

Автореферат
4-46

Док. Олишченко В.А.

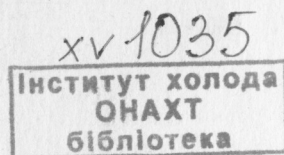
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи
УДК 621.694.2 (043.3)

ЧЕРЕПАНОВ ВИКТОР БОРИСОВИЧ

РАЗРАБОТКА ПРОТИВОТОЧНОГО ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРА
И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Куйбышевском политехническом институте
им. В. В. Куйбышева.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Метенин В. И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Алемов Р. З.

- кандидат технических наук,
доцент Тонконогий Ю. Л.

Ведущая организация - Государственный институт азотной
промышленности и органического
синтеза, г. Москва.

Защита диссертации состоится "20" апреля 1987 г.
в 11⁰⁰ часов на заседании специализированного Совета
К. 068.27.01 Одесского технологического института холодильной
промышленности: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, СТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан "19" марта 1987 г.

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

Р. К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы В материалах XXVII съезда КПСС отмечается, что коренной вопрос экономической стратегии партии - кардинальное ускорение научно-технического прогресса. Важную роль в решении этой задачи играет разработка прогрессивных видов техники, в том числе эжекционных устройств нового типа. К таким устройствам относится противоточный вихревой эжектор (ПВЭ), созданный под руководством д. т. н., профессора Метенина В. И. ПВЭ разработан и исследован применительно к низкотемпературному двухступенчатому вихревому холодильному аппарату, одним из основных элементов которого он является и, в связи с этим, экспериментально исследован крайне недостаточно, отсутствуют теоретические работы посвященные изучению его рабочего процесса.

Однако имеющиеся данные позволяют считать, что в случае получения низкого вакуума в вакуумируемом объеме при относительно невысоких давлениях эжектирующего (активного) газа ПВЭ имеет явные преимущества не только перед прямоструйными, но и прямоточными вихревыми эжекторами.

Поэтому вопросы изучения рабочего процесса ПВЭ и создания методики его расчета являются весьма актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Цель работы - Определение оптимальных геометрических параметров проточной части ПВЭ, обеспечивающих наиболее экономичную его работу;

- проведение внутренних газодинамических исследований для объяснения особенностей рабочего процесса ПВЭ;
- определение области применения ПВЭ;
- разработка приближенной методики термгазодинамического расчета камеры смешения ПВЭ;

- разработка высокоэффективных вакуумирующих устройств на базе ПВЭ;
- проведение промышленной проверки ПВЭ в условиях создания низкого вакуума в замкнутых объемах.

Научная новизна. На основе проведенных комплексных исследований ПВЭ выявлены закономерности течения газа и получены аэродинамические характеристики камеры смешения ПВЭ, необходимые для дальнейшего развития теории вихревого эффекта. Определены оптимальные геометрические соотношения основных конструктивных элементов ПВЭ. Разработан теоретико-расчетный метод определения степени сжатия камеры смешения ПВЭ.

Основные научные положения, защищаемые в работе.

1. Многоступенчатое расширение активного газа в камерах смешения противоточного вихревого эжектора нового типа, А.с. № 916786, обеспечивает получение высоких степеней сжатия пассивного газа при меньших, по сравнению с однокамерным ПВЭ, степенях расширения активного газа.

2. Выход на автомодельный режим работы по давлению пассивного газа и по коэффициенту скорости активного газа наблюдается в камере смешения ПВЭ при достижении потоком скорости звука на границе слияния свободного и вынужденного вихрей.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработана конструкция и проведено исследование рабочего процесса противоточного вихревого эжектора, обеспечивающего получение недостижимой ранее степени сжатия пассивного газа $\mathcal{L}_3 = 167$ при степени расширения активного газа $\mathcal{L} = 2,6$; на основании сравнения ПВЭ со струйными и вихревыми прямоточными эжекторами и механическим вакуум-насосом определена область применения ПВЭ и обоснована целесообразность его использования при создании низкого вакуума в замкнутых объемах или в объемах с незначительным

притоком газа. Получены научно-обоснованные данные необходимые для расчета и конструирования ПВЭ и систем их использующих.

Реализация результатов работы в промышленности

Результаты проведенных исследований рабочего процесса ПВЭ использованы при разработке вихревого вакуумного устройства, внедренного в производство на Безымянской ордена Ленина ТЭЦ г.Куйбышева.

Способность ПВЭ создавать высокие степени сжатия пассивного газа при малых степенях расширения активного газа практически реализована в вакуумирующем устройстве, включенном в технологическую схему сушки химических продуктов.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения вакуумирующего устройства 98 тыс.рублей в год.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на Республиканской школе-семинаре "Автоматизация проектирования радиотехнических систем", Харьковский авиационный институт, 1982 г.; на областной научно-технической конференции "60-летию СССР - ударный труд, знания, инициативу и творчество молодых", Куйбышев, 1983 г.; на четвертой Всесоюзной научно-технической конференции, "Вихревой эффект и его промышленное применение", Куйбышев, 1983 г.; на заседаниях кафедры ТЭС Куйбышевского политехнического института 1981-1986 гг.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ и получено 3 авторских свидетельства.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений. Объем работы: 121 страниц основного текста, 50 рисунков, 2 таблицы и 6 страниц приложения.

Библиография содержит 80 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность работы, определены направления и задачи исследования.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ приводится обзор литературных источников по основным теоретическим и экспериментальным исследованиям самовакuumирующей вихревой трубы и прямоочного вихревого эжектора, в основу рабочего процесса которых положен вихревой эффект энергетического разделения газа.

