

М 383333

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Тузанкин Юрий Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВАКУУМНЫХ
НАСОСОВ С РАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ КАНАЛОВ

(Вакуумная и компрессорная техника - 05.04.06)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981

Работа выполнена в Научно-производственном объединении
"Вакуумаш".

- Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники
РСФСР и ТАССР, доктор технических
наук, профессор Усманов А.Г.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Фролов Е.С.
- кандидат технических наук
Шевляков А.Н.
- Ведущее предприятие - указано в решении специализированного
совета

Защита диссертации состоится "14" декабря 1980 г.
в "16" часов "00" минут

совета К.053.15.07 "Криогени-

вакуумные и компрессорные м

Н.Э.Баумана по адресу: 10700

д.1, лабораторный корпус фа

С диссертацией можно озн

Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "

М 383333

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

Актуальность проблемы. Развитие прогрессивных технологических процессов в электронной, химической, оптической, авиационной и в других отраслях промышленности, а так же многих научных исследований, проводимых в условиях сверхнизких давлений, требуют дальнейшего совершенствования всего арсенала вакуумной техники, особенно, высокопроизводительных откачных средств, обеспечивающих получение высокого и сверхвысокого вакуума.

Наиболее перспективным для решения стоящих задач оказываются турбомолекулярные высоковакуумные насосы, обладающие высокими удельными характеристиками и способные эффективно откачивать все без исключения газы, создавать вакуум порядка $1 \cdot 10^{-9}$ Па свободный от углеводородных соединений и примесей в остаточных газах. Одним из возможных направлений совершенствования НВТ является использование, предложенной автором (авт. свид. № I743I4) радиальной структуры каналов (РСК), позволяющей помимо повышения скорости действия уменьшить габариты насосов, повысить их надежность и реализовать конструкции со встречно вращающимися роторами. Внедрение РСК требует данных исследований процессов перехода молекул газа через вращающиеся каналы и их системы, разработки методик расчета НВТ, подробного анализа их характеристик и зависимостей от геометрии и скорости каналов, температуры и рода газа.

Цель и задачи исследований. Целью настоящей работы являлось изучение молекулярных процессов в РСК и получение необходимых теоретических и экспериментальных данных для расчета и проектирования новых высокоэффективных устройств на базе РСК, в том числе НВТ с радиальным потоком откачиваемого газа.

Конкретными задачами исследований являются следующие:

1. Теоретическое исследование распределения потоков молекул в процессе перехода их через РСК с учетом особенностей их геометрии, величины и направления скорости, температуры и рода газа.
2. Исследование процесса перехода молекул через зазоры между вращающимися барабанами с учетом тангенциального разброса молекул.
3. Исследование зависимостей вероятностей перехода молекул через РСК от геометрии и скорости каналов, температуры и рода газа.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1383333

Тузанкин Ю.М. Исследование

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

4. Подтверждение теоретических результатов экспериментами.

5. Разработка методик расчетов устройств на базе РСК, в частности, инженерной методики расчета радиальных НВТ.

Методы исследований. В работе применены теоретические и экспериментальные методы исследований. В теоретических исследованиях использованы основные положения кинетической теории газов. Экспериментальные исследования проведены на специальных стендах.

Научная новизна. Впервые исследовано распределение потоков молекул и вероятностей их перехода через каналы ранее не изученных профилей, обобщающие случаи вращающихся и поступательно движущихся систем с учетом величины и направления их скорости, температуры и природы газа.

Установлена и проведена оценка влияния тангенциального разброса молекул на переход их через радиальные зазоры РСК.

Показаны возможности применения полученных результатов для определения различных характеристик потока, проводимости каналов, характеристик турбомолекулярных и термомолекулярных насосов. Проведен анализ откачных характеристик НВТ.

Практическая ценность. В процессе выполнения работы получены результаты для расчетов и проектирования новых устройств на базе РСК, на конструкции которых получено 4 авторских свидетельства на изобретения. Некоторые из них уже изготовлены и прошли опытную эксплуатацию, другие находятся в стадии разработки.

Разработана инженерная методика расчетов радиальных НВТ и проведен анализ их характеристик. С использованием результатов исследований разработан отраслевой стандарт ОСТ 26-04-908-73 "Насосы вакуумные турбомолекулярные. Типы и основные параметры".

Ожидаемый экономический эффект только от одного насоса НВТ-6300Д составляет 75 тыс. руб.. При выполнении всего заказа

годовой экономический эффект достигнет одного млн. руб..

Апробация работы. Результаты работы доложены на 3, 4, 5 Всесоюзных конференциях по физике и технике вакуума в г. Казани (1970, 1975г.) и в г. Ленинграде (1973г.), на 6 Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов в г. Новосибирске (1979г.), на отчетной научно-технической конференции КХТИ им. С. М. Кирова (1979г.) и на техническом семинаре кафедры "Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты" МВТУ им. Е. Э. Баумана (1979г.).

Основные результаты опубликованы в тезисах и сборниках докладов конференций, в журнале "Тепло-массообмен в химической технологии", сборниках "Изобретения и открытия СССР".

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 223 стр. и включает 78 рисунков на 58 стр., библиографию на 8 стр., содержащую 101 наименование и приложения на 12 стр..

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований молекулярных процессов в каналах. Геометрия каналов их структура и кинематика в условиях молекулярного режима течения газа являются факторами, определяющими процесс переноса массы. В связи с этим рассмотрим наиболее распространенную осевую и предложенную нами радиальную системы каналов (ОСК и РСК).

