М359598

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ордена ЛЕНИНА и ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им.Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ИВАКИН ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРА НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ПРИБЛИЖЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВ.

(05.04.03 – Гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники).

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Москва 1980

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ордена ЛЕНИНА и ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им.Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ИВАКИН ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРА НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ПРИБЛИЖЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВ.

(05.04.03 – Гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники).

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1359598
Ивакин О.А.Исследование ви

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
1980

Москва

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Епифанова В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Дейч М.Е.
кандидат технических наук, доцент Хмара В.Н.

Ведущее предприятие: указано в решении Специализированного Совета.

Защита диссертации состоится "9" июня 1980г. в аудитории 406[3] в 14 час. 30 мин. на заседании Специализированного Совета К.053.15.07 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, Лефортовская наб., дом 1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "7" мая 1980г.

Ученый секретарь Специализированного Совета, кандидат технических наук Козлов В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В настоящее время в различных областях техники широко применяются вихревые устройства (ВУ), использующие эффект Ранка-Хилша. Сущность эффекта заключается в том, что при течении в круглом канале закрученного потока газа приосевые слои имеют более низкие температуру и давление, чем периферийные. При выводе холодного газа устройство работает как вихревая труба (ВТ), а при вводе газа в область низкого давления - как эжектор (ВЭ).

Благодаря надежности в работе, простоте конструкции и достигнутым за последнее время высоким значениям адиабатного КПД ВТ в ряде случаев могут использоваться взамен турбодетандерных агрегатов. ВЭ имеют определенные преимущества перед прямоструйными эжекторами, однако исследованы значительно меньше.

Описание движения газа в ВУ отличается большой сложностью, так как связано с трехмерным течением вязкой сжимаемой жидкости, поэтому до сих пор их расчет базируется на весьма упрощенных полуэмпирических методиках. В основе как ВТ, так и ВЭ лежат общие физические процессы, что побуждает искать единую математическую модель ВУ и использовать при ее построении данные, полученные при исследовании обоих типов аппаратов. Разработка математической модели ВУ позволит расчетным путем оценивать влияние различных режимных и геометрических параметров на рабочие характеристики устройств, неисследованных ранее.

Цель работы. Разработка основ общей приближенной математической модели неохлаждаемого ВУ, ее конкретизация для ВЭ, разработка методики расчета этого аппарата на ЭВМ и ее экспериментальная проверка.

Научная новизна. Предложена физическая модель ВУ, построенная на известных экспериментальных данных для ВТ и ВЭ; на базе основных уравнений газодинамики разработана общая приближенная математическая модель ВУ, описывающая двумерное течение идеального вязкого сжимаемого газа в рабочем пространстве устройства; составлена методика расчета рабочих характеристик прямоточного ВЭ с цилиндрической камерой смешения как более простого в описании ВУ в допредельных и предельном режимах, учитывающая основные виды эксергетических потерь, в том числе воз-

никающие при смешении эжектирующего и эжектируемого потоков; теоретические результаты проверены экспериментом.

Практическая ценность. На основании результатов проведенного экспериментального и теоретического исследования различных ВЭ показано, что предложенный впервые метод расчета позволяет получить теоретические рабочие характеристики аппарата (степень повышения давления эжектируемого потока, коэффициент эжекции, приведенное давление пассивного газа и др.), удовлетворительно совпадающие с опытными. Результаты теоретического анализа прямоточного ВЭ могут быть использованы при исследовании других типов ВУ, в том числе ВТ. Результаты выполненной работы использованы при проектировании ВЭ для производственно-технического предприятия "Сахпромэнергоналадка" (г.Киев) с ожидаемым экономическим эффектом более 100 тыс.руб., а также при исследовании вихревой эжекционной установки для абразивной очистки поверхностей на факультете АМ МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретического анализа ВЭ по результатам расчетов на ЭЦВМ и экспериментального исследования по различным методикам проведения опытов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (г.Ташкент, 1977г.), Третьей Всесоюзной научно-технической конференции по исследованию вихревого эффекта и его применению в технике (г.Куйбышев, 1979г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (г.Москва, 1980г.), Общемосковском семинаре по криогенной технике (1977г.), научно-техническом семинаре и заседании кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" (Э-4) МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано четыре печатные работы.