Анализируются влияние на рабочий процесс вихревых устройств конфигурации и геометрических параметров их основных конструктивных элементов. Рассмотрены существующие методики расчета вихревых вакуумирующих устройств.

Приводится описание ПВЭ и его принципа действия. На основании анализа имеющихся данных о ПВЭ конкретизируются общие задачи работы: разработка оптимальной геометрии ПВЭ на основании детальных экспериментальных исследований его рабочего процесса; определение области применения ПВЭ; создание приближенной методики его термогазодинамического расчета.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ представлен материал исследования рабочего процесса ПВЭ, полученный при проведении внешнего эксперимента, цель которого — выявление оптимальной геометрии проточной части эжектора, построение и анализ его рабочих характеристик и определение области применения ПВЭ.

Критерием оптимизации являлась степень сжатия эжектора Π_3 . В ходе экспериментов сжатый газ из эжектора эвакуировался в атмосферу.

На первом этапе исследований ПВЭ испытан при работе с коэффициентом эжекции $\eta = 0$. На этом этапе методом однофакторного экс-

перимента определялась оптимальная геометрия эжектора, что было достигнуто поочередным изменением геометрии одного из пяти основных конструктивных элементов ПВЭ при неизменных геометрических параметрах других. Было исследовано II камер смешения, I4 сопловых вводов активного газа, II осевых диффузоров, 4 щелевых диффузора, I4 обтекателей сопла пассивного газа ПВЭ с начальным диаметром камеры смешения $D_{к.с.} = 42$ мм. Анализ полученных характеристик позволил выявить оптимальные линейные размеры каждого из основных элементов эжектора: камера смешения $L_{к.с.} = 3$, $\gamma_{к.с.} = 3^\circ \dots 4^\circ$, шестисопловой ввод активного газа $\bar{h} = 0,4 \dots 0,46$, осевой диффузор $L_{о.диф.} = 2,5 \dots 2,7$, $\gamma_{о.диф.} = 5^\circ \dots 7^\circ$, щелевой диффузор $\bar{D}_{щ.диф.} = 3 \dots 5$, $\bar{\Delta} = 0,12 \dots 0,20$; обтекатель сопла пассивного газа $\bar{D}_{об.} = 1$, $\gamma_{об.} = 47^\circ \pm 30'$, $\bar{L}_c = 0,12 \dots 0,14$, $\bar{R}_{об.} = 0,14$ (Рис. I).

Установлено, что изменение линейного размера любого из перечисленных элементов однозначно влияет на работу эжектора и не зависит от изменения геометрии других элементов.

В отличие от линейных геометрических параметров нельзя рассматривать изолированно друг от друга влияние на рабочий процесс ПВЭ основных площадей проточной части: $F_{к.с.}$, $F_{с.а.}$ и $F_{о.диф.}$. Это объясняется тем, что изменение одной из них, например, уменьшение относительной площади $F_{с.а.}$ оказывает противоположное воздействие на работу эжектора по сравнению с аналогичным изменением другой, т.е. уменьшением $F_{о.диф.}$. Был найден параметр учитывающий взаимное влияние площадей $F_{к.с.}$, $F_{с.а.}$ и $F_{о.диф.}$, а именно $\frac{F_{о.диф.}}{F_{с.а.}}$.

В ходе экспериментов были исследованы семь сопел активного газа, составляющих параметрический ряд с изменением $F_{с.а.}$ от 0,097 до 0,364. При этом каждое сопло испытывалось в паре с каждым из пяти осевых диффузоров параметрического ряда с изменением

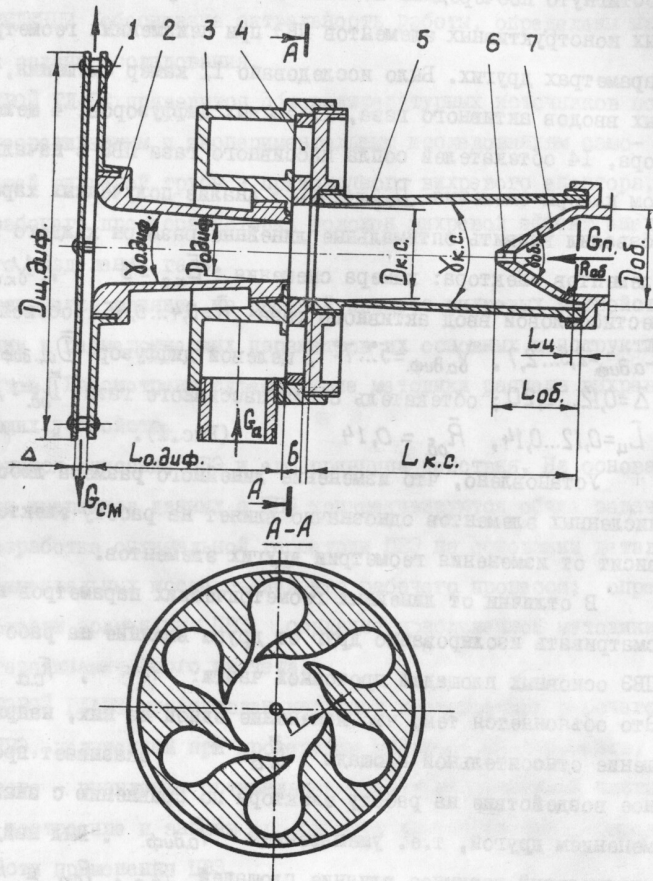


Рис.1. Противоточный вихревой эжектор

1. Шелевой диффузор; 2- осевой диффузор;
3. Корпус эжектора; 4- сопловой ввод активного газа;
- 5 - вихревая камера смешения; 6- сопло пассивного газа; 7 - обтекатель сопла пассивного газа.

