

М 337935

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

АБАКУМОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ
С РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

(05.04.06 - Вакуумная и компрессорная техника)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1979

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

Научный руководитель

д.т.н., профессор ФРОЛОВ Е.С.

Научный консультант

к.т.н. МИНАЙЧЕВ В.Е.

Официальные оппоненты:

д.ф-м.н., профессор КИСЕЛЕВ "И.

к.т.н. ГРИШИН В.К.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "26" апрель 1979 г.

Защита диссертации состоится "28" март 1979 г.
в 14³⁰ на заседании специализированного совета К.053.15.07
МВТУ имени 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
имени Н.Э.Баумана.

Учен

(ЗЛОВ)

А-76937 от

М 337935

Тип. 100

Задачи, поставленные XXV съездом КПСС по повышению качественных показателей отраслей машиностроения, требуют значительного расширения производства современной быстродействующей электронно-вычислительной техники, приборов, радиоэлектронной аппаратуры, лазерной и другой новейшей техники.

Развитие этих областей техники во многом зависит от использования высокопроизводительных, надежных в эксплуатации, простых и долговечных средств откачки для создания и поддержания высокого вакуума, необходимого для осуществления технологических процессов и обеспечения условий работы установок, различного технологического назначения.

Актуальность проблемы. В настоящее время самым распространенным промышленным средством откачки являются диффузионные вакуумные насосы, которые обладают простотой конструкции, надежностью в эксплуатации, сравнительно высокой скоростью действия в широком диапазоне давлений, относительно низкой стоимостью получения вакуума, высокой долговечностью и др..

Диффузионные вакуумные насосы могут с успехом использоваться для получения высокого вакуума и еще длительное время будут оставаться одним из основных откачных средств в промышленном вакуумном оборудовании. Этим и объясняется необходимость исследовательских и конструкторских работ, направленных на совершенствование конструкции, повышение эффективности работы насосов и снижение технологических энергозатрат.

Цель работы. Повысить эффективность работы диффузионных насосов можно за счет оптимизации геометрической конфигурации и размеров конструктивных элементов входной ступени насоса, поэтому данная работа посвящена исследованию диффузионного вакуумного насоса с расширяющейся камерой смещения.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1337935

Авакуумная Н.В. Исследования

Научная новизна. Рассмотрены особенности истечения струи пара рабочей жидкости из зонтичного сопла. Установлено влияние профилирования стенки паропровода и расширения корпуса насоса в области входной ступени на структуру струи пара, истекающей из сопла. Разработана теоретическая модель процесса откачки диффузионных насосов с расширяющейся камерой смешения.

Разработана методика расчёта диффузионных вакуумных насосов с расширяющимся корпусом в области входной ступени.

Методика исследований. Поставленная задача решается теоретически и экспериментально – с помощью специально сконструированной и изготовленной установки для исследования влияния диаметра входной камеры смешения, диаметра высоковакуумного сопла, расстояния между высоковакуумным и последующим соплом, угла конусности корпуса, угла тарелки сопла и высоты расширенной части корпуса на откачные характеристики насоса.

Методом математического планирования эксперимента установлена связь между основными откачными характеристиками диффузионных насосов и конструктивными параметрами входной камеры смешения.

При экспериментальном определении откачных параметров использовался метод постоянного давления.

Практическая ценность. На основании проведенных исследований по выявлению влияния основных геометрических параметров входной расширяющейся камеры смешения на откачные характеристики насоса определены практические рекомендации по конструированию диффузионных вакуум-насосов с расширяющейся камерой смешения. Результаты выполненной работы используются при модернизации насосов Н-2К и Н-5К и при разработке нового насоса Н-10К.

Апробация работы. Работа обсуждалась на заседании кафедры "Компрессорные и вакуумные машины" МВТУ им. Н. Э. Баумана и в организации, занимающейся созданием диффузионных вакуумных насосов. Основное содержание работы изложено в двух печатных работах и одном научно-исследовательском отчете.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, приложения и списка литературы (93

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

наименования и содержит 120 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 5 таблиц в тексте и 11 таблиц в приложении.

