М 334262

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

Игорь Николаевич ПЫЖОВ

Исследование работы турбомолекулярного вакуум-насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа

(05.04.06. – Вакуумная и компрессорная техника)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1978

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

Научный руководитель –
к.т.н., доцент Демихов К.Е.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Бекнев В.С.

к.т.н. Пустовойт Ю.М.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "15" сентября 1978 г.

Защита диссертации состоится "16" октября 1978 г. в 14[30] на заседании Совета факультета "Энергомашиностроение" МВТУ имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, I07005, Лефортовская наб., дом I, корпус факультета "Энергомашиностроение".

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ

Козлов В.Н.

М 334262

В программных документах XXУ съезда КПСС предусмотрено дальнейшее развитие таких отраслей промышленности, как электронная, атомная, радиотехническая, авиационная, металлургическая и других, в которых для осуществления технологических процессов, обеспечения работы оборудования и проведения различных исследований используется вакуумная техника.

Актуальность проблемы. В настоящее время одними из перспективных средств откачки являются турбомолекулярные вакуум-насосы (ТВН), имеющие практически постоянную быстроту откачки по различным газам в широком диапазоне давлений, не загрязняющие парами рабочего масла и продуктами его распада откачиваемый объем, имеющие сравнительно низкие значения предельного остаточного давления, надежные в эксплуатации. На Всесоюзной научно-технической конференции "Основные проблемы и направления создания вакуумного откачного оборудования", состоявшейся в Казани в 1976 г., среди основных направлений научно-исследовательских работ, поставлены кардинальные задачи по дальнейшему развитию исследований с целью повышения эффективности турбомолекулярных вакуум-насосов, в частности, за счет выбора оптимальных геометрических размеров проточной части на заданные откачные параметры, а также расширения рабочего диапазона в область повышенных давлений всасывания.

N1334262

Цель работы. Ухудшение откачной характеристики ТВН в области повышенных давлений всасывания имеет место при нарушении в проточной части насоса молекулярного режима течения газа, поэтому данная работа посвящена исследованию турбомолекулярного вакуум-насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа для расширения эффективного использования ТВН в откачных системах.

Научная новизна. Получены расчетные зависимости для определения основных параметров откачной характеристики рабочего колеса: максимальной быстроты откачки S_{max} и максимального отношения давлений τ_{max}. На основании теоретического и экспериментального исследований определено влияние геометрических параметров межлопаточных каналов, относительной окружной скорости и числа Кнудсена (K_n) на S_{max} и τ_{max}. Рассмотрены особенности определения откачной характеристики пакета рабочих колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. На ос-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1334262
Пыжов И.Н. Исследование ра

новании расчетных зависимостей установлена закономерность оптимального распределения геометрических параметров межлопаточных каналов по ступеням в пакете ТВН. Разработан метод расчета проточной части ТВН, позволяющий спроектировать ее с минимальными геометрическими размерами.

Методика исследований. Теоретический анализ зависимостей для определения откачных параметров проводился с помощью ЭВЦМ. При экспериментальном определении откачных параметров использовался метод постоянного давления.

Практическая ценность. Полученные в работе расчетные зависимости позволяют определить откачные параметры ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. На основании проведенного исследования по выявлению влияния геометрических параметров колес на откачную характеристику насоса определены практические рекомендации по конструированию проточной части насоса. Результаты выполненной работы использованы организациями при проектировании эффективных конструкций ТВН, предназначенных для работы в широком диапазоне давлений.

Апробация работы. Работа обсуждалась на заседании кафедры "Компрессорные и вакуумные машины и установки" МВТУ им.Н.Э.Баумана и в организациях, занимающихся созданием ТВН. Основное содержание работы изложено в трех печатных работах и двух научно-исследовательских отчетах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (86 наименований) и содержит 105 страниц машинописного текста, 63 рисунка и 16 таблиц.

В первой главе приведен критический анализ работ, посвященных исследованию ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, на основании которого сделан вывод об отсутствии данных для расчета откачной характеристики пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Основное содержание данной работы, направленной на исследование повышения эффективности ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, включает в себя решение следующих задач:

I) разработка теоретической модели процесса переноса молекул газа межлопаточными каналами рабочего колеса ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, на основании рассмотрения

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

которой можно определить зависимости для основных параметров откачной характеристики колеса S_{max} и τ_{max};

2) исследование влияния геометрических параметров межлопаточных каналов рабочих колес, относительной окружной скорости и параметра Кнудсена на S_{max} и τ_{max} ;

3) исследование особенностей расчета характеристики пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа;

4) создание методики определения оптимальных геометрических размеров проточной части ТВН при обеспечении заданных откачных параметров в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Во второй главе рассматривается теоретическая модель процесса переноса молекул газа межлопаточными каналами рабочего колеса ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, основанная на следующих допущениях:

I. В проточной части насоса имеет место молекулярно-вязкостный режим течения газа, характеризуемый значениями числа Кнудсена $K_n = 10 \div 0{,}01$.

