпочтительных в области малых диаметров. При этом учитывалось общее снижение эффективности, обусловленное масштабом, а также возможность использования других эффектов, сопутствующих вихревому, - сепарационного, эжекционного, акустического. Сделан вывод о том, что в микромасштабной области наиболее целесообразно применение неохлаждаемых (адиабатных) вихревых труб, причем основные геометрические соотношения адиабатных МВТ не могут быть получены аналитически и требуют проведения специальных исследований. Сопоставление различных генераторов холода показало перспективность применения МВТ в охлаждающих системах малой производительности ( $Q_0 \approx 30$  Вт), что объясняется значительным снижением энергетических показателей традиционных источников холода под воздействием масштабного фактора. Более точное определение границ рационального использования МВТ требует учета многих факторов и является большой самостоятельной задачей.

Проведенный анализ с учетом отсутствия в литературных источниках надежных данных о микротрубах, позволяет сформулировать задачи исследования:

- создать аналитическую методику, позволяющую в инженерных расчетах учесть влияние масштабного фактора на температурно-энергетические и режимные параметры вихревых труб;
- экспериментально исследовать адиабатные МВТ для определения рациональных геометрических и режимных параметров;
- определить области практического применения созданных микротруб.

Во второй главе проводится анализ факторов, снижающих эффективность работы МВТ. Математическое описание процессов, происходящих в вихревой трубе базируется на уравнении движения Навье-Стокса, уравнении состояния идеального газа, уравнениях энергии и неразрывности. Решение этих уравнений с учетом предложенных А.П.Меркуловым допущений позволяет определить основные характеристики вихревых труб: температуру, давление и расходы потоков в сопловом сечении.

Анализ полученных соотношений показывает, что влияние масштабного фактора определяется взаимодействием пограничных слоев вихревой трубы с потоками, участвующими в энергоразделении. Исходя из конечных эффектов разделения, целесообразно рассматривать отдельно пограничный слой, текущий вдоль камеры энергоразделения.

и придиафрагменный пограничный слой (Рис.1). Расчет характеристик придиафрагменного пограничного слоя проводился для двух режимов течения - ламинарного и турбулентного.

При ламинарном режиме движения определение основных параметров паразитного потока проводилось по методике, предложенной Бедевандтом и Нидалом. Полученные авторами решения позволили определить толщину  $\delta$  и объемный расход  $V_n$  пограничного слоя:

$$\delta = 8 \sqrt{V/\omega}; \quad V_n = 1,38 R_1^2 \sqrt{\omega V}.$$

Основные зависимости для массового расхода пограничного слоя  $G_{nc}$  и радиальной скорости  $V_r$  при турбулентном режиме течения:

$$G_{nc} = \frac{1,2 V^{3/4} r (r\omega)^{3/4}}{(R_1 - r)^{1/4}} \rho; \quad V_r = \frac{0,07 V^{1/4} r (r\omega)^{3/4} (z/\delta)^{1/2} (1 - z/\delta)}{\delta^{3/4}}$$

получены из общих уравнений Навье-Стокса по методике, предложенной Дорфманом.

Стекая по плоскости диафрагмы, пограничный слой подмешивается к холодному потоку и повышает его температуру до величины  $T_{xn}^*$

$$T_{xn}^* = \frac{\int_{F_2}^{\bar{r}_2} \rho_{\mu} V_z^* T^* r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} T^* r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} T^* r d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_0} \rho V_z^* T^* r d\bar{r}}{\int_{F_0}^{\bar{r}_0} \rho V_z^* r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} r d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_0} \rho V_z^* r d\bar{r}}$$

Кроме воздействия на температурно-энергетические характеристики, придиафрагменный пограничный слой "загромождает" проходное сечение диафрагмы, оказывая влияние на режимные параметры вихревой трубы. Уменьшение радиуса диафрагмы до величины  $R_n = R_1 \sqrt{\frac{2}{3}} - \frac{\rho}{\rho} \frac{1,38 \sqrt{\omega V}}{V_n}$  создает дополнительное гидравлическое сопротивление выходящему холодному потоку, сказывается на наступлении характерных режимов работы -  $\Delta T_{xmax}$ , критического режима.