$\bar{F}_{a, \text{диф}}$ от 0,145 до 0,44. Отношение $\bar{F}_{a, \text{диф}}/\bar{F}_{c, a}$ изменялось в диапазоне от 0,4 до 4,54. По значению $\bar{F}_{a, \text{диф}}/\bar{F}_{c, a}$, обеспечивающему максимальную степень сжатия $\pi_{z, \text{max}}$ при минимальной степени расширения активного газа π_{min} , определены оптимальные площади $\bar{F}_{c, a} = 0,146$ и $\bar{F}_{a, \text{диф}} = 0,23$.

В результате эксперимента разработана конструкция ПВЭ, обеспечивающая получение недостижимой ранее $\pi_z = 167$ при $\pi = 2,6$ (Рис.2)

Экспериментально установлено, что при изменении начального диаметра камеры смешения от 42 мм до 92 мм, не обнаружено влияние масштабного фактора на геометрические соотношения и достижимые эксплуатационные характеристики.

Рабочий процесс ПВЭ оптимальной геометрии характеризуется выходом на автомодельный режим по $P_{0, n}$ и коэффициенту скорости активного газа на выходе из сопла λ_a при достижении минимального значения $P_{0, n, \text{min}}$.

Анализ экспериментальных характеристик ПВЭ позволяет сделать вывод, что типовыми характеристиками ПВЭ являются зависимости $P_{0, n} = f(P_{0, a})$ и $\lambda_a = f(P_{0, a})$ (Рис.3).

На рабочих режимах характеристики имеют две ветви с линейной зависимостью параметров, разделенные точкой излома с координатами $P_{0, n, \text{min}}$ и $P_{0, a, \text{min}}$ для $P_{0, n} = f(P_{0, a})$ и с координатами $\lambda_{a, \text{max}}$ и $P_{0, a, \text{min}}$ для $\lambda_a = f(P_{0, a})$.

Здесь $P_{0, n, \text{min}}$ и $P_{0, a, \text{min}}$ - параметры выхода на автомодельный режим.

Левая ветвь характеристики $P_{0, n} = f(P_{0, a})$ может быть описана уравнением:

$$\frac{P_{0, n} - P_{0, n, \text{min}}}{P_{0, \text{см}} - P_{0, n, \text{min}}} = \frac{P_{0, a, \text{min}} - P_{0, a}}{P_{0, a, \text{min}} - P_{0, \text{см}}}$$

Для правой ветви справедливо выражение $P_{0, n, \text{min}} = \text{Const}$.

Левая ветвь характеристики $\lambda_a = f(P_{0, a})$ описывается уравнением:

$$\frac{\lambda_{a, \text{max}} - \lambda}{\lambda_{a, \text{max}}} = \frac{P_{0, a, \text{min}} - P_{0, a}}{P_{0, a, \text{min}} - P_{0, \text{см}}}$$

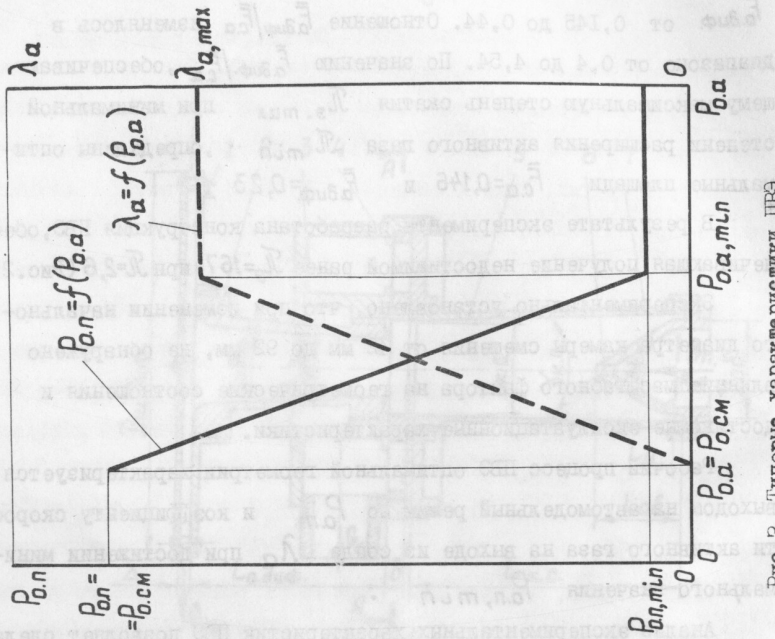
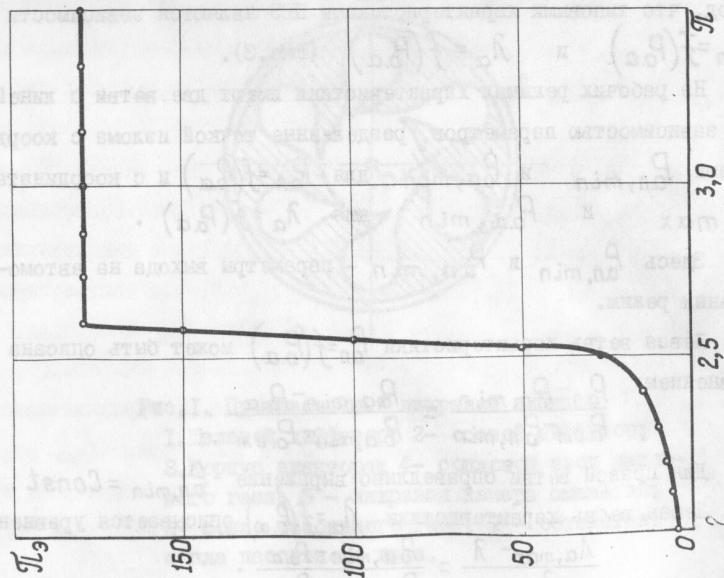


Рис.3. Типовые характеристики ПВЭ.