2. Распределение молекул по тепловым скоростям соответствует закону Максвелла.

3. Молекулы, падающие на торцовую площадь межлопаточных каналов, подразделяются на три независимые группы: к первой относятся молекулы, не испытывающие межмолекулярные столкновения; ко второй - молекулы, у которых частота межмолекулярных столкновений сравнима с частотой их столкновений со стенками межлопаточных каналов; к третьей - молекулы, у которых преобладают межмолекулярные столкновения.

4. Процесс перехода молекул газа через межлопаточные каналы колес ТВН рассматривается в плоскостях, перпендикулярных торцовым поверхностям колес.

5. Температура газа и внутренних поверхностей насоса не меняется в процессе откачки.

В молекулярно-вязкостном режиме течения газа поток молекул газа, переносимый движущимися межлопаточными каналами со стороны всасывания (I) на сторону нагнетания (2), определяется как разность потоков молекул со стороны (I) на сторону (2) Q_1 и в противоположном направлении, Q_2 ,

$$Q = Q_1 - Q_2 .$$

В соответствии с принятыми допущениями, поток молекул газа может быть представлен в виде: $Q_1 = Q_1^I + Q_1^{II} + Q_1^{III}$, где $Q_1^I, Q_1^{II}, Q_1^{III}$ – потоки молекул газа со стороны I на сторону 2, соответственно первой, второй и третьей группы. Тогда коэффициент K_1, характеризующий поток молекул Q_1 ($Q_1 \sim K_1$), равен: $K_1 = K_1^I + K_1^{II} + K_1^{III}$, где $K_1^I, K_1^{II}, K_1^{III}$ – коэффициенты, пропорциональные потокам молекул газа $Q_1^I, Q_1^{II}, Q_1^{III}$.

Вероятность того, что молекулы, попавшие на торцовую площадь межлопаточных каналов, не испытают межмолекулярные столкновения (относятся к первой группе), равна $M_1 = e^{-1/kn(p_1)}$, где $kn(p_1)$ – значение числа Кнудсена, соответствующее давлению p_1. Молекулы, у которых преобладают межмолекулярные столкновения (молекулы третьей группы), могут быть выделены с помощью вероятности $J_1 = e^{-m\sqrt{kn(p_1)}}$, где m – эмпирический коэффициент ($m = 3$). Вероятность того, что молекулы относятся ко второй группе, составляет $C_1 = 1 - M_1 - J_1$.

Коэффициент K_1^I, пропорциональный потоку молекул газа первой группы, прошедшему через межлопаточные каналы рабочего колеса ТВН со стороны всасывания на сторону нагнетания, можно определить по формуле:

$$K_1^I = \Delta\varphi_1 \cdot M_1 = \Delta\varphi_1' + \Delta\varphi_1'' ;$$

где $\Delta\varphi_1$ – вероятность перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочего колеса со стороны всасывания на сторону нагнетания в молекулярном режиме течения газа;

$\Delta\varphi_1'$ – вероятность перехода молекул через неподвижный межлопаточный канал рабочего колеса;

$\Delta\varphi_1''$ – коэффициент, учитывающий увеличение вероятности перехода молекул газа движущимся каналом.

Коэффициенты K_1^{II} и K_1^{III}, по аналогии с K_1^I, определяются по следующим уравнениям:

$$K_1^{II} = (\Delta\varphi_1' \cdot f_1' + \Delta\varphi_1'' \cdot f_1'') \cdot C_1 ; \quad K_1^{III} = (\Delta\varphi_1' \cdot g_1' + \Delta\varphi_1'' \cdot g_1'') \cdot J_1 ,$$

где f_1' ; f_1'' ; g_1' ; g_1'' – параметры, характеризующие изменение вероятности $\Delta\varphi_1'$ и коэффициента $\Delta\varphi_1''$ при прохождении через межлопаточные каналы со стороны всасывания на сторону нагнетания молекул второй и третьей группы.

Коэффициенты f_1' и δ_1' определяются по уравнениям

$$f_1' = 1 + B \; ; \qquad \delta_1' = B \cdot t/B,$$

где B – эмпирический коэффициент, пропорциональный отношению проводимостей неподвижного канала в вязкостном и молекулярном режимах течения газа $(B = \pi/32 \cdot Kn_{(p_1)})$,

t/B – относительная ширина межлопаточного канала по нормали к боковой поверхности.