В первой главе приведен критический анализ работ, посвящённых теоретическому и экспериментальному исследованию диффузионных вакуумных насосов. Диффузионные насосы используются в производственных установках для создания высокого вакуума.

Применение расширяющегося корпуса в области входной ступени позволяет повысить эффективность работы диффузионных насосов. Дальнейшее повышение эффективности их работы возможно за счёт оптимизации геометрической конфигурации и размеров конструктивных элементов входной ступени.

Основное содержание данной работы, направленной на исследование возможности повышения эффективности диффузионных вакуумных насосов при снижении энергозатрат, включает в себя следующие основные задачи:

1. Разработка теоретической модели процесса откачки диффузионных вакуумных насосов с расширяющейся камерой смешения.

2. Теоретическое исследование влияния геометрических параметров входной камеры смешения на быстроту действия насоса с целью определения их оптимальных значений.

3. Разработка методики расчёта расширяющейся камеры смешения входной ступени.

4. Экспериментальное исследование влияния различных геометрических параметров входной расширяющейся камеры смешения насоса на его откачные характеристики.

Во второй главе рассматривается теоретическая модель процесса переноса молекул газа струей пара в диффузионных насосах с зонтичными соплами и расширяющегося корпуса в области входной ступени.

Условия, определяющие процесс истечения пара рабочей жидкости из сопла в вакуумируемое пространство диффузионного насоса, следующие:

- 1/ отношение давления пара на срезе сопла " p_c " к давлению газа в вакуумируемом пространстве " p " должно быть значительно больше 1, т.е. $p_c/p \gg 1$;

- 2/ отношение длины свободного пробега молекул газа в па-

ре L к характерному размеру / диаметру сопла d_c / -
 $L/d_c < 10^{-2}$.

При указанных условиях струя пара считается недорасширенной и после выхода из сопла продолжает расширяться в окружающей среде.

В отличие от осесимметричных сопел зонтичные сопла, применяемые в современных конструкциях диффузионных насосов, создают в струе пара дополнительное отклонение, угол которого σ зависит от скорости потока λ и угла косого среза сопла β_1 , и определяется по формуле:

$$\sigma = \arcsin \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{\lambda_m^2 \cdot \lambda_1^2}{\lambda_m^2 - \lambda_2^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sin \beta_1 \right] - \beta_1, \quad (1)$$

где $\lambda_1 = \frac{C_1}{a_{кр}}$; $\lambda_2 = \frac{C_2}{a_{кр}}$; $\lambda_m = \frac{C_{max}}{a_{кр}}$,

C_1, C_2 - скорости потока пара на срезе сопла и на некотором расстоянии от среза сопла соответственно;

C_{max} - максимальная скорость потока;

$a_{кр}$ - скорость потока в критическом сечении;

k - показатель адиабаты пара рабочей жидкости.

Аэродинамическое профилирование паропровода создаёт волну сжатия в струе. Для случая малых возмущений, которые возникают в каждой точке плавной поверхности паропровода, изменение давления $\frac{dp}{p}$ и угла отклонения потока $d\sigma$, выраженные через угол наклона косого скачка уплотнения β , угол Маха α и число Маха M набегающего потока, определяются из уравнений:

$$\frac{dp}{p} = \frac{2k}{k+1} \cdot \frac{\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \approx \frac{4k}{k+1} \operatorname{ctg} \alpha (\beta - \alpha); \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} d\sigma = \frac{2}{k+1} \cdot \frac{d\beta}{M^2} (M^2 \sin \beta - 1) \approx \frac{4}{k-1} \cos^2 \alpha (\beta - \alpha) \quad (3)$$

При истечении струи пара из высоковакуумного зонтичного сопла у его края с координатами $x=1; y=0$ / образуется волна разрежения, которая взаимодействует с волной сжатия от профилированного паропровода. В результате углы наклона скачков

уплотнения β_c в каждой точке профилированного паропровода увеличивается, а форма скачка уплотнения определяется из уравнения:

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{x-1}{y} + \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad (4)$$

где α_1 - угол Маха на срезе сопла.