Рис.2. Пределная по π_3 характеристика ПВЭ.

Для правой части характеристики справедливо выражение:

$$\lambda_{a,max} = \text{Const.}$$

Правые ветви обеих характеристик соответствуют автономному режиму работы ПВЭ, который наступает при давлении активного газа $P_{a,min}$ при π_{min} и характеризуется максимальным коэффициентом скорости истечения активного газа из сопла $\lambda_{a,max}$ и минимальным давлением пассивного газа $P_{0,n,min}$, т.е. максимальной степенью сжатия $\pi_{3,max}$.

На втором этапе исследований при $n > 0$ определено влияние на n геометрических параметров эжектора и режимных факторов (Рис.4,5,6); установлено, что наличие пассивного потока не требует изменения геометрических параметров ПВЭ, оптимальные значения которых определены при $n = 0$.

При работе с $n > 0$, как и при $n = 0$, наблюдается выход на автономный режим по $P_{0,n}$ и λ_a . Эти режимы устанавливаются при оптимальной геометрии для $\frac{F_{адиф.}}{F_{с.а}} \geq 1,5$.

Результаты испытаний ПВЭ в широком диапазоне изменений π_3 , n , $D_{с.п}$ и π как при работе с постоянными n , так и при вакуумировании замкнутых объемов, легли в основу технико-экономического сравнения вакуумирующих устройств различных типов, проведенного с целью определения области применения ПВЭ. Сравнение ПВЭ с прямотруйными и вихревыми прямоточными эжекторами и механическим насосом ВВН-З, показало, что способность ПВЭ работать при малых π и n со значительными π_3 обеспечивает ему высокую конкурентноспособность и определяет область его применения - использование в качестве вакуум-насоса. Конкурентноспособность ПВЭ по сравнению с другими эжекторами обусловлена, при прочих равных условиях, меньшей степенью расширения газа в активном сопле, т.е. значительно большим статическим давлением газа на выходе из сопла и, как следствие этого, меньшим расходом активного

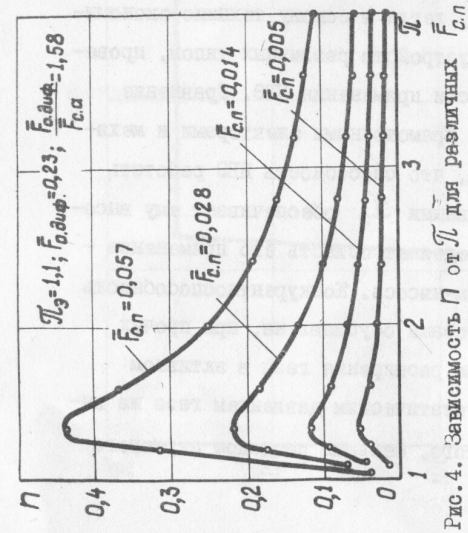
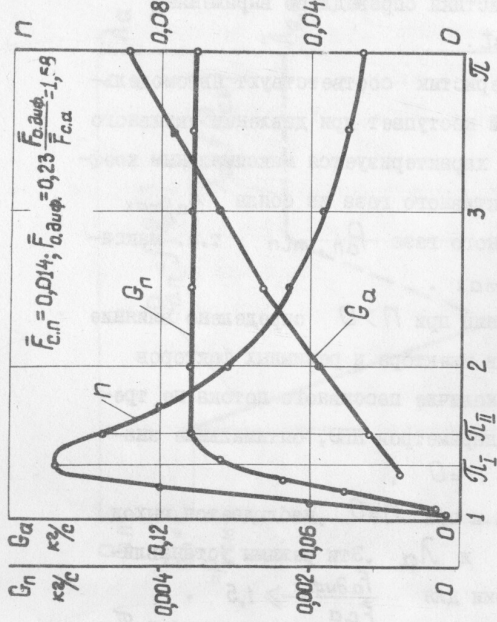


Рис. 4. Зависимость n от $\frac{P_i}{P_{i0}}$ для различных $\frac{F_{c,n}}{F_{c,a}}$



10

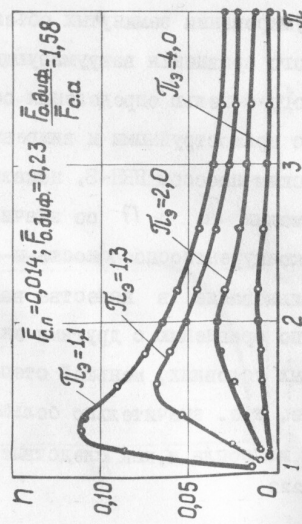


Рис. 5. Влияние $\frac{P_{i3}}{P_{i0}}$ на n

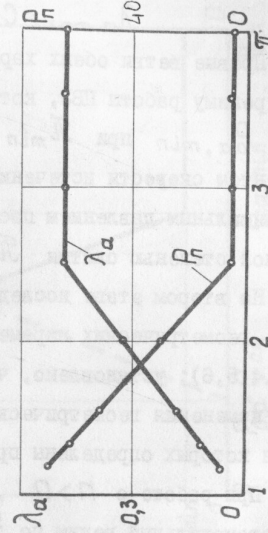


Рис. 6. Зависимость $G_a, G_n, \lambda_a, n, R_n$ от $\frac{P_i}{P_{i0}}$ для $\frac{P_{i3}}{P_{i0}} = 1,1$

11

газа. Результаты сравнения вихревых эжекторов различного типа представлены в табл. I.