Коэффициент f_1'' для молекул второй группы, у которых частота межмолекулярных столкновений $\nu_м$ сравнима с частотой столкновения молекул со стенками межлопаточного канала $\nu_{ст}$,

$$f_1'' = \frac{\nu_{ст}}{\nu_м + \nu_{ст}} = \frac{Kn_{(p_1)}}{Kn_{(p_1)} + 2}.$$

Коэффициент δ_1'' для молекул третьей группы, преобладающих при малых числах Кнудсена, соответствующих граничной области между молекулярно-вязкостным и вязкостными режимами течения газа, принимается равным $\delta_1'' = \sqrt{Kn_{(p_1)}}$.

Тогда для прямого потока молекул газа со стороны всасывания на сторону нагнетания: $K_1^{I} = (\Delta\varphi_1' + \Delta\varphi_1'') \cdot M_1$;

$$K_1^{II} = [\Delta\varphi_1' \cdot (1 + \pi/32 \cdot Kn_{(p_1)}) + \Delta\varphi_1'' \cdot \frac{Kn_{(p_1)}}{Kn_{(p_1)} + 2}] \cdot C_1 \; ;$$

$$K_1^{III} = (\Delta\varphi_1' \cdot \pi/32 \cdot Kn_{(p_1)} \cdot t/B + \Delta\varphi_1'' \cdot \sqrt{Kn_{(p_1)}}) \cdot J_1 .$$

Аналогично, для обратного потока молекул газа со стороны нагнетания на сторону всасывания: $K_2^{I} = (\Delta\varphi_2' - \Delta\varphi_2'') \cdot M_2$;

$$K_2^{II} = [\Delta\varphi_2' \cdot (1 + \pi/32 \cdot Kn_{(p_2)}) - \Delta\varphi_2'' \cdot \frac{Kn_{(p_2)}}{Kn_{(p_2)} + 2}] \cdot C_2 \; ;$$

$$K_2^{III} = (\Delta\varphi_2' \cdot \pi/32 \cdot Kn_{(p_2)} \cdot t/B - \Delta\varphi_2'' \cdot \sqrt{Kn_{(p_2)}}) \cdot J_2 .$$

Результирующий поток молекул газа через межлопаточные каналы колеса имеет максимальное значение при отсутствии перепада давлений на нем $(p_1 = p_2)$. В этом случае величина результирующего коэффициента $K_{ср}$, пропорционального максимальной быстроте откачки колеса S_{max}, определяется как

$$K_{ср} = K_1 - K_2 = 2 \cdot \Delta\varphi_1'' \cdot [e^{-4/Kn_{(p_1)}} + \frac{Kn_{(p_1)}}{Kn_{(p_1)} + 2} \cdot (1 - e^{-4/Kn_{(p_1)}} - e^{-3\sqrt{Kn_{(p_1)}}}) + \sqrt{Kn_{(p_1)}} \cdot e^{-3\sqrt{Kn_{(p_1)}}}] \quad (I)$$

Максимальное отношение давлений:

$$\tau_{max} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\Delta\varphi_1'\left\{1 - e^{-3\sqrt{Kn_{(P_1)}}} + \frac{\pi}{32\cdot Kn_{(P_1)}}\left[1 - e^{-4/Kn_{(P_1)}} + e^{-3\sqrt{Kn_{(P_1)}}}\left(t/\beta - 1\right)\right]\right\} + \Delta\varphi_1''\left[e^{-3\sqrt{Kn_{(P_1)}}} + \frac{Kn_{(P_1)}}{Kn_{(P_1)}+2}\left(1 - e^{-4/Kn_{(P_1)}} - e^{-3\sqrt{Kn_{(P_1)}}}\right) + \sqrt{Kn_{(P_1)}}\cdot e^{-3\sqrt{Kn_{(P_1)}}}\right]}{\Delta\varphi_2'\left\{1 - e^{-3\sqrt{Kn_{(P_2)}}} + \frac{\pi}{32\cdot Kn_{(P_2)}}\left[1 - e^{-4/Kn_{(P_2)}} + e^{-3\sqrt{Kn_{(P_2)}}}\left(t/\beta - 1\right)\right]\right\} - \Delta\varphi_2''\left[e^{-3\sqrt{Kn_{(P_2)}}} + \frac{Kn_{(P_2)}}{Kn_{(P_2)}+2}\left(1 - e^{-4/Kn_{(P_2)}} - e^{-3\sqrt{Kn_{(P_2)}}}\right) + \sqrt{Kn_{(P_2)}}\cdot e^{-3\sqrt{Kn_{(P_2)}}}\right]} \quad (2)$$

Максимальная быстрота откачки S_{max} определяется из уравнения

$$S_{max} = 3{,}64\cdot F\cdot K_{ap}\cdot\sqrt{\frac{T}{M}}\,, \quad (3)$$

где F – торцовая площадь межлопаточных каналов,

T – температура газа,

M – молекулярный вес.