Решение уравнения /4/:

$$x-1 = y \operatorname{ctg} \alpha_1 - 2 \sqrt{\frac{y}{h}}, \quad (5)$$

где h - расстояние от стенки паропровода до прямолинейного участка, которое в свою очередь определяется из уравнения:

$$h \cdot \frac{k+1}{4} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta_c}{\sin^2 \alpha_1 \cdot \cos^2 \alpha_1} = 1 \quad (6)$$

Наличие за высоковакуумной ступенью последующей ступени в многоступенчатых насосах также влияет на структуру струи, создавая скачок уплотнения под углом β_2 , давление за которым $P_{сд}$ определяется из уравнения:

$$\frac{P_{сд} - P_H}{P_H \cdot V_H^2} = \frac{\sin \beta_2 \cdot \sin \delta_{2c}}{\cos (\beta_2 - \delta_{2c})}, \quad (7)$$

где δ_{2c} - угол поворота стенки паропровода за счёт тарели последующего сопла;

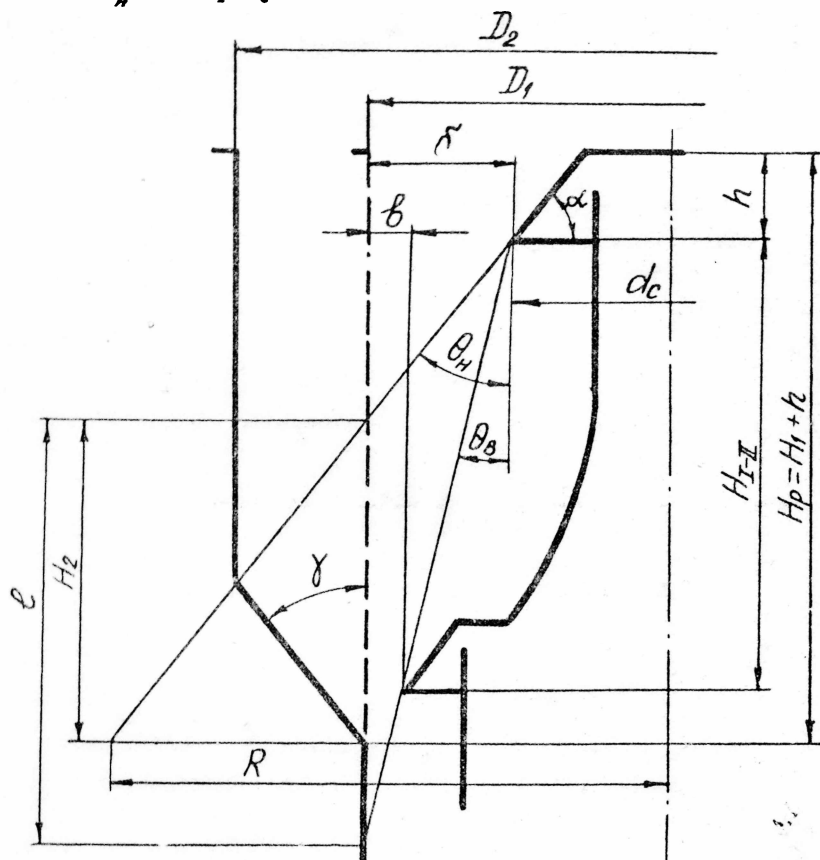
P_H, ρ_H, V_H - давление, плотность и скорость набегающего потока соответственно.