Таблица I

Тип эжектора	Давление активного газа, P_a , ммга	Расход активного газа, G_a , кг/час	Вакуумируемый объем, V , м ³	Время вакуумирования, t , мин	Давление в вакуумируемом объеме, $P_{ср}$, кПа	Степень сжатия эжектора, $\mu_{э}$	Степень расширения активного газа μ
ДКМ-I	0,294	406	0,04	1,5	0,98	-	-
ДКМ-I+ДКМ-2	0,294	-	0,5	17	2,45	-	-
ДКМ	0,421	258	Самовакуумирование	-	2,9	34	4,2
ПВЭ-42	0,26	256	0,003	0,1	0,6	167	2,6
ПВЭ-42	0,26	256	0,12	9	20	50	2,6

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены результаты аэродинамического исследования камеры смешения, проведенного для выявления особенностей рабочего процесса ПВЭ, которые не могли быть объяснены внешним экспериментом.

Аэродинамические исследования проводились методом зондирования поперечных сечений камеры смешения в радиальном направлении.

На рис. 7 представлены эпюры полного и статического давлений, тангенциальной и осевой скоростей построенные по результатам зондирования трех сечений: в сечении, примыкающим к сопловому вводу активного газа; в сечении сопла пассивного газа; в сечении равноотстоящем от сопел активного и пассивного газа.

Из рассмотрения эпюр следует, что в активном сопле ПВЭ не происходит полного расширения газа, т.к. оно работает на докритическом перепаде давлений. В конической камере смешения осуществляется дальнейшее расширение активного газа как в радиальном направлении, так и по длине камеры смешения, так называемое центробежное расширение, при котором периферийное статическое давление



Рис. 7. Эпюры полных и статических давлений, тангенциальных и осевых скоростей в поперечных сечениях камеры смешения противоточного вихревого эжектора ПВЭ-42 при

$$P_{0a} = P_{0a, \min} = 0,26 \text{ МПа}; \quad P_{0l, \min} = 0,002 \text{ МПа.}$$

по длине камеры смешения остается практически постоянным. При этом наблюдается незначительное снижение полного давления от сечения сопла активного газа к сечению сопла пассивного газа, что сопровождается снижением скорости газового потока, в том числе и тангенциальной составляющей.

В радиальном направлении в каждом зондируемом сечении наблюдается снижение полного и статического давления от периферии к радиусу. На оси устанавливаются минимальные их значения. При этом в периферийной кольцевой области камеры смешения темп снижения статического давления выше, чем полного. В центральной приосевой области — темп снижения полного давления выше, чем статического. Этим объясняется наличие в камере смешения двух областей с вихревым движением газа: периферийной, в которой движение газа осуществляется по закону $W_{\alpha} \cdot r^2 = \text{Const}$, близкому к закону свободного вихря $W_{\alpha} \cdot r = \text{Const}$, и приосевой, в которой газ движется по закону вынужденного вихря $\frac{W_{\alpha}}{r} = \text{Const}$.

Показатель степени α учитывает суммарные трудноконтролируемые потери в камере смешения и определяется экспериментально. Для ПВЭ оптимальной геометрии $\alpha = 0,48 \dots 0,51$.

Область свободного вихря более обширна, по сравнению с областью вынужденного вихря.

Вакуумная зона в камере смешения ПВЭ имеет форму усеченного конуса, соосного камере смешения, и занимает область вынужденного вихря. Диаметр большего основания равен входному диаметру осевого диффузора.

Смесь газов движется от сопла пассивного газа к диффузору по всей вакуумной зоне.

Скорость вихревого потока в камере смешения имеет наибольшее значение на границе вынужденного и свободного вихрей и достигает максимального значения, равного скорости звука.

Наибольшее разрежение наблюдается на оси камеры смешения в сечении сопла пассивного газа. В этом сечении максимальная скорость (скорость звука) достигается на меньшем радиусе, чем в любом другом сечении камеры смешения. Так как в области вынужденного вихря тангенциальная скорость в радиальном направлении изменяется по закону $\frac{W_{\varphi}}{r} = Const$, то на любом радиусе этой области, меньшем минимального радиуса границы вихрей, наибольшая тангенциальная скорость газа по длине камеры смешения достигается в сечении сопла пассивного газа.

Здесь же наблюдается минимальное статическое давление газа и поэтому именно в этом сечении осуществляется подвод пассивного газа в камеру смешения.

Анализ эпюр, полученных при зондировании камеры смешения ПВЭ, работающего в режиме $P_{0a} = P_{0a, min}$, показал, что минимальное давление на оси эжектора $P_{0n, min}$ устанавливается при достижении скорости звука на границе слияния свободного вихря с вынужденным.