Параметр Kn можно выразить через давление всасывания P_1 и, создаваемое рабочим колесом ТВН, отношение давлений τ

$$Kn_{(P_1)} = \frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}\,; \quad Kn_{(P_2)} = \frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau}\,;$$

где λ – постоянная газа, равная произведению средней длины свободного пробега молекул газа λ при давлении P_1 на его величину P_1,

t_0 – характерный размер межлопаточного канала.

Тогда,

$$K_{ap} = 2\cdot\Delta\varphi_1''\left[e^{-\frac{t_0\cdot P_1}{\lambda}} + \frac{\lambda}{\lambda + 2t_0\cdot P_1}\left(1 - e^{-\frac{t_0\cdot P_1}{\lambda}} - e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}}\right) + \sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}\cdot e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}}\right], \quad (4)$$

$$\tau_{max} = \frac{\Delta\varphi_1'\left\{1 - e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}} + \frac{\pi\cdot t_0\cdot P_1}{32\cdot\lambda}\left[1 - e^{-\frac{t_0\cdot P_1}{\lambda}} + e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}}\left(t/\beta - 1\right)\right]\right\} + \Delta\varphi_1''\left[e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}} + \frac{\lambda}{\lambda + 2t_0\cdot P_1}\left(1 - e^{-\frac{t_0\cdot P_1}{\lambda}} - e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}}\right) + \sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}\cdot e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1}}}\right]}{\Delta\varphi_2'\left\{1 - e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}} + \frac{\pi\cdot t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}{32\cdot\lambda}\left[1 - e^{-\frac{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}{\lambda}} + e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}}\left(t/\beta - 1\right)\right]\right\} - \Delta\varphi_2''\left[e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}} + \frac{\lambda}{\lambda + 2t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}\left(1 - e^{-\frac{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}{\lambda}} - e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}}\right) + \sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}\cdot e^{-3\sqrt{\frac{\lambda}{t_0\cdot P_1\cdot\tau_{max}}}}\right]}. \quad (5)$$

Зависимость для определения максимального отношения давлений нелинейна, и τ_{max} может быть определено численным методом с помощью ЭВМ.

Анализ выражений для расчета K_{cp} и τ_{max} показал, что при значениях $K_n > 10$, K_{cp} и τ_{max} практически не зависят от K_n и зависимости (4,5) преобразуются в уравнения, полученные для молекулярного режима течения газа. Уменьшение значений K_{cp} и τ_{max} по сравнению с их величинами, определенными для молекулярного режима течения газа, наблюдается в диапазоне изменения чисел Кнудсена $K_n = 10 \div 0{,}01$, причем при $K_n = 0{,}01$ значения K_{cp} и τ_{max} минимальны.

Межмолекулярные столкновения уменьшают относительное влияние скорости перемещения межлопаточных каналов на процесс переноса молекул при молекулярно-вязкостном режиме течения газа и приводят, первоначально, при $K_n < 10{,}0$ к уменьшению прямого и увеличению обратного потока молекул газа по сравнению с молекулярным режимом течения газа, а затем, при $K_n < 0{,}1$ и к увеличению как прямого так и обратного потоков, причем увеличение обратного потока происходит более интенсивно. Благодаря этому, разность прямого и обратного потоков, а также и их отношение уменьшаются, и, следовательно, при повышении давлений параметры K_{cp} и τ_{max} уменьшаются.

В работе проведено исследование влияния относительной окружной скорости колес $C = U/V_н$ (U – окружная скорость колес, $V_н$ –наивероятная тепловая скорость молекул) и структуры межлопаточных каналов на коэффициент K_{cp} (пропорциональный S_{max})и τ_{max}. Анализ зависимостей $S_{max} = f(C)$ и $\tau_{max} = f(C)$, полученных при значениях K_n ($K_n = 10 \div 0{,}01$), показывает, что увеличение относительной окружной скорости C приводит к возрастанию параметров S_{max} и τ_{max}, однако, по мере уменьшения K_n, влияние C в молекулярно-вязкостном режиме течения газа проявляется в меньшей степени чем в молекулярном режиме.

