1554317

На правах рукописи

УДК 621.52

Калинкин Дмитрий Анатольевич

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФФУЗИОННЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

05.04.06. Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 1997

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор К.Е.Демихов

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат.наук, профессор М.И.Киселев, кандидат технических наук, Ю.Г.Ромочкин

Ведущая организация: ГосНИИ вакуумной техники

кого

Защита д 7г. в 14 час. на заседании в Московском государств аумана по адресу: 1070055, г. шиностроение"

С диссерта .

Отзывы в д : 107005, Москва, 2-я Бауман Авторефера

Ученый сек диссертацио кандидат те .Козлов

Подп. к печ Тир. 100 экз. Типография

1554317

НТБ МГТУ им.Н.Э.
1554317
Калинкин Д.А. Мо

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие энергетики, металлургии, машиностроения, авиастроения, электроники тесно связано с состоянием вакуумной техники. В условиях совершенствования технологии и дорожания энергетических ресурсов, возрастания требований к удельным энергетическим, массогабаритным характеристикам насосов и их стоимости для получения и поддержания высокого и сверхвысокого вакуума наряду с другими средствами откачки успешно используются паромасляные диффузионные насосы. Они просты по конструкции, надежны в работе, имеют практически неограниченный срок службы, хорошо откачивают различные газы и пары, химически не взаимодействующие с рабочей жидкостью, имеют сравнительно невысокую стоимость изготовления и эксплуатации, у них нет собственных источников шума, вибраций, магнитных и электростатических полей. Однако, они являются источником "загрязнения" откачиваемого объема парами рабочей жидкости. В связи с этим важное значение приобретают вопросы совершенствования диффузионных насосов.

1554317

Развитие теории струйных вакуумных насосов вышло за рамки одномерных диффузионных моделей, что позволило улучшить откачные параметры за счет изменения конструкции одноступенчатой камеры смешения. Однако используемые в этих моделях допущения затрудняют применение результатов исследований к совершенствованию многоступенчатых диффузионных паромасляных насосов. Поэтому большое значение приобретают вопросы разработки математической модели рабочих процессов, проходящих в откачной полости и методов расчета откачных характеристик с целью снижения затрат и сокращения сроков создания насосов.

Цель работы

Повышение эффективности работы диффузионных вакуумных насосов и улучшение их откачных параметров.

Научная новизна

— предложена математическая модель взаимодействия разреженных потоков молекул пара и газа в проточной части диффузионного вакуумного насоса известной геометрии, позволяющая рассчитать величины быстроты действия и обратного потока пара при условии неполной его конденсации на охлаждаемой поверхности корпуса, известных термодинамических

параметрах пара и газа в паропроводе и на входе и выходе из проточной части;

— с помощью разработанной модели получены законы изменения концентрации пара и газа в проточной части насоса;

— теоретически определено влияние формы откачной полости на величины быстроты действия и обратного потока паров рабочей жидкости.

Практическая ценность

— разработанная методика расчета позволила выявить резервы для улучшения параметров откачки существующих насосов, отказаться от дорогостоящих экспериментальных исследований, повысить эффективность проектирования новых конструкций и сократить сроки их разработки;

— разработаны алгоритм и программа расчета быстроты действия и обратного потока паров рабочей жидкости в ступенях насосов с различными конструкциями откачной полости;

— получены практические рекомендации по конструированию проточной части и выбору формы полости насоса, позволяющие увеличить быстроту действия на 18% и снизить обратный поток пара на 30% по сравнению с существующими конструкциями.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на III Минском Международном форуме по тепломассообмену (Минск, 1996г), на научно-технических семинарах кафедры "Вакуумная техника энергофизических установок" МГТУ им.Н.Э.Баумана (Москва, 1995,1996г.), представлены на научно-технических конференциях "Вакуумная наука и техника" (Гурзуф 1995, 1996 гг.; Казань 1996 г).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 5 работ, составлено три научно-технических отчета.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. По объему работа состоит из 104 страниц текста, 48 рисунков, 5 таблиц, библиография насчитывает 135 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемого вопроса, сформулированы цели, научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проведен анализ технических решений и теоретических разработок исследователей, посвященных разработке диффузионных вакуумных насосов и определены пути улучшения параметров откачки:

— снижение обратного потока паров рабочей жидкости достигается путем установления дополнительных устройств в проточной части;
— увеличение быстроты действия достигается путем изменения конструкции паропровода и интенсификации теплообмена на поверхности охлаждаемой стенки корпуса насоса;
— снижение потребляемой энергии достигается путем совершенствования системы подготовки пара в кипятильнике.