Пограничный слой, текущий вдоль вихревой камеры, не участвует в процессе энергоразделения и, смешиваясь у дросселя с подогретым потоком, покидает вихревую трубу. Для случая  $Re \leq 10^4 \dots 10^5$  рассматриваемая задача может быть сведена к течению пограничного слоя над пластиной. Получено соотношение для определения массового расхода этого пограничного слоя:

$$G_{nc}' = 0,65 z Re_z^{-0,2} \frac{(1 - R_1 - R_n) G}{R_1 (1 - R_n^2)}$$

Расчеты, проведенные на ЭВМ, показали, что влияние пограничных слоев на рабочие характеристики микротруб существенно. Так, например, придиафрагменный паразитный поток снижает величину  $\Delta T_x$

более чем на 10% у вихревой трубы диаметром 2 мм. В связи с этим, энергетический баланс для микротруб предложено записывать в виде:

$$GT_r^* = (G_x + G_{nc}) T_{xn}^* + (G_r + G_{nc}') T_{rn}^*,$$

а потерю холодопроизводительности, вызванную пограничным слоем, учитывать соотношением:

$$\Delta i_x = 1,38 \rho R_1 \sqrt{\omega V} \frac{\int_{F_2}^{\bar{r}_2} \rho_{\mu} V_z^* T^* r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} T^* r d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_0} \rho V_z^* T^* r d\bar{r}}{\int_{F_0}^{\bar{r}_0} \rho V_z^* r d\bar{r} + \int_{F_K}^{\bar{r}_K} \rho_K V_{zK} r d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_0} \rho V_z^* r d\bar{r}}$$

Установленная зависимость от масштаба величин  $T_{xn}$ ,  $\mu_n$ ,  $G_{nc}'$  позволяет предположить, что с уменьшением диаметра вихревой трубы (в области МВТ) наступление режима  $\Delta T_{xmax}$  будет наблюдаться при больших значениях  $\mu$ , чем для труб большего диаметра.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию МВТ и определению их рациональных геометрических и режимных параметров. Под рациональными понимаются параметры, обеспечивающие устойчивую работу микротрубы с наивысшими показателями эффективности при наименьших затратах (энергетических, массо-габаритных, технологических и т.д.).

Исследовались вихревые трубы диаметром 2 и 3 мм, имевшие прямоугольный спиральный ввод с относительной площадью проходного сечения сопла  $F_2 = 0,1$ .

Отмечается, что в МВТ целесообразно применение круглых диафрагм с относительной площадью проходного сечения  $F_2 = 0,25$ .

Для изучения влияния формы конуса на эффективность МВТ были исследованы цилиндрические и конические вихревые трубы с углом раствора конуса, изменявшемся от  $2^\circ$  до  $7^\circ$ . Установлено, что для МВТ достаточно большой длины ( $L = 15D$ ), в диапазоне  $\mathcal{N} = 2-6$ , конусность камеры энергоразделения не оказывает существенного воздействия на величину эффекта температурного разделения. Сравнение конических и цилиндрических МВТ по величине достигаемого эффекта охлаждения показало, что преимущество конических труб над цилиндрическими проявляется лишь при уменьшении длины камеры энергоразделения до  $L = 4D$ .

Сопоставление полученных данных с известными для вихревых труб большего диаметра подтвердили выдвинутое ранее предположение о том, что режим  $\Delta T_{xmax}$  у МВТ будет смещен в область больших значений  $\mu$ . У всех исследованных микротруб режим  $\Delta T_{xmax}$  наблюдался в диапазоне  $\mu = 0,5 \dots 0,35$  при  $\mathcal{N} = 2-6$  (рис.2).