На основании теоретического анализа зависимостей $K_{cp} = f(a/\beta)$, $\tau_{max} = f(a/\beta)$, $K_{cp} = f(\alpha)$, $\tau_{max} = f(\alpha)$ при $K_n = (10 \div 0{,}01)$ рекомендуется для первых колес в пакете ТВН, обеспечивающих повышенную быстроту откачки, применять следующие геометрические параметры межлопаточных каналов $\alpha = 40^{\circ} \div 45^{\circ}$; $a/\beta = 1{,}1 \div 1{,}3$. Для последующих колес α и a/β следует выбирать из условия обеспечения наибольшего значения рабочего отношения давлений τ.

Глава III посвящена определению оптимальных геометрических размеров проточной части ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Поток молекул газа, переносимых рабочим колесом со стороны всасывания (I) на сторону нагнетания (2), в молекулярно-вязкостном режиме определяется как разность прямого потока молекул газа в направлении откачки и обратно:

$$\frac{Va}{4}\cdot N_1\cdot F_1\cdot K_{cp} = \frac{Va}{4}\cdot N_1\cdot F_1\cdot K_1 - \frac{Va}{4}\cdot N_2\cdot F_2\cdot K_2, \qquad (6)$$

где N_1 – число молекул, падающих на торцовую площадь межлопаточных каналов со стороны всасывания;

N_2 – число молекул, падающих на торцовую площадь межлопаточных каналов со стороны нагнетания;

F – торцовая площадь межлопаточных каналов.

Рабочая быстрота откачки S_i и рабочее отношение давлений τ_i с учетом перетеканий через радиальный зазор и газовыделений связаны следующими зависимостями

$$\tau_i = \frac{S_{max_{1i}} - S_{non_i} + U_i - \frac{\sum q_i F_i}{P_{1i}}}{S_{max_{2i}} + U_i}; \qquad (7)$$

$$S_i = S_{non_i} + U_i\,(\tau_i - 1{,}0) + \frac{\sum q_i F_i}{P_{1i}}; \qquad (8)$$

где $S_{max_{1i}}$ – максимальный объемный поток молекул газа, проходящих через межлопаточные каналы i-го колеса со стороны I на сторону 2,

$$S_{max_{1i}} = 3{,}64\cdot F\cdot K_1\cdot\sqrt{\frac{T}{M}}, \qquad (9)$$

$S_{max_{2i}}$ – максимальный объемный поток молекул газа, проходящих через межлопаточные каналы i-го колеса со стороны 2 на 1,

$$S_{max_{2i}} = 3{,}64\cdot F\cdot K_2\cdot\sqrt{\frac{T}{M}}; \qquad (10)$$

U_i – пропускная способность кольцевого зазора,

$$U_i = U_{Mi}\left(\frac{0{,}147\cdot P_{cp}\cdot\delta_2}{A} + \frac{A + 2{,}507\cdot P_{cp}\cdot\delta_2}{A + 3{,}095\cdot P_{cp}\cdot\delta_2}\right), \qquad (11)$$

где U_{Mi} – пропускная способность в молекулярном режиме течения газа,

P_{cpi} – среднее значение давления в кольцевом зазоре $P_{cpi} = \frac{P_{ii}(1+\tau_i)}{2}$;

δ_r – величина радиального кольцевого зазора,

$\sum q_i F_i$ – величина газовыделений по условиям всасывания i-го колеса.

Уравнения для определения S_i и τ_i содержат параметры $S_{max_{1i}}$, $S_{max_{2i}}$, S_{non_i}, U_i, зависящие, соответственно, от давлений P_{1i}, P_{2i}, P_{cpi} и являются нелинейными. Поэтому для определения рабочих параметров характеристики колеса ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа необходимо совместное решение уравнений (7-II), что возможно осуществить численными методами с помощью ЭВМ. При числах $K_n > 10$ параметры $S_{max_{1i}}$, $S_{max_{2i}}$, U_i практически не зависят от давления и уравнения (7-II) преобразуются в зависимости, полученные ранее для молекулярного режима течения газа.

При определении геометрических размеров колес необходимо оценивать степень влияния потоков газа, выделяемого с внутренних поверхностей насоса и перетекающего через радиальные зазоры, или влияния нарушения молекулярного режима течения газа в проточной части ТВН. От этих факторов зависят: как собственно размеры колес, так и их количество в пакете, необходимое для обеспечения требуемого отношения давлений. Определение оптимальных значений геометрических размеров проточной части насоса (для заданных параметров откачной характеристики) позволит спроектировать насос с минимальным объемом проточной части. Критерием оптимальности компановки проточной части ТВН для заданных откачных параметров является минимальное значение условного объема пакета колес ТВН

$$A = \frac{\pi \cdot D_{2опт}^2}{4} \cdot n_{опт},$$

где D_2 – величина наружного диаметра колес;

n – число колес.