Проведен анализ основных математических моделей процессов, протекающих в откачной полости диффузионных насосов. По принципу построения их можно разделить на две группы, к одной из которых относятся модели, использующие уравнение баланса потоков и описывающие процесс стационарной диффузии газа в струю пара, к другой — модели, основу которых составляет кинетическое уравнение движения разреженной среды. Обнаружена тенденция развития моделей второй группы, использующих при имитации течения разреженных газов метод статистических испытаний, успешно зарекомендовавший себя в качестве средства расчета элементов вакуумных систем. Проведен анализ результатов исследований взаимодействия разреженных пара и газа с целью выявления источников обратных потоков и путей улучшения параметров откачки. Из обзора приведенных работ следует, что развитие теоретического описания процесса откачки вышло за рамки одномерных диффузионных моделей, но рассматриваемые физические модели имеют одноступенчатую конструкцию. Это затрудняет применение результатов исследований к реальным многоступенчатым насосам.

Существующие методы расчета параметров откачки к настоящему времени получили большое развитие, но, вместе с тем, работа по созданию единого подхода к описанию процесса взаимодействия разреженных пара и газа, удобного для описания многоступенчатых конструкций и проведения их оптимизационных расчетов, еще далека от завершения.

Задачами настоящего исследования являются:

1. создание математической модели процессов расширения сверхзвуковой струи паров рабочей жидкости в вакуум, взаимодействия пара и откачиваемого газа в рабочей полости диффузионного насоса с единых позиций молекулярно-кинетической теории;
2. исследование процесса взаимодействия откачиваемого газа с расширяющейся струей пара в откачной полости диффузионного вакуумного насоса;
3. исследование влияния геометрии проточной части на величину обратного потока паров рабочей жидкости и быстроту действия диффузионного вакуумного насоса.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию взаимодействия пара и газа в ступени диффузионного вакуумного насоса, на основе положений молекулярно-кинетической теории.

Основные допущения:

1.Режим течения откачиваемого газа во внутренней полости диффузионного вакуумного насоса — молекулярный.

2.Молекулы рассматриваются как частицы со сферической поверхностью.

3.Рассматриваются только парные столкновения.

4.Столкновения определяются как мгновенные события, а движение частиц между столкновениями считается независимым.

5.Структура струи пара сохраняется после взаимодействия молекул откачивающего пара с молекулами откачиваемого газа.

Основу математической модели процесса взаимодействия разреженных пара и газа составляет кинетическое уравнение Больцмана, записанное для двухкомпонентной смеси в виде

$$\frac{\partial(nf)_1}{\partial t}+\frac{\partial(nf)_2}{\partial t}+C_{r1}\frac{\partial(nf)_1}{\partial r}+C_{r2}\frac{\partial(nf)_2}{\partial r}=I_{11}+I_{12}+I_{21}+I_{22},$$

где $n=N/dV$ — концентрация $N$ молекул в объеме $dV$, $f=dN/(N\cdot dc)$ — функция распределения частиц газа и пара по интервалам скоростей dc, $C_r$ — проекция вектора скорости на направление пространственной координаты $r$; $I_{11}$ — интеграл столкновений частиц откачиваемого газа (при молекулярном режиме течения $I_{11}=0$), $I_{12}$, $I_{21}$ — интегралы столкновений частиц пара и газа, $I_{22}$ — интеграл столкновений частиц откачивающего пара между собой (индекс 1 отно-

сится к газу, а 2 — к пару). Реализация задачи сводится к нахождению решения кинетического уравнения с известными начальными и граничными условиями.

Откачная полость вакуумного насоса рассматривается в осесимметричной системе координат, ось X которой совпадает с осью насоса, а ось Y перпендикулярна ей в плоскости среза входного патрубка. Область течения газов $\Omega$, ограниченная поверхностью корпуса $\Gamma_1$, поверхностью паропровода насоса $\Gamma_2$, плоскостью входного сечения насоса $\Gamma_3$, поверхностью выходного сечения $\Gamma_4$, плоскостью среза зонтичного сопла $\Gamma_5$, представлена на рис.1.