При давлении $P_{0a} < P_{0a, min}$ максимальная скорость на границе вихрей не достигает критических значений. Профиль и размеры вакуумной зоны сохраняются такими же как и при $P_{0a} = P_{0a, min}$. При этом давление на оси камеры смешения в сечении сопла пассивного газа, определяемое скоростью потока газов на границе вихрей и размером вакуумной зоны, повышается. Таким образом, необходимым условием получения минимального давления на оси камеры смешения в сечении пассивного сопла является увеличение скорости на границе вихря до скорости звука.

Дальнейшее повышение давления $P_{0a} > P_{0a, min}$ не приводит к понижению P_{0n} по сравнению с режимом $P_{0a} = P_{0a, min}$. Экспериментально установлено, что максимальная скорость в камере смешения не превышает скорости звука. Вакуумная зона по-прежнему имеет

коническую форму. С ростом $P_{0a} > P_{0a, min}$ область вынужденного вихря в сечении сопла пассивного газа сужается. Однако для эжектора оптимальной геометрии с $\frac{F_{0, \text{дуф}}}{F_{c, a}} \geq 1,5$ при увеличении P_{0a} до 0,6 МПа давление P_{0n} практически не изменяется и равняется $P_{0n} = P_{0n, min}$, т.к. вакуумная зона изменяется незначительно.

Как показали эксперименты, для эжекторов с $\frac{F_{0, \text{дуф}}}{F_{c, a}} < 1,5$ и особенно, с $\frac{F_{0, \text{дуф}}}{F_{c, a}} < 1$ вакуумная зона с ростом $P_{0a} > P_{0a, min}$ резко сужается в сечении сопла пассивного газа. С уменьшением вакуумной зоны возрастает давление на радиусе пассивного сопла, что приводит к ухудшению вакуума, т.е. нарушается автономность по P_{0n} . При этом темп снижения вакуума тем выше, чем больше радиус сопла пассивного газа.

Эксперименты по изучению внутренней аэродинамики показали, что закономерности и структура вихревых потоков в камере смешения не зависят от наличия или отсутствия пассивного потока, что объясняется достаточно малыми коэффициентами эжекции, при которых работает противоточный вихревой эжектор.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ рассматривается приближенная методика термодинамического расчета камеры смешения ПВЭ, разработанная с учетом экспериментального материала.

Вследствие сложности термодинамических процессов протекающих в ПВЭ, расчетные уравнения выводятся для трех основных сечений эжектора - на срезах сопел активного и пассивного потоков и на выходе из камеры смешения.

При выводе уравнений применяются газодинамические функции, что позволяет выявить основные качественные закономерности течения и связь между параметрами газовых потоков.

Основное расчетное уравнение для камеры смешения, связывающее параметры активного, пассивного и смеси газов, получено из

исходных уравнений: сохранения массы, энергии и количества движения:

$$\pi_{к.с.} = \frac{\pi_1 \cdot \bar{F} \cdot q(\lambda_a) \cdot q(\lambda_n) \cdot \sqrt{(1+n) \cdot (1+n\theta)} \cdot \mu_n \cdot \mu_a}{\mu_n \cdot \mu_{см} \cdot q(\lambda_{см}) \cdot q(\lambda_n) + q(\lambda_{см}) \cdot \pi_1 \cdot \bar{F} \cdot q(\lambda_a) \cdot n \cdot \sqrt{\theta} \cdot \mu_a \cdot \mu_{см}}$$

Это уравнение позволяет при заданных геометрии эжектора, полных давлениях и температурах активного и пассивного газа, статическом давлении активного газа на выходе из сопла и коэффициенте эжекции определить степень сжатия пассивного газа в камере смешения.

Входящие в уравнение газодинамические функции $q(\lambda_n)$, $q(\lambda_a)$ и $q(\lambda_{см})$ легко определяются по значению газодинамической функции $\pi(\lambda_a) = \frac{P_a}{P_{0,a}}$ для активного газа и с использованием уравнений расхода и сохранения количества движения для пассивного газа и смеси газов.

Сравнение результатов расчетов, проведенных по данной методике, с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение; расхождение опытных и расчетных данных не превышает 8%.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ говорится о том, что закономерности рабочего процесса ПВЭ позволили разработать на его базе ряд высокоэффективных вакуумирующих устройств, в том числе многокамерный вихревой противоточный эжектор (А.с. № 916786). При аэродинамических исследованиях однокамерного ПВЭ было установлено, что по мере повышения давления активного газа на входе в ПВЭ увеличивается скорость расширяющегося вихревого потока в камере смешения. При максимальной скорости (равной скорости звука) давление на оси ПВЭ в широком торце камеры смешения достигает минимальных значений.

Оказалось продуктивным решение создать искусственные условия для дальнейшего расширения газа и соответственного увеличения его скорости в дополнительной вихревой камере при $P_{0,a} < P_{0,a, \min}$.