Минимум A обусловлен тем, что при увеличении D_2 число колес n, необходимое для обеспечения заданной степени повышения давлений, τ, уменьшается и, следовательно, при определенных значениях $D_{2опт}$ и $n_{опт}$ условный объем пакета колес будет ми-

нимальным. Такое изменение D_2 и n объясняется относительным снижением влияния на быстроту действия S и отношение давлений τ газовыделений с внутренних поверхностей, перетеканий через радиальные зазоры и нарушения молекулярного режима течения газа. При существенном увеличении $D_2 > D_{2опт}$, несмотря на возрастание τ на каждом колесе и, соответственно, уменьшение общего числа колес, относительный объем пакета увеличивается.

Порядок определения оптимальных геометрических размеров следующий:

1) для заданных значений быстроты действия S определяется минимальная величина D_2 первого (со стороны всасывания) рабочего колеса при условии обеспечения S в указанном диапазоне давлений всасывания;

2) геометрические параметры межлопаточных каналов ($\alpha, a/b, \lambda$) первого колеса выбираются из условия обеспечения для заданного S наибольшего рабочего отношения давлений τ;

3) геометрические параметры остальных колес в пакете и их количество определяются из условия согласованной работы, последовательно для каждого колеса (огибающая семейства основных характеристик $S = f(\tau)$ будет выражать закон распределения геометрических параметров межлопаточных каналов по ступеням в пакете ТВН);

4) минимальная величина условного объема пакета A_{min} определяется при проведении подобных расчетов для других значений D_2, причем расчеты необходимо проводить для всего рабочего диапазона откачной характеристики насоса и по наибольшей величине A_{min} выбирают геометрические размеры проточной части насоса.

Степень нагруженности первого рабочего колеса характеризуется коэффициентом K^*, равным отношению заданной быстроты действия к S_{max}. При заданном рабочем диапазоне давлений всасывания откачной характеристики ТВН геометрические размеры первого колеса следует определять при условии $S_{max} = S/K^*$. Снижение величины K^* в области давлений $P_{вс} < 10^{-7}$ мм.рт.ст. объясняется существенным ростом влияния газовыделений, а при $P_{вс} > 10^{-3}$ мм.рт.ст. нарушением молекулярного режима течения газа. Геометрические параметры первого колеса на основании проведенного теоретического анализа (глава II) следует выбирать: $\alpha = 40^\circ \div 45^\circ$; $a/b = 1,1 \div 1,3$,

для последующих колес α и a/b меняются в диапазоне $\alpha = 45^{\circ} \div 20^{\circ}$ и $a/b = 1,0 \div 0,6$ для $P_{вс} < 10^{-3}$ мм рт.ст. и $\alpha = 45^{\circ} \div 25^{\circ}$; $a/b = 1,0 \div 0,8$ для $P_{вс} > 10^{-3}$ мм рт.ст., когда весь пакет работает в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

На основании проведенного исследования установлена закономерность оптимального распределения геометрических параметров межлопаточных каналов по ступеням в пакете ТВН и даны практические рекомендации по конструированию проточной части ТВН:

1) геометрические размеры первого рабочего колеса следует определять при условии $K^* = 0,8$ ($K^* = S/S_{max}$) для давления $P_{вс} < 10^{-7}$ мм рт.ст. (часть колес со стороны нагнетания работает при нарушении молекулярного режима течения газа) и $P_{вс} > 10^{-3}$ мм рт.ст. (весь пакет работает в молекулярно-вязкостном режиме течения газа). При $P_{вс} = 10^{-7} \div 10^{-3}$ мм рт.ст. $K^* = 0,85$.