В процессе экспериментальных исследований изучалось влияние различных элементов устройства для выпуска горячего потока - крестовина, сетка, поворот "горячей" части камеры энергоразделения на  $90^\circ$ . Было определено, что установка развихрителей оказывает влияние на характеристики МВТ лишь при уменьшении длины вихревой зоны до значений  $L \leq 5D$ , смещая наступление режима  $\Delta T_{X, \max}$  в область больших значений  $\mu$  ( $\mu = 0,5 - 0,6$ ).

Для определения рациональной длины ( $L$ ) МВТ исследовались в диапазоне изменений  $L = 2-15D$ . Уменьшение длины вихревой камеры от 15 до 6...5 калибров не сказывалось существенно на эффекте охлаждения. Дальнейшее уменьшение длины приводило к резкому снижению величины  $\Delta T_X$  (рис.3) и к смещению наступления режима  $\Delta T_{X, \max}$  в область больших значений  $\mu$ .

Экспериментальные исследования, проведенные на микротрубах, показали, что применение ограждения диафрагмы с относительной высотой  $h/D = 0,3 - 0,5$  не влияет на эффективность их работы. Увеличение высоты ограждения приводило к уменьшению эффекта охлаждения. Анализ полученных данных позволяет предполагать, что для разрушения пограничного слоя МВТ ограждение следует устанавливать на радиусе, большем чем  $R_g$ , либо применять ряд ограждений концентрично установленных по отношению к диафрагме. Апробация конструкций ограждений с учетом данных рекомендаций показала, что для МВТ установка многорядного ограждения с относительной высотой  $h/D = 0,3$  позволяет добиться увеличения  $\Delta T_X$  на 2...3% и смещает наступление режима  $\Delta T_{X, \max}$  в область значений  $\mu = 0,3...0,35$  (рис.2). Полученные данные подтверждают защищаемое в работе положение о характере воздействия придиафрагменного пограничного слоя на режим максимальной температурной эффективности.

Проведено сравнение рациональных геометрических параметров МВТ и вихревых труб большого диаметра (табл.1). Отмечается характерное для адиабатных вихревых труб сокращение относительной длины камеры энергоразделения и увеличение относительной высоты разрушителя пограничного слоя (бурта) при уменьшении масштаба.

При определении рациональных режимов работы МВТ исследовались в широком диапазоне изменений  $\mathcal{R}$  (от 2 до 14) и  $\mu$  (от 0,2 до 0,8). Установлено, что критический режим в микромасштабной области наступает при меньших значениях  $\mathcal{R}$ , чем для вихревых труб большого диаметра.

Оценка технических возможностей МВТ как элемента системы "генератор холода - сопрягающий контур - объект охлаждения" пока-

Таблица I

Рациональные геометрические характеристики и показатели эффективности адиабатных ВТ различных диаметров

D	$f_0$	$\bar{P}_g$	L	Конусность камеры ( $\alpha^\circ$ )	Развихрители	$\bar{h}$	$\mu$	$\Delta T_{X, \max}$
33	0,098...0,1	0,5...0,6	9 - 12	5...7	-	-	0,5	55
20	0,098...0,1	0,5	9 - 12	5...7	крестовина	0,1	0,42	48...50
10	0,98...0,1	0,5	9 - 12	5...7	крестовина	0,1	0,4	42...45
5	0,098...0,1	0,5	9 - 12	5...7	крестовина	0,2	0,35	40...42
3	0,1	0,45...0,5	6	0...5	сетка и крестов.	0,3	0,32	32...35
2	0,1	0,45...0,5	6	0...5	-	0,3	0,32	25

Схема движения пограничных слоев в вихревой трубе

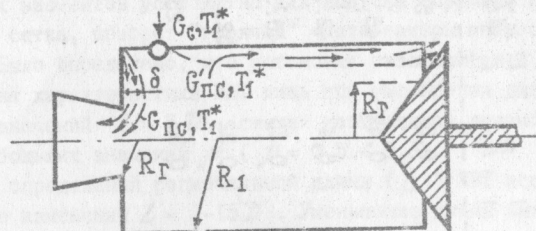
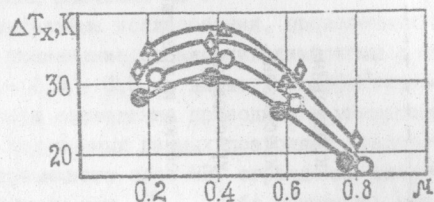