Рабочий процесс многокамерного эжектора (рис.8) осуществляет-

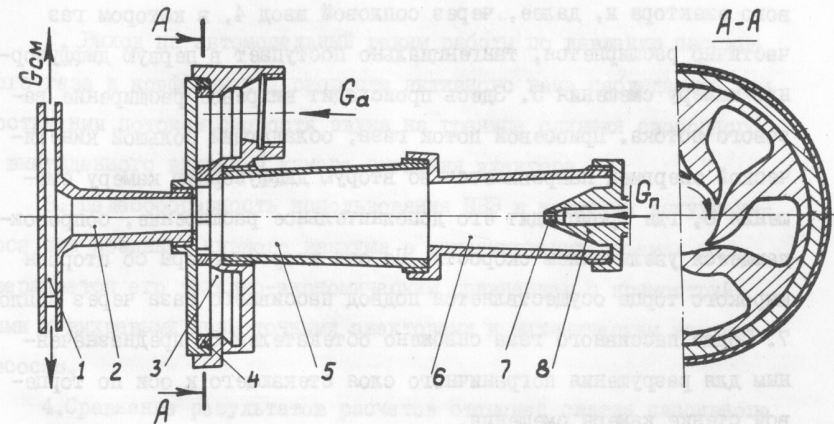


Рис.8. Многокамерный противоточный эжектор.

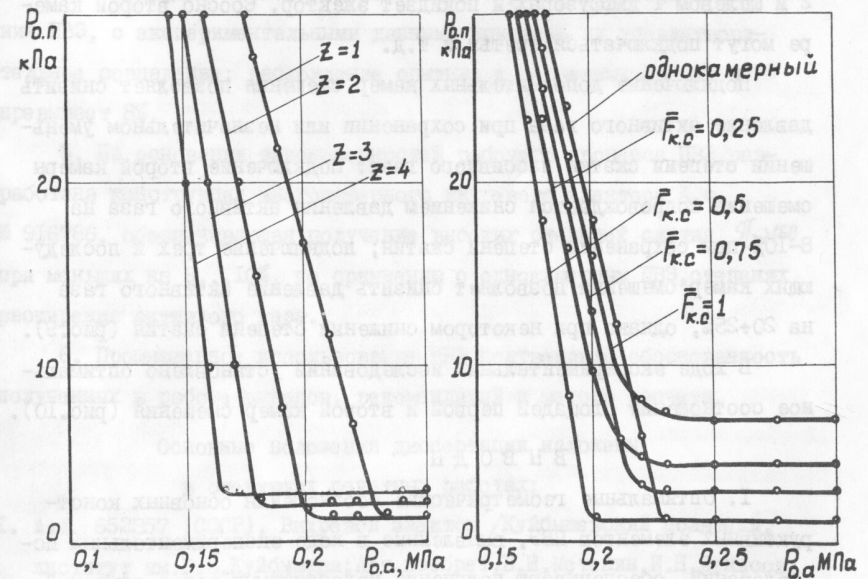


Рис.9. Влияние числа камер Z на рабочий процесс эжектора.

Рис.10. Влияние отношения площадей $\frac{F_{к.с.2}}{F_{к.с.1}} = \bar{F}_{к.с.}$ на работу эжектора.

ся следующим образом: активный газ подводится к корпусу 3 вихревого эжектора и, далее, через сопловой ввод 4, в котором газ частично расширяется, тангенциально поступает в первую диффузорную камеру смешения 5. Здесь происходит вихревое расширение газового потока. Присоединенный поток газа, обладающий большой кинетической энергией направляется во вторую диффузорную камеру смешения 6, где происходит его дополнительное расширение, сопровождающееся увеличением скорости. По оси второй камеры со стороны широкого торца осуществляется подвод пассивного газа через сопло 7. Сопло пассивного газа снабжено обтекателем 8, предназначенным для разрушения пограничного слоя стекающего к оси по торцевой стенке камеры смешения.

Смесь активного и пассивного газов затормаживается в осевом 2 и целевом I диффузорах и покидает эжектор. Соосно второй камере могут подключаться третья и т.д.

Подключение дополнительных камер смешения позволяет снизить давление активного газа при сохранении или незначительном уменьшении степени сжатия пассивного газа. Подключение второй камеры смешения сопровождается снижением давления активного газа на 8-10% при сохранении степени сжатия; подключение трех и последующих камер смешения позволяет снизить давление активного газа на 20+25%, однако при некотором снижении степени сжатия (рис.9).

В ходе экспериментальных исследований установлено оптимальное соотношение площадей первой и второй камер смешения (рис.10).

ВЫВОДЫ

I. Оптимальные геометрические соотношения основных конструктивных элементов ПВЭ, выявленные в ходе экспериментальных исследований, обеспечивают получение недостижимых ранее степеней сжатия пассивного газа $\pi_2 > 160$ при минимальных степенях расширения активного $\pi \leq 2,6$.

2. Выход на автомоделный режим работы по давлению пассивного газа и коэффициенту скорости активного газа наблюдается при достижении потоком скорости звука на границе слияния свободного и вынужденного вихрей в камере смешения эжектора.

3. Целесообразность использования ПВЭ в качестве вакуум-насоса для создания низкого вакуума в вакуумируемых объемах подтверждается его технико-экономическим сравнением с прямоструйными и вихревыми прямоочными эжекторами и механическим вакуум-насосом.

4. Сравнение результатов расчетов степеней сжатия пассивного газа в камере смешения ПВЭ, проведенных по разработанной приближенной методике термогазодинамического расчета камеры смешения ПВЭ, с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение; расхождение опытных и расчетных данных не превышает 8%.

5. На основании закономерностей рабочего процесса ПВЭ разработана конструкция многокамерного вихревого эжектора, А.с. № 916786, обеспечивающая получение высоких степеней сжатия $\pi_2 > 160$ при меньших на 8...10%, по сравнению с однокамерным ПВЭ, степенях расширения активного газа.

6. Промышленное использование ПВЭ подтвердило обоснованность полученных в работе выводов, рекомендаций и метода расчета.