2) для уменьшения типо-размеров колес в пакете рекомендуется трехпакетная компановка проточной части ТВН:

а) для давлений $P_{вс} \leq 10^{-3}$ мм рт.ст., $\alpha^{I} = 40^{\circ} \div 45^{\circ}$; $(a/b)^{I} = 1,1 \div 1,3$; $\alpha^{II} = 30^{\circ} \div 35$; $(a/b)^{II} = 0,9 \div 1,1$; $\alpha^{III} = 20^{\circ} \div 25^{\circ}$; $(a/b)^{III} = 0,6 \div 0,8$ и соотношением колес в пакетах: $n^{I} = 1/4$; $n^{II} = 1/4$; $n^{III} = 1/2$;

б) для давлений $P_{вс} > 10^{-3}$ мм рт.ст. $\alpha^{I} = 40^{\circ} \div 45^{\circ}$; $(a/b)^{I} = 1,1 \div 1,3$; $\alpha^{II} = 30^{\circ} \div 35^{\circ}$; $(a/b)^{II} = 0,9 \div 1,1$; $\alpha^{III} = 25^{\circ} \div 30^{\circ}$; $(a/b)^{III} = 0,8 \div 0,9$; $n^{I} = 1/4$; $n^{II} = 1/2$; $n^{III} = 1/4$;

в) при откачке газов с относительно малым молекулярным весом рекомендуется компановка (а);

г) относительный диаметр межлопаточных каналов для первого пакета выбирается в диапазоне $\lambda^{I} = 0,6 \div 0,7$ в зависимости от значений окружной скорости колес, $\lambda^{II} = 0,7 \div 0,75$; $\lambda^{III} = 0,75 \div 0,8$.

В четвертой главе приведено описание экспериментальных стендов, предназначенных для исследования рабочего колеса и пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Экспериментальные стенды состоят из турбомолекулярных вакуум-насосов, форвакуумной линии, включающей насосы предварительного разряжения, с помощью которых на нагнетании ТВН обеспечивались

необходимые откачные параметры, и измерительной аппаратуры. Экспериментальные стенды позволили определить основные параметры откачной характеристики (S_{max} и τ_{max}) рабочего колеса и пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Далее изложена методика проведения экспериментальных исследований в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния числа Кнудсена на основные параметры рабочего колеса S_{max} и τ_{max} в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, проведенному при различных значениях относительной окружной скорости колес c =0,165÷0,205 и геометрических параметров межлопаточных каналов α =15°, 20°, 30°, 40°, 45°; a/β =0,185; 0,511; 0,725; 0,833; 1,0; 1,333; 1,5; λ =0,47; 0,793 в диапазоне чисел Кнудсена K_n =50÷0,03. Характерный размер межлопаточных каналов (ширина канала по нормали к боковой поверхности t) у экспериментальных колес изменялся в диапазоне t = =1,53÷4,55 мм. Максимальное расхождение между р а с ч е т н ы м и и экспериментальными зависимостями $S_{max} = f(K_n)$ не превышало 15% и при сравнении $\tau_{max} = f(K_n)$ -7%. Таким образом, по расчетным зависимостям, полученным в данной работе, можно с удовлетворительной точностью определять S_{max} и τ_{max} рабочих колес в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Исследование влияния относительной окружной скорости c на параметры S_{max} и τ_{max} рабочего колеса проводилось при различных геометрических размерах колес в диапазоне c =0,165÷0,250 при значениях K_n =10; 1,0; 0,5; 0,05. Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями S_{max} не превышает 15% и 7% при сравнении τ_{max} . На основании удовлетворительного совпадения расчетных и экспериментальных данных подтвержден вывод, сделанный при анализе теоретических зависимостей, о том, что влияние относительной окружной скорости на S_{max} и τ_{max} понижается при уменьшении K_n (увеличении давления).

Экспериментальное исследование влияния угла наклона межлопаточных каналов α и структуры a/β на S_{max} и τ_{max} в молекулярно-вязкостном режиме течения газа проводилось на рабочих колесах с геометрией межлопаточных каналов α =15°,20°,30°, 40°, 45°; a/β = 0,511; 0,833; 1,0; 1,333; 1,5 для c =0,175 и

0,250 и K_n =I0; I,0; 0,5; 0,05. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями S_{max} не превышало I5%, τ_{max}-7%.

С целью проверки возможности применения расчетных зависимостей для определения S_{max} и τ_{max} пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа были получены экспериментальные зависимости $S_{max} = f(K_n)$ и $\tau_{max} = f(K_n)$ пакета ТВН, состоящего из 7 роторных и 7 статорных колес (α =I5°, a/β =0,725), для c =0,I65 и 0,205.

Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями S_{max} не превышало I5% и при сравнении значений τ_{max} -7%. Подтвержден вывод, сделанный при теоретическом анализе, о том, что применение в последних ступенях колес с относительно малыми значениями α (I5÷20°) и a/β (0,6÷0,8) не приводит к повышению откачных параметров ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Получены экспериментальные зависимости быстроты действия $S = f(P_{bc})$ и $\tau = f(P_{bc})$ пакета колес ТВН, созданного на основании практических рекомендаций по конструированию проточной части ТВН. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных (расхождение не превышает I2,5%) показывает, что можно с достаточной степенью точности определять откачные параметры ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Основные выводы

I. Разработана теоретическая модель процесса переноса молекул газа межлопаточными каналами рабочего колеса турбомолекулярного вакуум-насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, на основании которой получены зависимости для определения основных параметров откачной характеристики рабочего колеса: максимальной быстроты откачки S_{max}, при отсутствии перепада давлений на колесе, максимального отношения давления τ_{max} при быстроте действия $S = 0$.