Начальные условия:

—откачиваемый газ (s=1) находится в равновесном состоянии

$$F_1(0,x,c) = n_1(x)\cdot f_{10}(c), \quad x \in \Omega, \ -\infty < c < +\infty;$$

—разреженный пар (s=2) находится в состоянии, соответствующем истечению из сферического точечного источника через кольцевую диафрагму со скоростью потока на срезе сопла $c_0$, определяемой параметрами пара перед соплом и геометрией сопла

$$F_2(0,x,c) = n_2(x)\cdot f_2(c'), \quad x \in \Omega' \subset \Omega, \ -\infty < c < +\infty, \ c' = c + c_0.$$

Аналитически задается уравнение границы проточной части

$A(x,y,z)=0, \qquad (x,y,z) \in \Gamma$

Граничные условия в общем виде определяются выражением

$$F_s(t,x,c) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(c\cdot c_1)\cdot F_s(t,x,c_1)\cdot dc_1, \quad x \in \Gamma$$

Взаимодействие молекул с ограничивающими поверхностями описывается законом косинуса. Поток молекул $s$-ого газа с $i$-той поверхности имеет максвелловское распределение по скоростям в потоке, движущемся со скоростью $U_s(u_{xs}, u_{ys}, 0)$

$$f_{wis} = n_{wis}\cdot\left(\frac{m_s}{2\cdot\pi\cdot\kappa\cdot T_{wi}}\right)^{3/2}\cdot\exp\left(-\frac{m_s[(v_{xs}-u_{xs})^2+(v_{ys}-u_{ys})^2+v_{zs}^2]}{2\cdot\kappa\cdot T_{wi}}\right)$$

где $n_{wis}, T_{wi}$ — концентрация и температура газа на стенке. На поверхности корпуса насоса и паропровода $u_{xs}=0$, $u_{ys}=0$. Входящий поток откачиваемого газа находится в равновесном состоянии. Струя пара на срезе сопла считается изоэнтропийной, имеющей среднемассовую скорость $U_a(u_x, u_y, 0)$. При описании потока пара положение источника частиц задается минимальным и

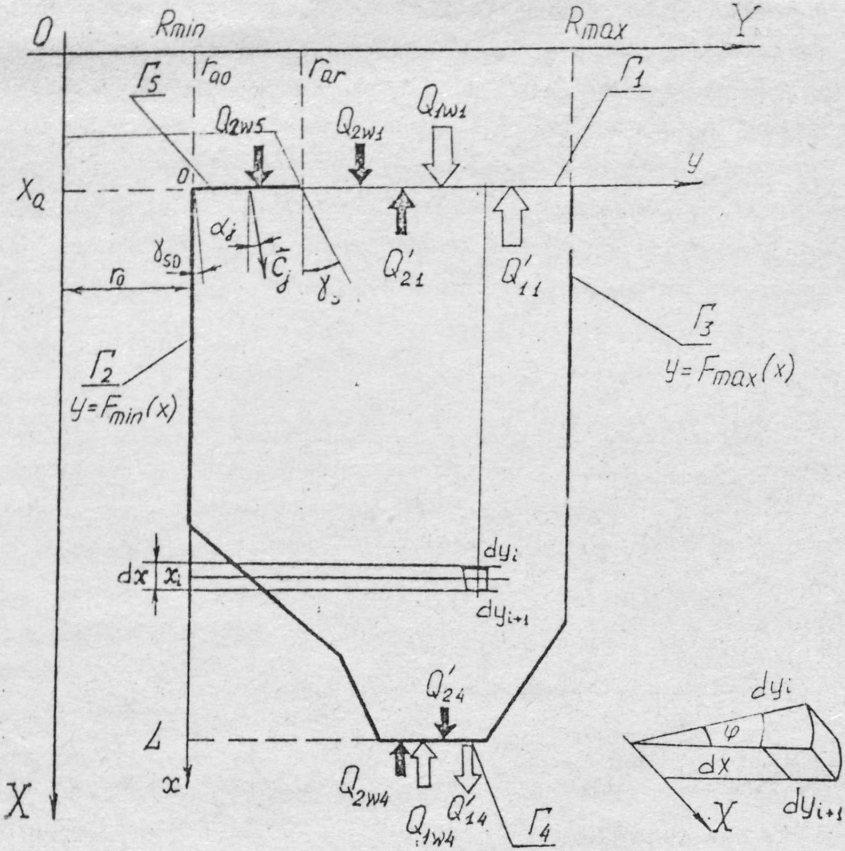


Рис.1. Схема откачной полости вакуумного насоса.