Объем работы. Диссертация содержит 120 машинописных страниц основного текста и 52 рисунка на 49 страницах. Работа состоит из введения, четырех глав, приложений и списка литера-

туры (58 наименований). В приложениях приведены образцы протоколов эксперимента, результаты их обработки, полная программа поверочного расчета прямоточного ВЭ на алгоритмическом языке "FORTRAN-IV" и список идентификаторов основной программы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе проведен обзор гипотез вихревого эффекта, конструкций ВЭ, а также экспериментальных и теоретических работ по исследованию прямоточных ВЭ. Анализ теоретических работ по вихревому эффекту совместно с имеющимися в литературе экспериментальными данными показал, что наиболее обоснованным является подход к описанию механизма работы ВУ, базирующийся на гипотезе взаимодействия свободного и вынужденного вихрей, предложенной для ВТ Меркуловым А.П. Анализ конструкций ВЭ позволил выявить наиболее распространенный тип рассматриваемых устройств – прямоточный эжектор с тангенциальным подводом эжектирующего потока газа. ВЭ исследованы значительно меньше, чем ВТ, существующие методики расчета носят оценочный характер. Систематическое исследование прямоточных ВЭ проводится под руководством Епифановой В.И.

Все вышесказанное определило основные задачи, поставленные и в основном решенные в данной работе:

1. Разработка физической модели течения рабочего тела в ВУ – как ВЭ, так и ВТ – на основании имеющихся в литературе экспериментальных данных.

2. Создание приближенной математической модели ВУ на базе уравнений двумерного течения идеальной невязкой сжимаемой жидкости.

3. Конкретизация полученных результатов для описания рабочих процессов в ВЭ и разработка численного метода расчета этого устройства с учетом основных эксергетических потерь в его проточной части.

4. Экспериментальное обоснование надежности разработанных методов для расчета ВЭ и определение пределов их применимости.

Во второй главе рассматривается математическая модель вихревых устройств. Принятая схема течения потоков газа в рабочем пространстве ВУ изображена на рис. Iа.

В ВУ рассматривается три расчетных сечения: I – в конце

камеры завихрения 4, где закончено формирование закрученного течения; II – в начальном участке рабочей камеры, где существуют наибольшие градиенты давления и температуры; III – перед раскруточным диффузором, где закончено смешение эжектирующего и эжектируемого потоков в ВЭ или разделение холодного и горячего потоков в ВТ.

Предполагается, что в любом сечении ВУ:

в закрученном потоке можно выделить области свободного ( $C_u r = const$ ) и вынужденного ( $\frac{C_u}{r} = const$ ) вихрей, возникающие под действием внутренней вязкости газа;

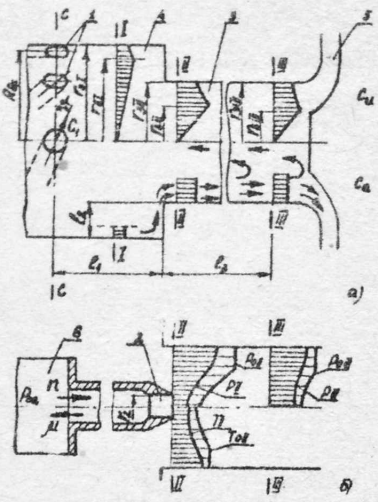


Рис.I.Схема проточной части ВУ, расчетные сечения и эпюры скоростей, температур и давлений.

в направлении раскруточного диффузора 5 осевое движение газа осуществляется только в области свободного вихря;

радиальное распределение газодинамических параметров соответствует изэнтропе;

теплообмен газа со стенками ВУ отсутствует;

трение на стенках проточной части вызывает снижение уровня окружных скоростей и давления торможения потока;

возникающий вследствие различного рода потерь эксергии осевой градиент давления в области вынужденного вихря приводит к развитию возвратного течения, однако в основных расчетных сечениях ВЭ (II и III) им можно пренебречь из-за влияния низконапорного сопла и стенки диффузора;

входящий в ВУ активный поток растекается по стенке завихрителя 4, вследствие чего определяющим начальный момент количества движения является средний радиус области свободного вихря в сечении I (Керенский А.М.);

давление газа в сечении среза низконапорного сопла (при

$r < r_2$, где $r_2$ – радиус сопла 2) постоянно и определяется интегрированием в пределах $0 \div r_2$ (см. уравнение (3)) с учетом газодинамической функции $\bar{p} = \overline{T}^{\frac{K}{K-1}}$ ($p$ – давление, $T$ – температура, $K$ – показатель изэнтропы).