Рис. 1

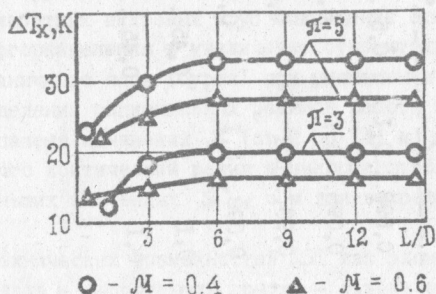
Экспериментальное исследование МВТ  $D = 3$  мм



- ▲ - коническая МВТ с разрушителем пограничного слоя;
- ◆ - " - " - с крестовиной;
- - " - " - без развихрителя и с поворотом горячей части камеры энергоразделения, соответственно.

Рис. 2

Зависимость эффекта охлаждения от относительной длины МВТ



- -  $M = 0.4$
- ▲ -  $M = 0.6$

Рис. 3

зала целесообразность использования МВТ в воздухоохлаждающих системах разомкнутого типа для охлаждения небольших по габаритам и поверхности объектов ( $F_{об} = 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ м}^2$ ).

Четвертая глава посвящена определению области рационального применения МВТ. Разработана и приведена методика, позволяющая сопоставить воздухоохлаждающие системы с различными генераторами холода квалитетическим методом. Критерием сравнения является интегральный показатель качества  $K_{\Sigma}$ , представляющий собой численную оценку отношения результата  $K$ , полученного от системы, к сумме приведенных затрат  $(U_0 \varphi(t) + Z_1)$  на ее изготовление и эксплуатацию

$$K_{\Sigma} = \frac{K}{U_0 \varphi(t) + Z_1}$$

При сопоставлении систем полагалось, что величина  $K$  пропорциональна комплексному показателю  $K_{\Sigma T}$ , учитывающему энергетические и температурно-динамические характеристики генератора холода. В качестве эталонной была использована идеализированная система, имеющая холодопроизводительность  $Q_0$ , равную тепловой нагрузке объекта охлаждения; температуру в установившемся режиме  $T_{уст} = \frac{T_0 - T_u}{2}$  (где  $T_0$  и  $T_u$  - границы "разрешенного" диапазона температур); время выхода системы в режим  $\bar{I}_1 = 0$ . С учетом принятого эталона соотношения для вычисления показателей энергетических ( $K_0$ ) и температурно-динамических ( $K_T$ ) свойств системы были получены в виде:

$$K_0 = \frac{Q_0}{Q_0} \eta_{\Sigma T}; \quad K_T = \frac{T_0 - T_{уст}}{T_0 - T_u} \left(1 - \frac{\bar{I}_1}{2}\right)$$

Рассмотрены два способа формирования величины интегрального показателя качества: с размерным и безразмерным представлением результата.

Величина  $K_{\Sigma}$ , кроме указанных свойств, учитывает показатели надежности и долговечности, а также показатели, характеризующие затраты на изготовление и эксплуатацию системы.

Определение области рационального применения МВТ проводилось в диапазоне изменения производительности системы  $Q_0 = 0 \dots 100$  Вт. В сопоставление, помимо реально существующих, были включены также и гипотетические системы, смоделированные таким образом, что холодопроизводительность генератора холода не лимитировалась техническими возможностями изготовления при уменьшении масштаба.