$r_0$ - радиус паропровода;

$L$, $R_{min}$, $R_{max}$ - длина, минимальный и максимальный радиальные размеры области;

$r_{a0}$, $r_{ar}$, $x_a$ - минимальный и максимальный радиусы среза сопла и его осевая координата;

$\gamma_{s0}$, $\gamma_s$ - полууглы раскрытия сопла на внутренней ($r_{a0}$) и внешней ($r_{ar}$) кромках соответственно;

$C_j$, $\alpha_j$ - вектор массовой скорости $j$-той частицы и угол между вектором $C_j$ и осью OX;

$F_{max}(x)$, $F_{min}(x)$ - аналитически заданные границы проточной части;

$x_i$, $y_i$ - координаты центра $i$-той ячейки;

$dx$, $dy_i$, $dy_{i+1}$, $\varphi$ - линейные и угловой размеры, $i$- ой ячейки.

максимальным радиусами среза сопла $r_{a0}$ и $r_{ar}$, и углами наклона внутреннего и наружного зонта сопла $\gamma_{s0}$ и $\gamma_s$. Концентрация частиц на срезе сопла постоянна, n=const. При взаимодействии с охлаждаемой стенкой пар, в зависимости от энергии его молекул $E_s$, частично конденсируется.

Поток частиц газа и пара с поверхности

$$Q_i = Q_i' \cdot \beta_i + Q_{wi},$$

где $Q_i'$ — поток частиц, падающих на $i$-ю поверхность с нормалью $\boldsymbol{m}$

$$Q_i = n \cdot \int_{(v,m)<0} f(v) \cdot dv,$$

$\beta_i$ — коэффициент поглощения частиц $\boldsymbol{p}$ на i-ой поверхности,

$$\beta_i = (N_i)^{-1} \cdot \sum_1^{N_i} g(E_p),$$

для молекул пара на поверхностях паропровода коэффициент β=1,

$Q_{wi}$ — поток частиц через i-ю поверхность в откачиваемую полость,

$$Q_{wi} = n_w \cdot \int_{(v,m)>0} f_w(v) \cdot dv.$$

На рабочем режиме в полости насоса сохраняется баланс входящих и выходящих потоков молекул газа (s=1) и пара (s=2), (рис.1)

$$Q_{S\,w1} + Q_{S\,w4} = Q'_{S\,1} + Q'_{S\,4}, \qquad s=1,$$

$$Q_{S\,w5} + Q_{S\,w1} + Q_{S\,w4} = Q'_{S\,1} + Q'_{S\,4}, \qquad s=2,$$

При рассмотрении полости высоковакуумной ступени диффузионного насоса предполагается, что поток молекул рабочей жидкости из откачиваемого объема отсутствует: $Q_{S\,w1}=0$, s=2 .

При определении макропараметров проводилось усреднение текущих значений по ансамблю частиц и по времени процесса. В результате расчета в каждой j-ой ячейке определялись удельные значения концентрации и температуры пара и газа: $n_j/n_{0j} = \int f_j \cdot dc$, $T_j/T_{0j} = \frac{1}{3}\int f_j \cdot c^2 \cdot dc$.

Быстрота действия определяется из известного уравнения:

$$S = \frac{v_a}{4} \cdot k \cdot F,$$

где $v_a$ — средняя арифметическая скорость теплового движения молекул откачиваемого газа, $F$ — площадь входной диафрагмы; $k$ — коэффициент

откачки потока молекул газа, характеризующий относительную величину откачиваемого потока (рис.1)

$$k = \frac{Q_{sw1} - Q'_{s1}}{Q_{sw1}},$$

здесь $Q_{Sw1}$ — число частиц, попадающих во входное сечение всасывающего патрубка насоса), $Q'_{S1}$ — число частиц обратного потока, проходящих за это же время через всасывающий патрубок насоса.