Таким образом, профилирование стенки паропровода и наличие косо́го среза сопла создают в струе сложные процессы. Истечение пара рабочей жидкости из сопла в вакуумируемое пространство даёт слабую волну разрежения от края сопла, образующую угловую область. Профилированная стенка паропровода создаёт в потоке косо́й скачок уплотнения и слабую волну сжатия у стенки паропровода. Сечение линий тока вдоль стенки суживается, а давление повышается. Это даёт возможность условно разбить струю пара на две области: угловую - разреженную у края струи и плотную - у стенки паропровода.

В рабочем режиме насоса условные границы угловой области направлены под углами θ отличными от 0° и 90° .

Для практических расчётов принято под границей струи по-

нимать характеристику, на которой давление пара p_n равно давлению газа окружающей среды. Угол наклона границы струи к оси насоса - θ_n /см. рисунок/.



Благодаря наличию угловой области, где давление пара падает вдоль прямых, перпендикулярных оси струи, в неё происходит диффузия газа до тех пор, пока концентрация газа в струе не станет равной концентрации газа в области предварительного разрежения.

Характеристика, на которой давление пара равно давлению газа в области предварительного разрежения ($p_n = p_{\text{пред. разреж.}}$), определяет внутреннюю границу угловой области с углом наклона к оси насоса θ_b . Плотная часть струи препятствует проникнове-

нию газа внутрь струи. Молекулы газа, диффундирующие в струю, получив импульс от молекул пара, двигаются в сторону предварительного разрежения и поступают в канал с некоторой шириной " δ " или "эффективную диффузионную диафрагму", понятие которой впервые ввел Минайчев В.В.. При этом плотность пара в канале такова, что она обеспечивает преимущественное движение молекул газа на сторону предварительного разрежения.

Для насосов с цилиндрическим корпусом существует оптимальное расстояние между высоковакуумным соплом и стенкой насоса " δ " /входная диафрагма/, при котором быстрота действия насоса S достигает своей максимальной величины. Практически это означает, что существует оптимальная ширина эффективной диффузионной диафрагмы " δ_{opt} ", увеличение или уменьшение которой при соответственном изменении " δ " в насосе с цилиндрическим корпусом приводит к нарушению оптимального соотношения между прямой и обратной диффузией газа в пар и к уменьшению S .

Следовательно, для насосов с цилиндрическим корпусом при данной сопловой системе нельзя произвольно изменять диаметр входа в насос, а точнее, диаметр той части корпуса насоса, где находится зона эффективной диффузионной диафрагмы, так как именно она обеспечивает переток газа на сторону предварительного разрежения. Сохранив оптимальной ширину δ , можно изменять диаметр входа в насос и конфигурацию охлаждаемой стенки насоса с тем, чтобы эффективнее использовать струю пара рабочей жидкости. Ширина этой диафрагмы оценивалась с помощью упрощенной схемы Гедде по полученному уравнению:

$$S = \frac{2}{3} \pi \bar{c}_r \cdot \frac{\delta^2}{2} (D_1 - \delta) \cdot e^{-\frac{2}{3} \cdot \frac{p_0 \cdot \delta}{p_0} \bar{c}_n}, \quad (8)$$

где $\bar{c}_r$ и $\bar{c}_n$ - среднеарифметические скорости молекул газа и пара,
 ℓ - ширина угловой области в направлении откачки,
 D_1 - диаметр цилиндрической части корпуса,
 λ_0 - постоянная диффузии газа в пар.

Из уравнения видно, что ширина канала " δ " должна быть одного порядка с длиной свободного пробега молекул газа в паре.

Глубина диффузии молекул газа в пар неодинакова по длине струи: вблизи сопла с. т. минимальна и достигает максимума

у стенки корпуса насоса.

Быстрота действия насоса S определяется тем количеством молекул газа, которое "захватит" угловая область струи и передает через эффективную диффузионную диафрагму, причем наиболее интенсивная диффузия молекул газа происходит в широкую "активную" часть угловой области, где диффузионная глубина прониновения максимальна.