Исходя из рассмотрения принятой физической модели можно предположить, что в ВУ наиболее рационально использовать:

а) тангенциально-осевой многосопловой ввод I (Ранк Х.), в котором вектор скорости $C_1$ (рис. Iа) совпадает с вектором полной скорости на среднем радиусе в области свободного вихря в сечении I;

б) расположение среза низконапорного сопла (ВЗ) и диафрагмы холодного потока (ВТ) 2 вблизи начального сечения П рабочей камеры (рис. Iб);

в) осерадиальный диффузор 5, входные размеры которого соответствуют величине области свободного вихря в сечении Ш.

В основе математической модели ВУ лежат уравнения Навье-Стокса, которые в предположении равенства нулю радиальной скорости, производной осевой скорости в аксиальном направлении и коэффициента динамической вязкости вырождаются в уравнение радиального равновесия

$$\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr} = \frac{C_u^2}{r}, \qquad (I)$$

где $p$ – давление, $\rho$ – плотность, $r$ – радиус, $C_u$ – окружная скорость, а также уравнения неразрывности, импульса, момента количества движения, изэнтропы и состояния идеального газа. Выведены уравнения, описывающие радиальное распределение полных и статических температур и позволяющие при использовании газодинамических функций определить давление и плотность в расчетных сечениях. Радиус внутренней границы свободного вихря определяется из принципа минимизации кинетической энергии потока в трубке тока, расположенной на границе разделения вихрей (Епифанова В.И.), что соответствует случаю бездиффузорного истечения потока из ВУ и близко к реальному случаю течения газа в ВУ ввиду малости коэффициентов восстановления полного давления газа в существующих радиальных и осерадиальных диффузорах.

Показано, что режим максимального расхода в ВУ в зависимости от геометрии проточной части может возникать как в сечении соплового ввода I, так и в одном из сечений рабочей ка-

меры 3, причем, как показывает анализ, в большинстве случаев реализуется предельный режим, связанный с возникновением косых скачков уплотнения в области наибольших скоростей течения на границе вихрей. Другой теоретический предельный режим обусловлен невозможностью достижения нулевых значений температур и давлений на оси ВУ.

Основные расчетные уравнения для ВЭ имеют вид:

$$\bar{T}_{ц}(\bar{r}) = \frac{T_{ц}(\bar{r})}{T_{oi}} = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1}\left[\frac{\lambda_{ui}^2}{\bar{r}^2} + \lambda_{au}^2(\bar{r})\right], \tag{2}$$

$$\bar{T}_{ш}(\bar{r}) = \frac{T_{ш}(\bar{r})}{T_{oi}} = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1}\left[\frac{\lambda_{ui}^2}{\bar{r}_в^2}\left(2 - \frac{\bar{r}^2}{\bar{r}_в^2}\right) + \lambda_{au}^2(\bar{r})\right], \tag{3}$$

$$\bar{T}_{ош}(\bar{r}) = \frac{T_{ош}(\bar{r})}{T_{oi}} = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1}\left[\frac{2\lambda_{ui}^2}{\bar{r}_в^2}\left(1 - \frac{\bar{r}^2}{\bar{r}_в^2}\right) + \lambda_{au}^2(\bar{r}) - \lambda_{aш}^2(\bar{r})\right], \tag{4}$$

$$\lambda_{au}(\bar{r}) \equiv const = \frac{б_1(1+n)\lambda_1\bar{\rho}(\lambda_1)\bar{r}_1^2\sqrt{\theta_2}}{б_i\bar{\rho}_{cp}\bar{r}_3^2\psi}, \tag{5}$$

$$\bar{\rho}_{cp} = \frac{2}{\bar{r}_3^2 - \bar{r}_в^2}\int_{\bar{r}_в}^{\bar{r}_3}\bar{\rho}(\bar{r})\bar{r}\,d\bar{r}, \tag{6}$$

$$n = \frac{б_2\bar{\rho}_э q(\lambda_2)\bar{r}_2^2}{б_1\sqrt{\theta_1}q(\lambda_1)\bar{r}_1^2}, \tag{7}$$

$$\lambda_{ui} = \frac{\lambda_{ui}k_{ui}}{(1+n)\sqrt{\theta_2}}, \tag{8}$$

где $\bar{T}$, $\bar{\rho}$ – приведенные к параметрам торможения в области свободного вихря температура и плотность;