Относительная величина обратного потока паров рабочей жидкости определяется как отношение обратного потока молекул, попавших на срез всасывающего патрубка $Q'_{S1}$, к величине потока молекул $Q_{Sw5}$, входящего в откачную полость через высоковакуумное сопло:

$$q_s = \frac{Q'_{s1}}{Q_{sw1}}, \quad s = 1, \qquad q_s = \frac{Q'_{s1}}{Q_{sw5}}, \quad s = 2.$$

Столкновение частиц пары m на интервале времени $\Delta t$ рассчитывается с вероятностью $P_m=\omega_m \cdot \Delta t$, в соответствии с условной частотой столкновений при фиксированной относительной скорости частиц. Автором разработана программа расчета быстроты действия и обратного потока пара в диффузионном вакуумном насосе, позволяющая определить параметры течения пара и газа в откачной полости одной или нескольких ступеней насоса при условии сохранения молекулярного режима течения откачиваемого газа и исследовать влияние изменения геометрии проточной части диффузионного насоса на эффективность его работы.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований многоступенчатых диффузионных вакуумных насосов на различных режимах работы. Определение быстроты действия насоса проводится методом постоянного давления.

Установлено, что за равные промежутки времени после начала работы в фиксированном диапазоне давлений ($10^{-3}$-$10^{-4}$ Па) перекрывание потока пара из первой ступени приводит к снижению быстроты действия на 55% , из второй — на 40%, из второй и третьей — на 62%. Профилирование поверхности паропровода перед соплом второй ступени, при неизменных параметрах пара в соплах ступеней, теоретически приводит к увеличению быстроты действия насоса на величину, находящуюся в пределах погрешности измерений.

Для проверки достоверности расчетов по предложенной модели проведено сравнение экспериментальных и теоретических значений быстроты действия, которые в диапазоне рабочих давлений насоса расходятся не более чем на 10%.

При сниженной мощности нагревателя определялась быстрота действия насоса на различных режимах его работы. Экспериментальные и соответствующие им расчетные данные представлены в табл.1.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения быстроты действия насоса S при работе нескольких ступеней и мощности нагревателя N=0,5 кВт.

| Номера работающих ступеней | $S_{расч}$, $м^3/с$ | $S_{эксп}$, $м^3/с$ | $E_s$, % |
|---|---|---|---|
| I II III IV | 0,80 | 0,76 | 5 |
| II III IV | 0,38 | 0,36 | 6 |
| I III IV | 0,48 | 0,44 | 9 |
| I IV | 0,30 | 0,24 | 25 |

Максимальное расхождение между ними наблюдается в случае повышенных давлений при больших значениях обратных потоков, приходящихся на одну ступень, и составляет 25%.

При сравнении расчетных и экспериментальных данных были использованы результаты $S_{эксп}^{*}$ совместных исследований диффузионных вакуумных насосов, проводимых сотрудниками МГТУ им.Н.Э.Баумана и НИИ ВТ им.С.А.Векшинского , представленные в табл.2.

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения быстроты действия насоса S при различном числе работающих ступеней.

| Номера работающих ступеней | $S_{расч}$, $м^3/с$ | $S_{эксп}^{*}$, $м^3/с$ | $E_s$, % |
|---|---|---|---|
| I II III IV | 1,70 | 1,60 | 6 |
| II III IV | 0,63 | 0,55 | 14 |
| III IV | 0,25 | 0,20 | 25 |
| IV | 0,10 | 0,08 | 25 |

Увеличение погрешности в определении быстроты действия при расчете форвакуумных ступеней связано с нарушением свободномолекулярного режима

течения разреженных пара и газа. По результатам сравнений сделан вывод о работоспособности предложенной модели для расчетов быстроты действия диффузионных насосов с различными конструкциями проточной части.