Чтобы увеличить S , необходимо улучшить доступ молекул газа к "активной" части угловой области струи. Это возможно за счет расширения корпуса насоса в зоне падения струи на охлаждаемую стенку насоса.

Допуская, что количество молекул газа, диффундирующих в угловую область струи, пропорционально объему угловой области струи, определено приращение объема газа, получаемое за счет расширения корпуса в области входной ступени насоса:

$$\Delta V = \frac{H_2(R+2R_1) - H_3(R+R_1+R_2)}{H_1(R+R_1+R_2) - H_2(R+2R_1)}, \quad (9)$$

где R_1 и R_2 - радиусы насосов с цилиндрическим корпусом и с расширенной камерой смешения соответственно;

R - максимальный радиус расширяющейся камеры смешения;

R_c - радиус высоковакуумного сопла;

H_1 и H_2 - общая и промежуточная высота камеры смешения;

H_3 - высота конической части камеры смешения.

Оптимальные размеры камеры смешения определяются исходя из условия, что прирост быстроты действия насоса возможен лишь за счет увеличения угловой области струи.

Глубина расширяющейся части корпуса H_p определяется по формуле:

$$H_p = \frac{D_1 - d_c}{2} \operatorname{ctg} \theta_0 + h, \quad (10)$$

где d_c и h - диаметр и высота сопла.

Диаметр входа расширяющейся камеры смешения будет:

$$D_2 = \frac{2H_p - 2h + D_1 \operatorname{ctg} \gamma + d_c \operatorname{ctg} \theta_n}{\operatorname{ctg} \theta_n + \operatorname{ctg} \gamma}, \quad (11)$$

где γ - угол конусности корпуса насоса.

Необходимый угол конусности корпуса находится из уравнения:

$$\operatorname{tg} \gamma = - \frac{D_1 \operatorname{ctg} \theta_a}{2b} \pm \frac{\operatorname{ctg} \theta_a}{2b} \sqrt{D_1^2 + 4b(D_1 - b) \left(\frac{1}{\sin \theta_a} - 1 \right)} \quad (12)$$

Ширину диафрагмы " b " приблизительно можно найти из

$$b = \frac{D_1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{D_1^2 (1 - \varphi) + \varphi d_c^2}, \quad (13)$$

коэффициент φ принимается равным: $\varphi = 0,2 \div 0,35$

Углы наклона угловой области θ_n и θ_a , которые зависят от рода рабочей жидкости, подводимой к кипятильнику мощности и давления пара в окружающем пространстве, определяются из уравнений газовой динамики.

Расстояние от высоковакуумного до последующего сопла H_{I-II} в значительной степени оказывает влияние на длину струи и на плотность пара в зоне эффективной диффузионной диафрагмы. Уменьшение H_{I-II} ведёт к уменьшению длины струи, "активной" части угловой области и к уплотнению пара в зоне эффективной диафрагмы, а, следовательно, и к снижению скорости действия насоса S . Увеличение H_{I-II} приводит, наоборот, к рассеиванию струи и снижению плотности пара в зоне " b ", что ведёт к возрастанию обратного потока газа со стороны предварительного разрежения. Это в свою очередь также приводит к уменьшению скорости действия насоса.

Таким образом, последующую ступень насоса необходимо устанавливать в районе оптимальной эффективной диффузионной диафрагмы с целью получения максимальной S .

Расстояние между соплами будет:

$$H_{I-II} = \frac{(D_1 - d_c - 2b) \operatorname{ctg} \theta_a}{2} \quad (14)$$

На основании теоретических исследований установлено, что за счёт расширения камеры смещения можно повысить скорость действия насоса в 2 + 3 раза при неизменных энергозатратах и количестве рабочей жидкости, а также увеличить удельную скорость действия на единицу площади входа за счёт роста

"активной" части угловой области струи, и тем самым повысить эффективность использования диффузионных насосов.