$\bar{r} = \frac{r}{R}$ – приведенный радиус;

$R$ – радиус, определяющий начальный момент количества движения;

$\lambda = \frac{C}{a_{кр}}$ – коэффициент скорости;

$C$ – линейная скорость;

$\theta_1 = \frac{T_{02}}{T_{01}}$ – приведенная температура эжектируемого потока;

$\theta_2 = \frac{T_{05}}{T_{01}} = \frac{1+n\theta_1}{1+n}$ – приведенная температура смешанного потока;

$\bar{\rho}_э = \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}}$ – приведенное давление эжектируемого газа;

$\psi = 1 - \left(\frac{r_в}{r_3}\right)^2$ – параметр, характеризующий величину области свободного вихря;

$n = \frac{m_2}{m_1}$ – коэффициент эжекции;

$m$ – массовый расход;

$q(\lambda)$ – газодинамическая функция расхода;

$\sigma_i = \frac{\rho_{0i}}{\rho_{01}}$, $k_{ui} = \frac{C_{ui}}{C_{u1}}$ – коэффициенты потерь полного давления и момента количества движения между входным и $i$-м сечениями ВУ от трения на стенках проточной части, рассчитываемые по опубликованным в литературе экспериментальным данным.

Индексы обозначают:

геометрические и газодинамические параметры

0 – торможения;

I – в сопловом вводе активного потока;

2 – в низконапорном сопле;

3 – на стенке завихрителя и камеры смешения;

5 – после диффузора;

а также

$i$ – номер сечения;

$u$, $a$ – тангенциальную и окружную составляющие скорости;

$и$, $ш$, $в$ – параметры в областях свободного, вынужденного вихрей и на их границе.

Очевидно, что при $i=1,\text{II}$ $n=0$ и $\theta_2=1$.

Использование уравнения осевых импульсов

$$\int_{\text{II}}(\rho df + C_a dm) = \int_{\text{III}}(\rho df + C_a dm) + F_{тр2} \qquad (9)$$

в сечениях II и III позволяет рассчитать эксергетические потери, возникающие при смешении между указанными сечениями эжектирующего и эжектируемого потоков.

Уравнения (2)–(8) с учетом изменения направлений потоков могут быть применены при расчете ВТ.

Теоретические эпюры полных и статических давлений и температур в сечении II ВУ схематично показаны на рис. I.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию вихревых эжекторов. На стенде НПО "Гелиймаш" совместно с В.К. Костиным получены рабочие характеристики вида $\rho_{02}$ ($\rho_{0s}$) при $m_2 = 0$ и $m_2$ ($\rho_{02}$) при $\rho_{0s} = idem$, на основании которых рассчитаны опытные зависимости $n$ ($\bar{\rho}_э$) при $\bar{\rho}_{0s} = idem$, $\bar{\rho}_э$ ($\lambda_1$), $\varepsilon$ ($\lambda_1$) и $\eta_s$ ($\lambda_1$) при $n = idem$, где $\varepsilon$ – степень повышения давления эжектируемого потока газа, а $\eta_s$ – изэнтропный КПД. Исследованы ВЭ с четырьмя различными завихрителями и сменными низконапорными соплами – всего I0 аппаратов. На стенде МВТУ проведено исследование влияния длины завихрителя и положения среза сопла в рабочем пространстве ВЭ на величину получаемого разрежения в вакуумируемом объеме при $n = 0$. Измерения производились образцовыми манометрическими приборами, нормальными и нестандартными тарированными расходомерными сужающими устройствами. Для измерения $p < 0{,}4 \cdot I0^5$ Па использовалась батарея дифманометров. Проведенный анализ показал удовлетворительность точности полученных экспериментальных данных – относительное среднее квадратичное отклонение результатов измерения наименее точно определяемых величин $n$ и $\lambda_1$ не превышает I,6 %.