Основные положения диссертации изложены

в следующих печатных работах;

1. А.с. 652357 (СССР). Вихревой эжектор /Куйбышевский политехн. институт им.В.В.Куйбышева; Авт.изобрет.В.И.Метенин, И.Н.Денисов, В.Б.Черепанов, Т.В.Лобанова.-Опублик.в Б.И.,1979, № 10.
2. Метенин В.И., Бобров В.В., Черепанов В.Б. Применение вихревых эжекторов в схемах охлаждения.-В кн.: "Вопросы радиоэлектроники". Серия ТРТ0. Вып. I (39). Одесса, 1981, с.45-51.

3. Метенин В.И., Черепанов В.Б., Самойлов В.Е., Принцип работы и характеристики противоточного вихревого эжекторов. - В кн.: "Повышение эффективности холодильных машин". Ленинград, 1982, с.69-74, (Ленинград. технологический институт им. Ломоносова, Межвуз сб. научных трудов).
4. А.с. № 916786 (СССР). Вихревой эжектор / Куйбышевский политехн. ин-т им. В.В. Куйбышева; Авт. изобрет. В.И. Метенин, И.Н. Денисов, В.Б. Черепанов, В.Е. Самойлов. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 12.
5. Метенин В.И., Самойлов В.Е., Черепанов В.Б. Противоточный вихревой эжектор. - В кн.: Автоматизация проектирования радиотехнических систем. Харьков, 1982, с.389-398, (Харьковский ордена Ленина авиац. ин-т. Тр. республиканской школы-семинара. Рукопись депонирована в ВИНТИ 29.06.83, № 34, 88-83 Дел.).
6. Метенин В.И., Черепанов В.Б., Самойлов В.Е. Вихревой прямооточно-противоточный эжектор. - В кн.: Автоматизация проектирования радиотехнических систем. Харьков, 1982, с.399-405, (Харьковский ордена Ленина авиац. ин-т. Тр. республиканской школы-семинара. Рукопись депонирована в ВИНТИ 29.06.83, № 34, 88-83 Дел.).
7. Бобров В.В., Самойлов В.Е., Черепанов В.Б. Метод повышения эффективности двухступенчатого вихревого холодильного аппарата, (Рукопись депонирована в ЦИНТИХимнефтемаша № 1070; Оpubл. в указателе ВИНТИ "Депонированные рукописи", 1983, № 12 с.138).
8. Черепанов В.Б., Самойлов В.Е. Экспериментальные исследования влияния конструкции диффузора на рабочий процесс противоточного вихревого эжектора. В кн.: Тезисы докладов областной научно-технической конференции "60-летию СССР - ударный труд, знания, инициативу и творчество молодых". Куйбышев, 1983, с.226.
9. Черепанов В.Б. Экспериментальные исследования влияния обтекателя сопла пассивного газа на рабочий процесс противоточного вихревого эжектора. - В кн.: Тезисы докладов областной научно-

- технической конференции "60-летию СССР - ударный труд, знания, инициативу и творчество молодых". Куйбышев, 1983, с.225-226.
10. А.с. № 1036962 (СССР). Вихревой эжектор / КПТИ им. В.В. Куйбышева; Авт. изобрет. В.И. Метенин, И.Н. Денисов, В.Б. Черепанов, А.В. Князев. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 31.
 11. Приближенная методика термогазодинамического расчета противоточного вихревого эжектора / Метенин В.И., Денисов И.Н., Черепанов В.Б., Самойлов В.Е. - в кн.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев, КуАИ, 1984, с.142-146.
 12. Исследование характеристик противоточного вихревого эжектора / Метенин В.И., Денисов И.Н., Черепанов В.Б., Самойлов В.И. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1986, № 1, с.67-71.

Условные обозначения

$\pi_2 = \frac{P_{0,cm}}{P_{0,n}}$ - степень сжатия эжектора; $\pi = \frac{P_{0,a}}{P_{0,cm}}$ - степень расширения активного газа; $\pi_{к.с}$ - степень сжатия камеры смешения; $\pi_1 = \frac{P_{0,a}}{P_{0,n}}$ - степень расширения газа в вихре; $\bar{F} = \frac{F_{c,a}}{F_{c,n} + F_{c,m}}$ - отношение площадей; η - коэффициент эжекции; μ - коэффициент расхода; $\theta = \frac{T_{0,n}}{T_{0,a}}$ - отношение температур; T - статическая температура, К; P - статическое давление, кПа; V - объем, м³; G - массовый расход газа, $\frac{кг}{сек}$; τ - время, сек; L, H, D, R - линейные размеры; длина, высота, диаметр, радиус, м; Δ - зазор между дисками целевого диффузора, м; γ - угол конусности, град; F - площадь, м²; $\bar{L}_i = \frac{L_i}{D_{к.с}}$, $\bar{F}_i = \frac{F_i}{F_{к.с}}$ - относительные геометрические параметры, отношение линейного размера элемента ПВЭ к начальному диаметру камеры смешения или соответствующей площади к площади входного сечения камеры смешения; λ - коэффициент скорости; $q(\lambda), \pi(\lambda)$ - газодинамические функции.

Индексы:

а - активный газ; п - пассивный газ; см - смесь газов; к.с. - камера смешения; с.а, с.п. - сопло активного, пассивного газов; диф - диффузор; об - обтекатель; τ - тангенциальная составляющая скорости; о - полные термодинамические параметры; осевой диффузор; осевая составляющая скорости.

Закон