Разработана методика предварительного расчёта диффузионных насосов с расширяющейся камерой смешения.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния геометрических параметров входной расширяющейся камеры смешения диффузионных насосов на их откачные характеристики.

В работе приведено описание экспериментального стенда, предназначенного для исследований диффузионных вакуумных насосов. Стенд состоит из диффузионного насоса, форвакуумной линии, включающей насос предварительного разрежения, с помощью которого на нагнетании диффузионного насоса обеспечивались необходимые откачные параметры, и измерительной аппаратуры. Стенд позволяет определять основные характеристики диффузионного насоса: предельный вакуум, быстроту действия, наибольшее выпускное давление и подводимую мощность.

Для исследований был изготовлен специальный насос с развѐнным корпусом /при диаметре кипятильника $d_k = D_1 = 160\text{мм}$ /, позволяющем менять расширяющуюся часть корпуса камерами с другими конструктивными размерами. Съёмные камеры были изготовлены из нержавеющей стали марки У18Н10Т и имели автономный емеевик охлаждения. Диаметр высоковакуумного сопла изменялся в пределах от 60мм до 120мм при постоянной его высоте $h = 30\text{мм}$, угле наклона тарели $\alpha = 70^\circ$ и критическом его сечении - 1,6мм. Диаметр входа в насос D_2 изменялся от 160мм до 260мм, высота расширяющейся камеры смешения H_p - от 0 до 280мм, угол конусности корпуса γ - от 15° до 45° , расстояние от высоковакуумного до последующего сопла $H_{г-г}$ - от 120мм до 175мм. Кроме того, исследовалось влияние угла наклона тарели высоковакуумного сопла на быстроту действия насоса при значениях диаметра входа 180мм и 250мм. Угол наклона тарели изменялся от 50° до 80° .

Проведено экспериментальное исследование по влиянию формы паропровода и тарели последующего сопла на быстроту действия насоса. Подтверждено высказанное предположение о наличии

уплотнения струи по её сечению.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что эффективность работы диффузионных насосов с расширяющейся камерой смешения в значительной степени зависит от диаметра входа в насос D_2 , диаметра высоковакуумного сопла d_c , высоты расширяющейся камеры смешения H_p , угла конусности корпуса γ , расстояния между высоковакуумным соплом и последующим соплом и от угла наклона тарели сопла.

Увеличение диаметра входа D_2 от 160 до 190 мм привело к росту быстроты действия насоса S в 1,8-1,9 раза, после чего дальнейшего роста S при изменении D_2 от 190 до 260 мм не происходило. Очевидно, что для этого сопла $d_c = 60$ мм диаметр входа $D_2 = 190$ мм является оптимальным. Аналогичные зависимости были получены и для сопел $d_c = 90$ мм и $d_c = 120$ мм, для которых оптимальными будут диаметры $D_2 = 220 + 235$ мм и $D_2 = 250 + 260$ мм соответственно, т.е. изменение диаметра высоковакуумного сопла требует для своей оптимальной работы соответствующего изменения диаметра входа расширяющейся камеры смешения. Увеличение быстроты действия и удельной быстроты действия на единицу площади входа насоса происходит только до диаметра входа расширяющейся камеры смешения, оптимального для работы каждого определённого сопла.

Увеличение диаметра корпуса выше оптимального не приводит к повышению быстроты действия насоса, но и не уменьшает её, хотя удельные характеристики ухудшаются.

Для каждого диаметра кипятильника и подводимой к нему мощности существуют оптимальные размеры высоковакуумного сопла и диаметр входа в насос, которые дают максимальные значения быстроты действия, удельной быстроты действия на единицу площади входа и удельной быстроты действия на единицу подводимой мощности. Так для диаметра кипятильника $d_k = 160$ мм оптимальными являются: диаметр сопла $d_c = 90$ мм и диаметр расширяющейся части корпуса $D_2 = 220 - 235$ мм. При этом быстрота действия насоса увеличивается по сравнению с насосом, имеющим цилиндрический корпус, в 2 - 3 раза, удельная быстрота действия на единицу площади входа в 1,5 + 1,7 раза, а удельная быстрота действия на единицу подводимой мощности - в 2 + 2,5 раза.