Сравнение различных систем по величине  $K_{\Sigma}$  показало (рис. 4), что в диапазоне  $Q_0 \leq 30$  Вт применение вихревых воздухоохлаждающих

более рационально, чем использование систем, основанных на других генераторах холода. Системы с МВТ, как показал калориметрический анализ, предпочтительны в изучаемой области по следующим причинам:

- 1) меньшая подверженность вихревых генераторов холода воздействию масштабного фактора;
- 2) возрастание удельного вклада теплопритоков, обусловленных трассировкой холода, в общий энергобаланс системы при снижении  $Q_0$ ;
- 3) простота, миниатюрность и безынерционность, определяющие высокие температурно-динамические показатели систем с вихревыми генераторами холода.

Разработанная методика может быть применена для выбора предпочтительного режима работы системы. Проведено сравнение по величине  $K_{\Sigma}$  различных режимов работы вихревого устройства для стоматологии. Анализ показал, что наиболее эффективно устройство работает при  $\mu = 0,4$ .

Пятая глава посвящена практическому использованию систем с МВТ. Приведены конструкции и результаты испытаний ряда устройств с МВТ для медицины и криогенной техники.

В медицинском устройстве для хирургии микротрубы диаметром 3 мм использованы как генератор холода гипотермической установки. Приведены результаты испытаний.

В устройстве для стоматологии МВТ ( $D = 2$  мм) использована одновременно как генератор тепла и холода при термостатировании лекарственных средств на двух температурных уровнях:  $T_x = 280$  К и  $T_r = 310$  К. Подогретый поток используется также для высушивания поверхности зуба перед терапевтической процедурой.

Результаты клинических испытаний показали, что применение МВТ позволяет значительно сократить продолжительность лечения и расход лекарственных средств. Ожидаемый экономический эффект от внедрения устройства составляет 2270 руб/год.

Подтверждена возможность практического использования сепарационного эффекта в МВТ. Приведена конструкция и результаты испытаний микромасштабного вихревого сепаратора, работающего на гелий-фреоновой смеси (рис.5). Характерными особенностями разработанного МВС является: 1) относительно малая длина камеры фазоразделения ( $L = 3D$ ); 2) осуществление отвода жидкой фазы с периферии камеры.

Результаты исследований показали (рис.5), что максимум извлечения гелия (90%) из смеси наблюдается при режимах работы  $\xi = 1,1 \dots 1,3$ ;  $\mu = 0,7 \dots 0,8$ . Отмечается, что устойчивость работы сепаратора и величина достигаемого эффекта зависят от агрегатного

### Конструкция и результаты испытаний МВС

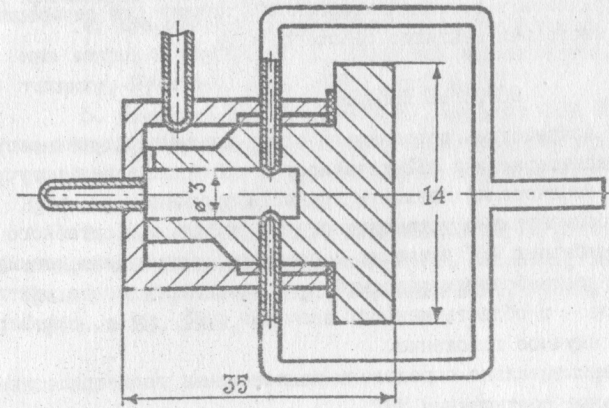


Рис. 5а

### Сопоставление различных охлаждающих систем

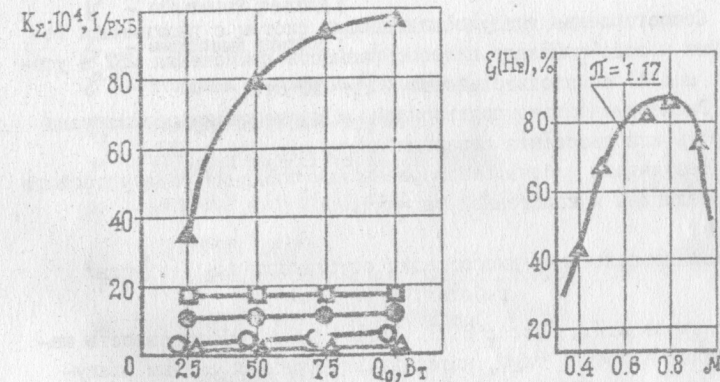


Рис. 5б

- - вихревой охладитель;
- - гипотетический термоэлектрический охладитель;
- ▲ - гипотетический компрессионный охладитель;
- - серийный термоэлектрический охладитель;
- △ - серийный компрессионный охладитель (БК-1500).