В четвертой главе рассмотрены результаты теоретического исследования взаимодействия разреженных потоков молекул пара и газа, полученные методом прямого численного моделирования частиц в ячейках. С помощью разработанной модели исследованы влияние плотности потока пара на коэффициент откачки, распределение концентраций пара и газа в рабочей полости высоковакуумной ступени насоса,. На рис.2 представлены результаты расчета концентраций пара и газа во всасывающей полости диффузионного вакуумного насоса и удельных обратных потоков Q пара и газа на срезе его входного патрубка. Распределение концентраций газа показывает, что наиболее эффективно процесс захвата и переноса молекул откачиваемого газа происходит в области струи, которая граничит с областью высокого вакуума и характеризуется понижением концентрации пара относительно значения на срезе сопла в 3-4 раза. Основной поток молекул газа проникает в угловую область струи и переносится ею к охлаждаемой стенке, вблизи которой концентрация молекул газа повышается. Часть из них перемещается из области конденсации пара в сторону откачиваемого объема. Величина обратного потока из зоны конденсации зависит от угла наклона стенки корпуса к оси насоса. Максимального значения удельные обратные потоки газа и пара на срезе входного патрубка достигают вблизи охлаждаемой стенки корпуса (рис.2).

Исследование влияния геометрических параметров проточной части на параметры откачки проводится методом статистических испытаний с использованием описанной в главе 2 математической модели. Теоретически исследовано влияние геометрии проточной части в области первой и второй ступеней на величины быстроты действия и обратного потока паров рабочей жидкости. Увеличение диаметра цилиндрической камеры смешения более чем в 1.12 раза приводит к незначительному (в пределах 3%) увеличению быстроты действия и резкому (в 4 раза и более) повышению обратного потока пара. Изменение углов наклона стенок корпуса к оси насоса от 20° до 40° в области расширения корпуса от всасывающего патрубка и его сужение вблизи зонта сопла втс й и третьей ступеней позволяет, не снижая быстроту действия, уменьшить обратный поток в 2 раза по сравнению с аналогичным в насосе с цилиндрическим корпусом.

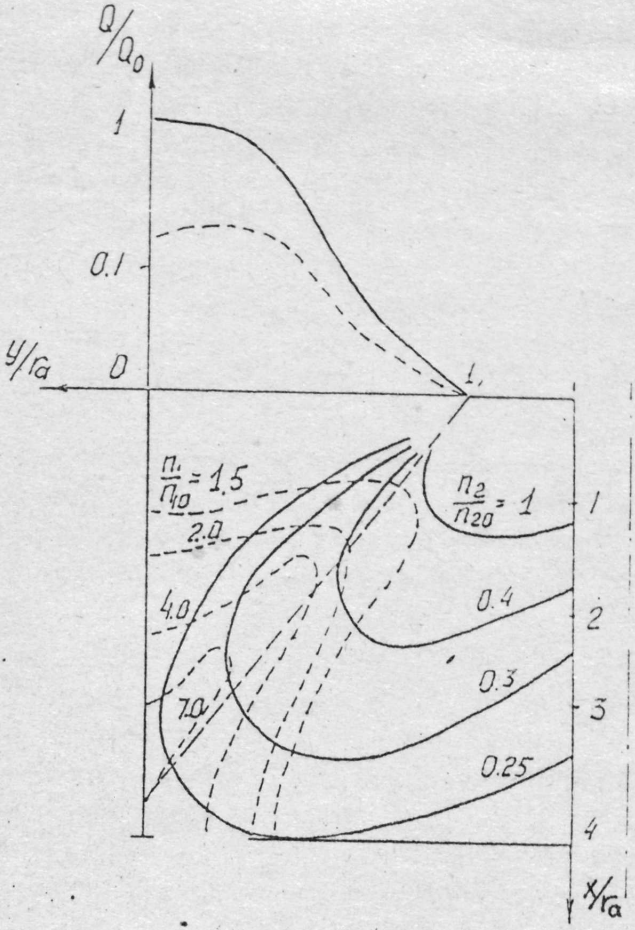


Рис.2. Распределение концентраций молекул пара и газа во всасывающей полости и обратных потоков пара и газа на срезе входного патрубка диффузионного вакуумного насоса.

$n_{10}$ - концентрация молекул газа на входе в полость насоса;

$n_{20}$ - концентрация молекул пара на срезе сопла;

$Q_0$ - величина обратного потока на оси насоса.