Изменение высоты расширяющегося корпуса H_p от 0 до 280 мм показал, что быстрота действия насоса начинает расти с $H_p = 120$ мм до $H_p = 250$ мм, а затем постепенно снижается.

В результате экспериментов было выявлено, что для диффузионных насосов с расширяющейся камерой смешения оптимальный угол конусности корпуса будет $20 \pm 25^\circ$, а угол наклона тарели сопла - $60 \pm 70^\circ$.

Проведенные эксперименты подтвердили предположение о значительном влиянии объема угловой области струи пара рабочей жидкости на быстроту действия насоса. Так во всех случаях S росла при увеличении размеров угловой области струи и не изменялась при её постоянных значениях.

Определено соотношение между расстоянием до последующего сопла и диаметром высоковакуумного сопла: $H_p/d_c = 2,0 \pm 2,4$.

Предлагается эффективность работы насоса оценивать через термодинамический к.п.д. - η :

$$\eta = K \cdot \bar{S}_n \ln p_{н.в.}/p_{вн.}, \quad (15)$$

где K - постоянная для конкретного газа величина;
 $\bar{S}_n$ - удельная быстрота действия насоса на единицу подводимой мощности;
 $p_{н.в.}$ - наибольшее выпускное давление;
 $p_{вн.}$ - впускное давление.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали достаточную точность теоретических расчётов и формул предложенной методики предварительного расчёта геометрических параметров расширяющейся камеры смешения. Максимальное расхождение не превышает 15%.

В четвёртой главе представлены математическое планирование экспериментов и результаты проверки экспериментальных исследований в производственных условиях.

С целью дальнейшей проверки теоретических предположений, а также вывода более простых соотношений, удобных для использования непосредственно в производственных условиях, воспользовались математическим планированием эксперимента, на основании которого найдены зависимости между основными откачными

характеристиками и геометрическими размерами входной камеры смещения.

Проверка результатов экспериментальных исследований проводилась на модернизированных серийно выпускаемых диффузионных насосах Н-2К и Н-5К. Испытания показали, что быстрота действия насоса возросла в 2 - 2,5 раза, удельная быстрота действия на единицу площади входа - примерно в 1,5 раза, удельная быстрота действия на единицу подводимой мощности и термодинамический к.п.д. в 2 + 3 раза.

Кроме того, рекомендации, полученные в работе, учтены при проектировании и изготовлении насоса марки Н-10К на быстроту действия 10000 л/с.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана теоретическая модель процесса откачки в диффузионном вакуумном насосе с расширяющейся камерой смещения, на основании которой получены зависимости для определения основных геометрических параметров входной камеры смещения.

2. Разработана методика расчета диффузионных насосов с расширяющейся камерой смещения.

3. Теоретически и экспериментально установлено, что применение расширяющейся камеры смещения на входе в диффузионный насос позволяет повысить эффективность его работы: увеличить удельную быстроту действия на единицу площади входа в 1,5 - 1,7 раза, а удельную быстроту действия на единицу мощности - в 2,0 - 2,5 раза.