II. Проведено теоретическое и экспериментальное исследования влияния параметра Кнудсена на S_{max} и τ_{max}. Ухудшение параметров S_{max} и τ_{max} наблюдаются при числах $K_n < I0$. На основании удовлетворительного совпадения расчетных и экспериментальных

данных (максимальное расхождение не превышает 15%) установлено, что полученные в работе зависимости позволяют с достаточной степенью точности определять S_{max} и τ_{max} колеса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

Ш. В результате теоретического и экспериментального анализа влияний геометрических параметров межлопаточных каналов: угла наклона межлопаточных каналов α ; относительной ширины канала a/b и относительной окружной скорости c на S_{max} и τ_{max} в молекулярно-вязкостном режиме течения газа установлено:

а) для создания повышенных значений S_{max} на первом рабочем колесе следует применять $\alpha = 40^{\circ}\div45^{\circ}$; $a/b = 1,1\div1,3$;

б) геометрические параметры остальных колес в пакете следует выбирать из условия согласованной работы колес;

в) влияние относительной окружной скорости c на S_{max} и τ_{max} понижается по мере уменьшения чисел K_n.

IУ. Исследованы особенности расчета откачной характеристики пакета колес ТВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Установлено, что применение колес с относительно небольшими значениями геометрических параметров ($\alpha = 15^{\circ}$; $a/b = 0,75$) не приводит к повышению τ_{max} пакета в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

У. На основании проведенного исследования влияний геометрических параметров межлопаточных каналов на откачную характеристику пакета колес ТВН создан метод определения оптимальных геометрических параметров проточной части насоса для заданных откачных параметров. Получены следующие практические рекомендации по конструированию ТВН: для уменьшения типо-размеров колес в пакете ТВН рекомендуется трехпакетная компановка проточной части с геометрическими параметрами межлопаточных каналов колес в пакетах: $\alpha^{I}=40^{\circ}\div45^{\circ}$; $\alpha^{II}=30^{\circ}\div35^{\circ}$; $\alpha^{III}=25^{\circ}\div30^{\circ}$; $(a/b)^{I}=1,0\div1,2$; $(a/b)^{II}=0,9\div1,1$; $(a/b)^{III}=0,8\div0,9$ (при $P_{вс} > 10^{-3}$ мм рт.ст. в молекулярно-вязкостном режиме течения газа); $\alpha^{I}=40^{\circ}\div45^{\circ}$; $\alpha^{II}=30^{\circ}\div35^{\circ}$; $\alpha^{III}=20^{\circ}\div25^{\circ}$; $(a/b)^{I}=1,0\div1,2$; $(a/b)^{II}=0,9\div1,1$; $(a/b)^{III}=0,6\div0,8$ (при $P_{вс} < 10^{-3}$ мм рт.ст., когда часть колес пакета работает в молекулярно-вязкостном режиме течения газа).

Получены экспериментальные зависимости быстроты действия $S = f(P_{вх})$ и $Q = f(P_{вх})$ пакета колес ТВН, созданного на основании практических рекомендаций. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 12%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Демихов К.Е., Пыжов И.Н. "Модель процесса переноса молекул газа межлопаточными каналами рабочего колеса турбомолекулярного вакуум-насоса", "Химическое и нефтяное машиностроение", № 1, 1977 г.

2. Демихов К.Е., Пыжов И.Н. "К вопросу о расчете пакета рабочих колес турбомолекулярного вакуум-насоса", деп.№ 333/76, аннотация опубликована Р.Ж.ВИНИТИ, "Насосостроение и компрессоростроение. Холодильное машиностроение", № 12, 1976 г.

3. Демихов К.Е., Пыжов И.Н. "Выбор оптимальных геометрических размеров пакета рабочих колес турбомолекулярного вакуум-насоса", деп.№ 334/76, аннотация опубликована Р.Ж.ВИНИТИ, "Насосостроение и компрессоростроение. Холодильное машиностроение", № 12, 1976 г.

Типография МВТУ им.Н.Э.Баумана Л-72043 от 25/VII-1978г.
Тираж 100 экз. Объём 1 п.л. Зак. 1053