Рис. 4

состояния поступающей смеси и ее исходной концентрации. Разработанный МВС применен в гелиевой криогенной системе для сепарации жидкой фазы многокомпонентного рабочего тела.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Учет воздействия пограничных слоев на температурно-энергетические характеристики МВТ позволяет с использованием полученных в работе соотношений повысить точность расчетов.
2. Экспериментально установлено, что действие масштабного фактора в адиабатных МВТ приводит к смещению наступления режима  $\Delta T_{х\max}$  в область больших значений  $\mu$ , а наступление критических режимов - в область меньших значений  $\mu$ ; т.е. подтверждено первое научное положение.
3. Экспериментально определены рациональные геометрические и конструктивные соотношения МВТ.
4. Разработанная методика сравнения по величине интегрального показателя качества позволяет, исходя из уровня потребной производительности, произвести выбор предпочтительного генератора холода.
5. Сопоставление воздухоохлаждающих систем с различными генераторами холода показало целесообразность применения МВТ в устройствах малой производительности ( $Q_0 \leq 30$  Вт).
6. Экспериментально подтверждена и практически реализована возможность использования сепарационного эффекта в МВТ.
7. Результаты работы реализованы при создании ряда устройств для криомедицины и криогенной техники.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Азаров А.И., Кротов П.Е., Кузьмин А.А. Эффективность маломасштабных вихревых труб, питаемых неосушенным сжатым воздухом. //Таллин: НПО "Пищепром", 1981.
2. Экспериментальное исследование маломасштабных вихревых труб /Кузьмин А.А., Кислый А.Н., Кротов П.Е., Шутилов В.Н.//Одесса: НПО "Холодмаш", 1982.
3. Экспериментальное исследование адиабатных вихревых труб различных диаметров /Кузьмин А.А., Кротов П.Е., Кислый А.Н., Шутилов В.А.//Тезисы докл. III Всесоюзной научно-технической конференции по холодильному машиностроению.-М., 1982.-Деп. в ЭНИН им.

Кржижановского 26.10.82, №5324-82.

4. Кузьмин А.А., Симоненко Ю.М., Муратов С.О. Маломасштабные вихревые трубы. //Б сб. Вихревой эффект и его применение в технике.-Куйбышев: КуАИ, 1984.-с.114-116.
5. Азаров А.И., Кузьмин А.А., Муратов С.О. Расчет предельных температурно-энергетических характеристик противоточной вихревой трубы. //В сб. Вихревой эффект и его применение в технике.-Куйбышев: КуАИ.-1988.-с.23-27.
6. А.с. 1454436 СССР, МФИ А61С 3/00 Устройство для введения лекарственных средств /Синицын Р.Г., Бас А.А., Пахомов Г.Н., Кузьмин А.А., Жалоба А.Н., Баранник Н.Г., Руденко М.М. (СССР).-Опубл. в БИ, 1989, №4.

#### Условные обозначения:

- $Q_0$  - холодопроизводительность;  
 $V$  - объемный расход;  
 $G$  - массовый расход;  
 $\delta$  - толщина пограничного слоя;  
 $R_1$  - радиус вихревой трубы;  
 $r$  - текущий радиус вихревой трубы;  
 $\omega$  - угловая скорость;  
 $\rho$  - плотность газа;  
 $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости;  
 $\mu$  - относительная доля холодного потока.

#### Индексы:

- пс - пограничный слой; х - холодный поток; г - подогретый поток.

*Азаров*