_ _ _ - изолинии концентраций ($n_{20}$ / $n_{20}$) и обратного потока $Q_2$ молекул газа;

____ - изолинии концентраций ($n_1$ / $n_{10}$) и обратного потока $Q_1$ молекул пара.

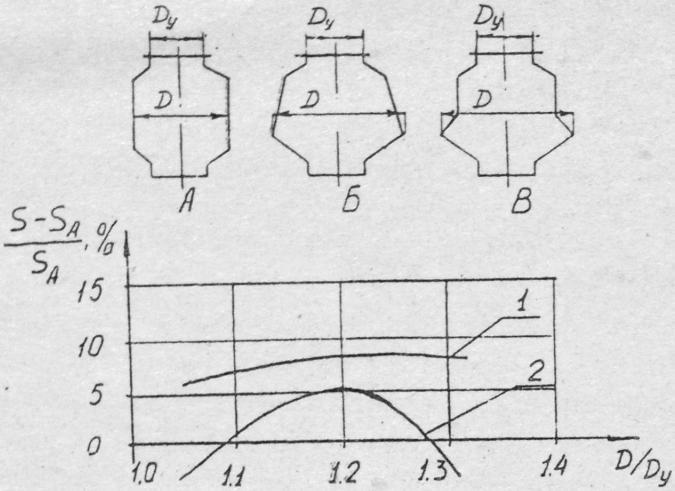


Рис.3. Зависимость относительной величины быстроты действия насосов с различными конструкциями корпусов от диаметра корпуса
1- $S=S_Б$; 2 - $S=S_В$.

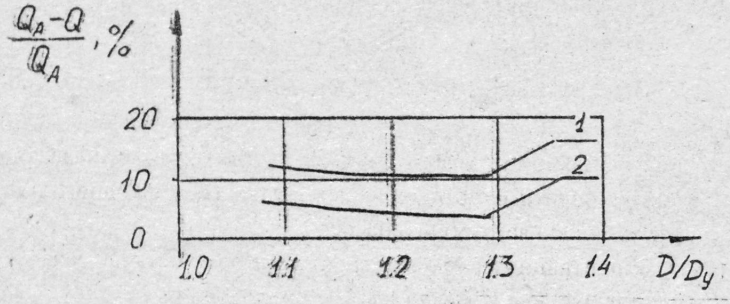


Рис.4. Зависимость относительной величины обратных потоков паров рабочей жидкости из насосов с различными конструкциями корпусов от диаметра корпуса
1- $Q=Q_Б$; 2 - $Q=Q_В$;

В данной работе получена зависимость быстроты действия насосов с различными конструкциями корпусов от относительной величины диаметра корпуса насоса (рис.3), соответствующего схеме А. Видно, что в диапазоне изменения относительного диаметра от 1.10 до 1.25 использование конической расширяющейся в направлении откачки формы корпуса в области первых двух высоковакуумных ступеней приводит к повышению быстроты действия на величину от 3% до 8%. Зависимость относительной величины разницы обратных потоков паров рабочей жидкости из насосов с различными конструкциями корпусов от относительной величины диаметра корпуса представлена на рис.4. В диапазоне $1.1<D/D_y<1.3$ схема В дает уменьшение потока пара на 4-6%, а Б — на 10-12% , по сравнению с насосом с цилиндрическими корпусом.

Сравнение эффективности работы насосов, отличающихся формой корпуса, при увеличении максимальных диаметров их корпусов показывает, что при одинаковых габаритных размерах в расширяющемся от всасывающего патрубка корпусе обратные потоки пара и газа меньше по сравнению с потоками из насосов перечисленных конструкций.

Сравнение результатов расчетов конкретных конструкций насосов по предложенной методике показало, что увеличение диаметра условного прохода на 5% при сохранении профиля стенок корпуса, практически не влияет на результаты сравнительного анализа.

Таким образом, из рассмотренных насосов с различными формами корпуса наибольшую быстроту действия обеспечивает насос с корпусом формы Б (рис.3) и углами $5°<\alpha_1<30°$ и $30°<\alpha_3<50°$. Это позволяет увеличить быстроту действия насоса на 18% для $D_y$=250 мм и 15% для $D_y$=400 мм и $D_y$=500 мм, и снизить обратный поток пара на величину до 30% при неполной конденсации паров на охлаждаемой стенке.