Методики проведения опытов различались: изменение расхода через ВЭ осуществлялось изменением либо $\rho_{0s}$ при $\rho_{01} = 4{,}I \cdot I0^5$ Па $= const$, либо $\rho_{01}$ при $\rho_{0s} = I \cdot I0^5$ Па $= const$.

На рис. 2,3,4 приведены экспериментальные характеристики $\bar{\rho}_э$ ($\lambda_1$) при $n = 0$, а также $\bar{\rho}_э$ ($\lambda_1$), $\varepsilon$ ($\lambda_1$), $\eta_s$ ($\lambda_1$) при $n = idem$. Верхним индексом "э" отмечены экспериментальные, а "т" – расчетные кривые (см. главу 4) для ВЭ–I ($r_1 = 6$ мм, $r_2 = 4{,}05$ мм, $r_{3I} = 25$ мм, $r_{3II} = I0$ мм, $R_{вх} = I9$ мм).

Сделаны следующие выводы:

I. Возможна реализация предельных режимов ВЭ при достижении наименьших значений приведенного давления эжектируемого газа $\bar{\rho}_э$ при докритическом течении газа в высоконапорном сопле I (в исследованных аппаратах полученные значения $\lambda_{1пр}$ изменяются от 0,45 до 0,72), что может быть объяснено запиранием расходной области одного из сечений камеры смешения.

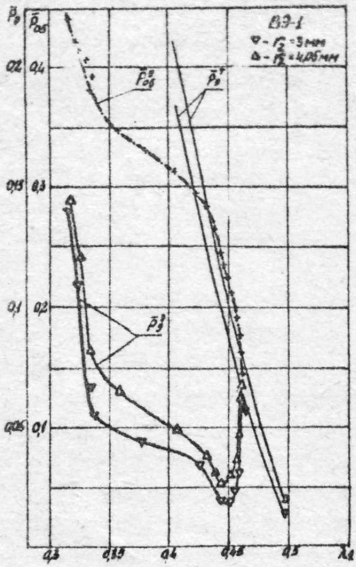


Рис.2. Опытные (э) и расчетные (т) характеристики $\bar{\rho}_э(\lambda_1)$ и $\bar{\rho}_{05}(\lambda_1)$ при $n = 0$.

2. В узкой запредельной области ($\lambda_1 > \lambda_{1пр}$) степень повышения давления $\varepsilon$ и изэнтропный КПД $\eta_s$ резко снижаются при любых $n \geq 0$.

3. Степень повышения давления $\varepsilon$, как правило, увеличивается при уменьшении в ВЭ радиуса низконапорного сопла $r_2$ и расположении его среза внутри камеры смешения 3 вблизи ее входа.

4. Практически отсутствует зависимость $\lambda_{1пр}$ от величины ко-

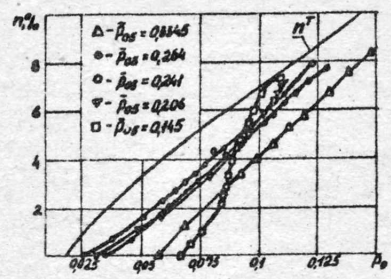


Рис.3. Опытные и расчетные (т) зависимости $n(\bar{\rho}_э)$ при $\bar{\rho}_{05} = idem$.

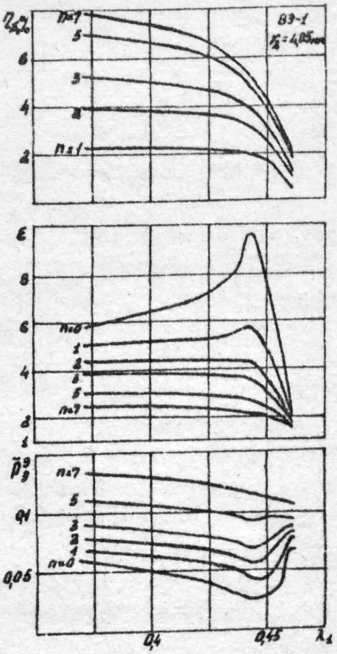


Рис.4. Опытные характеристики $\bar{\rho}_э(\lambda_1)$, $\varepsilon(\lambda_1)$ и $\eta_s(\lambda_1)$ при $n = idem$ (величины $n$ указаны в %).