4. На основании проведенных исследований влияния геометрических параметров входной расширяющейся камеры смещения на откачные характеристики диффузионных насосов установлено, что:

а/ увеличение диаметра входа D_2 до некоторой оптимальной величины D_{2opt} приводит к росту быстроты действия насоса S , а также удельной быстроты действия на единицу площади входа $\bar{S}$ за счет возрастания "активной" части угловой области струи пара рабочей жидкости. При дальнейшем увеличении D_2 ($D_2 > D_{2opt}$) возрастания быстроты действия не происходит, так как размеры

угловой области не изменяются. Рабочий диапазон давлений при постоянной эффективной диффузионной диафрагме при увеличении D_2 не изменяется. Рекомендуется соотношение диаметров расширяющейся части корпуса D_2 и цилиндрической части корпуса D_1 — $D_2/D_1 = 1,5 + 1,56$, а соотношение диаметра расширяющейся части корпуса с диаметром d_c высоковакуумного сопла — $D_2/d_c = 2,8 + 3,1$;

б/ увеличение высоту камеры смещения H_p вызывает соответствующее увеличение угловой области струи пара рабочей жидкости, что ведет к повышению быстроты действия насоса до тех пор, пока не нарушается оптимальная эффективная диафрагма δ . Дальнейшее увеличение H_p ($H_p > H_{p_{opt}}$) приводит к изменению δ и, как следствие, к нарушению оптимального соотношения между прямой и обратной диффузией газа, что в свою очередь ведет к уменьшению S и рабочего диапазона давлений ($p_1 + p_2$). Рекомендуемое соотношение высоты камеры смещения к диаметру высоковакуумного сопла d_c — $H_p/d_c = 2,8 + 3,5$;

в/ угол конусности корпуса γ оказывает влияние на размер "активной" части угловой области струи и на ширину эффективной диффузионной диафрагмы. Оптимальное значение $\gamma = 20^\circ + 25^\circ$;

г/ угол наклона тарели высоковакуумного сопла оказывает влияние на размеры угловой области струи пара рабочей жидкости. Максимальная быстрота действия насоса, удельная быстрота действия на единицу площади входа и удельная быстрота действия на единицу мощности достигается при $\alpha = 60^\circ + 70^\circ$;

д/ расстояние между высоковакуумным и последующим соплами $H_{г-г}$ влияет на длину струи пара рабочей жидкости и на плотность ее в зоне эффективной диффузионной диафрагмы. Уменьшение $H_{г-г}$ ($H_{г-г} < H_{г-г_{opt}}$) ведет к снижению быстроты действия насоса из-за сокращения размеров угловой области струи, а увеличение $H_{г-г}$ ($H_{г-г} > H_{г-г_{opt}}$) сначала к уменьшению диапазона рабочих давлений из-за малой плотности пара в зоне эффективной диффузионной диафрагмы, а затем и к снижению S из-за нарушения соотношения между прямым и обратным потоками газа. При соотношении $H_{г-г}/d_c = 2,0 + 2,4$ насос обладает сравнительно высокой быстротой действия в широком диапазоне рабочих давлений.

5. Предложен критерий оценки эффективности работы диффузионных насосов с расширяющейся камерой смещения по удельной скорости действия на единицу мощности $\bar{S}_N = S/N$ и, выраженный через него, термодинамический коэффициент полезного действия - $\eta = k \bar{S}_N \ln p_{н.к}/p_{в.к}$.

6. С помощью математического планирования экспериментов установлена связь между конструктивными параметрами расширяющейся камеры смещения и откачными характеристиками насоса: скоростью действия и рабочим диапазоном давлений.

7. Достоверность полученных теоретических формул подтверждена экспериментально в лабораторных и производственных условиях. Максимальное расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает 15%.

8. На основании проведенных исследований были разработаны, изготовлены, прошли промышленные испытания и внедрены в серию диффузионные насосы с расширяющейся камерой смещения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Абакумова Н.В., Минайчев В.Е. "Возможности повышения скорости действия диффузионных насосов", деп. №457, Библиографический указатель ВИНТИ "Депонированные рукописи", №11, 1978, стр.88.

2. Абакумова Н.В. "Об оценке эффективности работы диффузионных насосов", деп. №458, Библиографический указатель ВИНТИ "Депонированные рукописи", № 11, 1978, стр.88.