## Основные выводы и итоги работы

1. Автором предложена математическая модель, описывающая основные процессы, протекающие в проточной части насоса: расширение струи рабочего тела в ограниченное пространство, заполненное разреженным газом; взаимодействие паров рабочего тела со стенками корпуса и паропровода с учетом неполной их конденсации; взаимодействие откачиваемого газа и пара в полости насоса.

2. Разработана методика расчета взаимодействия разреженных потоков рабочего тела и откачиваемого газа в ступени диффузионного вакуумного насоса; предложенная методика расчета относительных значений быстроты действия насоса при его работе на различных режимах показывает максимальное расхождение данных эксперимента и расчетов не более 25%.
3. Разработаны алгоритм и программа расчета быстроты действия, позволяющая определить распределение концентраций пара и газа и величины обратных потоков пара и газа в ступени диффузионного вакуумного насоса.
4. Проведен теоретический анализ процесса взаимодействия откачиваемого газа с расширяющейся струей пара в проточной части диффузионного вакуумного насоса, и в результате получено:
   — распределение концентраций откачиваемого газа по радиусу в сечении насоса между соплами соседних ступеней имеет характерную колоколообразную форму, что свидетельствует о наиболее интенсивном протекании процесса массопереноса в области расширяющейся струи пара, граничащей с высоким вакуумом;
   — наибольшего значения концентрация газа достигает в струе пара вблизи охлаждаемой стенки на выходе из ступени;
   — обратные потоки пара и газа достигают максимального значения на срезе входного патрубка у охлаждаемой стенки.

   Для уменьшения влияния обратного потока из области повышенной концентрации на откачные параметры насоса предложено изменить форму корпуса первых двух ступеней.
5. Проведено экспериментальное исследование работы диффузионного вакуумного насоса и установлено, что
   — в многоступенчатом насосе за равные промежутки времени после начала работы в фиксированном диапазоне давлений при перекрывании потока пара из сопел первых двух высоковакуумных ступеней быстрота действия снижается более чем на 50%;
   — математическая модель ступени насоса позволяет проводить исследование сравнительной эффективности работы многоступенчатых вакуумных насосов различных конструкций.
6. Проведено исследование влияния формы корпуса в области первой и второй высоковакуумных ступеней на величины быстроты действия и обратного потока паров рабочей жидкости. При полной конденсации паров рабочей

жидкости на охлаждаемой стенке, обратный поток не зависит от размеров и формы корпуса при неизменной геометрии паропровода и термодинамических параметрах пара. При неполной конденсации паров на стенках корпуса трехступенчатой конструкции к уменьшению обратных потоков пара и газа приводит применение расширяющегося от входного фланца конического корпуса. Рекомендованы размеры корпуса насоса, позволяющие увеличить быстроту действия на 18% и снизить величину обратного потока пара на 30%.

Публикации по теме диссертации:

1.Демихов К.Е., Калинкин Д.А.. Моделирование процессов взаимодействия потоков пара и газа в проточной части диффузионного вакуумного насоса //Вакуумная наука и техника (Вакуум-95): Тез.докл.МНТК.-Гурзуф.-1995.-С.153.

2.Демихов К.Е., Калинкин Д.А.. Моделирование процессов теплообмена и массопереноса при взаимодействии потока разреженного газа с недорасширенной струей пара // Труды III Минского Международного форума по тепломассообмену.- Минск, 1996.- Т.9. Вычислительный эксперимент в задачах теплообмена и теплопередачи. Ч.1.- С.84-87.

3.Демихов К.Е., Калинкин Д.А.. Исследование влияния конструктивных размеров на параметры откачки диффузионного вакуумного насоса. //Состояние и перспективы развития вакуумной техники (Вакуум-96): Тез. докл. МНТК.- Казань, 1996.- С.19.

4.Демихов К.Е., Калинкин Д.А.. Моделирование процесса откачки ступенью диффузионного вакуумного насоса //Изв. вузов. Машиностроение.- 1996.- № 7/9.- С.52-57.

5.Калинкин Д.А., Демихов К.Е., Смирнов Н.А. Исследование влияния конструктивных параметров на откачные параметры диффузионных вакуумных насосов.//Вакуумная наука и техника (Вакуум-96): Тез. докл. МНТК.- Гурзуф, 1996.- С.15.