эффициента эжекции $n$ в исследованных пределах ( $n<15\ \%$).

5. Величина $\varepsilon$ в широких пределах слабо зависит от коэффициента скорости $\lambda_1$ при $\lambda_1 < \lambda_{1пр}$ и $n = const$, что свидетельствует об устойчивости рабочих характеристик ВЭ.

6. Оптимальная работа ВЭ может быть достигнута при совмещении предельных режимов аппарата ( $\lambda_1 = \lambda_{1пр}$ ) и низконапорного сопла ( $\lambda_2 = \lambda_{2н}$ – коэффициент скорости, соответствующий режиму максимального расхода).

В четвертой главе рассмотрена методика расчета ВЭ и проведен анализ полученных теоретическим путем результатов, а также их сопоставление с приведенными в третьей главе экспериментальными данными. Аналитическое решение полученной во второй главе системы уравнений, описывающих течение газа в рабочем пространстве ВУ, представляет большой практический интерес, однако сложность этой задачи заставляет перейти к разработке численного метода решения. Программа расчета предельного режима ВЭ записана на языке "*FORTRAN-IV*" и состоит из основного модуля, шести основных и 16 вспомогательных подпрограмм. Исследование математической модели разделено на два этапа:

определение степени соответствия теоретических результатов полученным экспериментальным данным;

применение разработанной методики расчета для проектирования новых аппаратов.

Анализ расчетных данных (см.рис. 2,3,5) приводит к следующим результатам:

в исследованном диапазоне коэффициентов эжекции величина $n$ практически не влияет на режим истечения из высоконапорного сопла, а следовательно, и на параметры потока во входном сечении камеры смешения;

основная доля эксергетических потерь в рабочем пространстве ВЭ приходится на потери смешения. Величина $\delta_{см}$ для рассмотренных аппаратов ко-

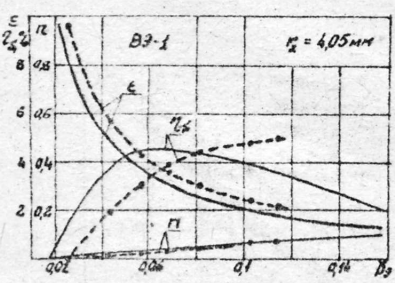



Рис.5. Опытные (– • –) и расчетные (——) зависимости $n$, $\varepsilon$, $\eta_s$ от $\bar{p}_3$.

леблется от 0,77 до 0,48 и составляет 80–90 % в общей величине потерь полного давления на участке между I и III сечениями;

коэффициент потерь смешения $\delta_{см}$ и уровень окружных скоростей, характеризуемый величиной $\lambda_{u\text{ш}}$, в сечении III уменьшаются при увеличении коэффициента эжекции (при практически неизменных потерях от трения на стенках проточной части);

потери эксергии в рабочем пространстве ВЭ приводят к расширению области свободного вихря в сечении III по сравнению с сечением II при слабом изменении величин осевых скоростей, что качественно соответствует экспериментальным данным, полученным при исследовании ВТ;

характер опытных и теоретических кривых $\bar{p}_э$ ( $\lambda_1$ ) при $n = 0$ вблизи предельных режимов совпадает;

рассчитанные впервые для ВЭ зависимости $\varepsilon$ и $\eta_s$ (при $\delta_{вых} = 0{,}3$) в предельном режиме удовлетворительно согласуются с экспериментальными не только качественно, но и количественно;

расхождение полученных чисто расчетным путем и опытных характеристик объясняется упрощенностью ряда принятых предположений, уточнение которых является задачей дальнейшего исследования. Расчет предельного коэффициента скорости в высоконапорном сопле $\lambda_{1пр}$ и приведенного давления эжектируемого газа $\bar{p}_э$ при $n = 0$ или коэффициента эжекции $n$ при $\lambda_1 = \lambda_{1пр}$ в режиме максимального расхода низконапорного сопла можно уточнить введением соответствующих поправочных коэффициентов

$$K_\lambda = \frac{\lambda_{1пр}^э}{\lambda_{1пр}^т} = 0{,}9\,, \quad K_p = \frac{\bar{p}_{эmin}^э}{\bar{p}_{эmin}^т} = 1{,}4 \div 1{,}7\,, \quad K_n = \frac{n^э}{n^т} = 0{,}7$$

Проведено сопоставление рабочих характеристик исследованных ВЭ с расчетными данными для оптимальных прямоструйных эжекторов (ПЭ). Показано, что ВЭ могут применяться наряду с ПЭ, преимущественно в тех случаях, когда требуется получение сравнительно высокого разрежения ( $\bar{p}_э = 0{,}02 \div 0{,}008$) в одной ступени или, по условиям работы аппарата, необходимо использовать стабильность рабочих характеристик при изменении входных параметров в относительно широких пределах.

Расчетный анализ показывает возможность применения ВЭ в схемах криогенных установок с применением эжекторов на низкотемпературном уровне.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

I. Разработана приближенная математическая модель вихревых устройств (вихревой трубы и вихревого эжектора) с тангенциально-осевым вводом активного потока, цилиндрической рабочей камерой и осерадиальным раскруточным диффузором, описывающая двумерное течение идеальной невязкой сжимаемой жидкости в рабочем пространстве устройства и учитывающая наличие основных эксергетических потерь.

2. Разработана методика поверочного расчета прямоточного вихревого эжектора на ЭВМ (ЕС-1022), позволяющая с удовлетворительной точностью определить основные характеристики аппарата. (приведенное давление низконапорного газа при $n = 0$, коэффициент эжекции, степень повышения давления пассивного потока, предельный коэффициент скорости в высоконапорном сопле, изэнтропный КПД), причем для сведения опытных и расчетных данных на заключительном этапе расчета рекомендуется введение поправочных коэффициентов $K_\lambda$, $K_p$, $K_n$. В процессе расчета определяется распределение газодинамических параметров в расчетных сечениях устройства.

3. Основные предположения, заложенные в математическую модель, получили подтверждение при экспериментальном исследовании вихревых эжекторов.

4. В процессе исследования вихревых эжекторов выявлены или подтверждены следующие основные закономерности их работы:

возможность достижения большой степени понижения давления активного потока (50÷120) на предельных режимах;

слабое влияние величины пассивного потока на предельный режим вихревого эжектора в области коэффициентов эжекции до 15%;

смещение максимума степени повышения давления в область допредельных режимов вихревого эжектора при увеличении коэффициента эжекции, обусловленное запиранием низконапорного сопла.

5. Основным расчетным режимом ВЭ рекомендуется считать предельный режим, который с большой степенью вероятности реализуется с ограничениями, налагаемыми возникновением косого скачка уплотнений. При оптимальной геометрии ВЭ предельные режимы аппарата и низконапорного сопла должны совпадать.

6. Вихревые эжекторы рекомендуются к применению наряду с

прямоструйными и преимущественно при малых коэффициентах эжекции и необходимости получения стабильных рабочих характеристик при переменных рабочих условиях.

7. Приближенная математическая модель и разработанная программа расчета на ЭВМ может служить основой при уточнении методики расчета прямоточного ВЭ, разработке методик расчета противоточного ВЭ, а также вихревых труб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Епифанова В.И.,Ивакин О.А. Исследование вихревых эжекторов в области допредельных и предельных режимов работы.- Тезисы доклада /Всесоюзная конференция по холоду "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха",Ташкент, 1977,с.13.

2. Епифанова В.И.,Ивакин О.А.,Шадрина В.Ю. Основы приближенной методики термогазодинамического расчета вихревых труб.- Известия ВУЗов. Машиностроение, 1979. № 7,с.57-62.

3. Епифанова В.И.,Ивакин О.А.,Шадрина В.Ю. Аналитическая методика расчета вихревых устройств.-Труды/МВТУ им.Н.Э.Баумана. Глубокий холод и кондиционирование, 1979, № 318,с.106-114.

4. Епифанова В.И.,Ивакин О.А.,Шадрина В.Ю. Аналитическая методика расчета и оптимизации рабочих характеристик вихревых устройств.-Тезисы доклада /Всесоюзная конференция "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении". Москва, 1980,с.5.

Л-65519.Подп. к печ.4.4.80г.Заказ604.Объем 1п.л.Тираж 100 экз.
Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, д.5.



МВТУ
им. Н.Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