ОСК образуется последовательной установкой с некоторым осевым зазором плоских, как правило дисковых, решеток вдоль оси вращения. РСК образуется последовательной установкой барабанных решеток одна в другую с радиальным зазором. На практике кинематика каналов определяется вращением решеток.

Молекулярные процессы в ОСК подробно исследовались Ч.Крюгером, Т.Савадой и др., Е.С.Фроловым, Ю.А.Коммаровым, Н.К.Никулиным, В.П.Ивановым, Л.А.Беляевым, Н.А.Шевляковым и др.. В частности, при исследовании процесса перехода молекул через движущимися каналами, обнаружено, что с увеличением их скорости, условия перехода через наклонные каналы изменяются так, что количество молекул, проходящих канал во встречных направлениях, становится не одинаковым. Этот важный вывод стимулировал дальнейшие исследования и привел к созданию турбомолекулярных вакуумных насосов. В то же время этот вывод ограничил исследования узким направлением: получением сведений для расчетов НВТ. Для получения этих сведений, учитывая линейную зависимость объемного расхода газа S (быстроты действия) от отношения давлений K :

$$S = F_{\Delta} V (P_{12} - P_{21} \cdot K) \quad (I)$$

оказалось достаточно определить вероятности перехода молекул через каналы во встречных направлениях P_{12} и P_{21}

Вероятности P_{12} и P_{21} определялись математическим моде-

лированием процессов перехода молекул через канал. Для моделирования использовались три метода: метод статистических испытаний, метод интегральных уравнений и метод осредненных угловых коэффициентов. Первые два метода являются наиболее точными, но требуют сложного математического аппарата. Третий метод позволяет проводить непосредственный анализ, но даёт менее точные результаты. Отметим, что с целью упрощения решений во всех методах движение каналов предполагалось поступательным, что не приемлемо для каналов РСК; температура газа и каналов принималась одинаковой и неизменной, что исключило из рассмотрения необходимые в практике случаи работы ОСК во время прогрева и охлаждения.

Полученные аналитические решения позволили провести расчеты вероятностей перехода молекул через каналы различных размеров и профилей. Анализ результатов показал, что с ростом скорости каналов, вероятность P_{12} увеличивается, а вероятность P_{21} уменьшается, что определяет рост разности $Q = P_{12} - P_{21}$ и отношения $K = P_{12}/P_{21}$. Уменьшение угла наклона стенок канала α вызывает снижение Q и рост K . Уменьшение относительной ширины канала S_0 приводит к росту величины Q и снижению K . Этих данных, а так же дополнительных сведений о влиянии длины канала и перетеканий через зазоры оказалось достаточным для оптимизации расчетов характеристик НВТ с ОСК. Однако подобных исследований применительно к РСК не проводилось, а результаты исследований ОСК не могут быть применены непосредственно для РСК, поскольку геометрии их существенно отличаются друг от друга, скорость отдельных участков канала в барабанной решетке изменяется по величине и направлению, условия перехода молекул через зазоры между барабанными решетками не идентичны условиям их перехода между дисковыми решетками. Кроме того, оказалось недостаточно сведений по распределению молекул в канале, влиянию на процесс перехода молекул через каналы природы газа и его температуры.

Глава 2. Теоретическое исследование молекулярных процессов в каналах радиальной структуры.

Каналы барабанной решетки не имеют аналогов среди ранее изученных: входные стороны его сечения образованы дугами φ_0, φ_0' (см. рис. I) окружностей R_1 и R_2 , а боковые стороны отрезками неравной длины, наклоненными под углами α_1 и α_2 к радиусам. Различные профили каналов и их геометрические соотношения могут быть заданы уг-

лами α_1, α_2 относительной толщины решетки $\mu = R_2/R_1$, величиной дуги φ_0 или отношением $\bar{S}_1 = \varphi_0/\bar{S}$, где $\bar{S} = \bar{S}_1/R_1$. При вращении решетки каждый участок сечения канала имеет отличающуюся величиной и направлением скорости $V_i = \omega R_i$, вектор которой направлен нормально к радиусу R_i .

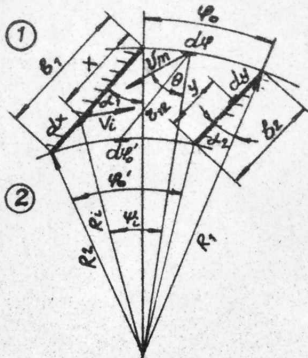


Рис.2. Радиальный канал

Все молекулы газа в канале можно разделить на две не взаимодействующих категории, одна из которых движется в направлении 1-2 (во внутрь барабана), другая во встречном направлении 2-1. Если выделим слой решетки единичной длины, то со стороны 1(2) на единицу площади входа такого канала в единицу времени поступит количество молекул $N_1 = n_1 \sqrt{RT_1/2\pi M_1}$, $N_2 = n_2 \sqrt{RT_2/2\pi M_2}$. Часть из них $N_{12}' (N_{21}')$ перейдет в канал без столкновений со стенками с вероятностью $P_{12}' (P_{21}')$, а другие части $N_1 dx, N_1 dy (N_2 dx, N_2 dy)$ встретятся с элементарными участками стенок b_1, b_2 соответственно с вероятностями $P_{1x}, P_{1y} (P_{2x}, P_{2y})$ и выйдут из канала на сторону 2(1) с вероятностями $P_{x2}, P_{y2} (P_{x1}, P_{y1})$. Вероятность окончательного перехода молекул через канал P_{12} и P_{21} получим суммированием:

$$P_{12} = P_{12}' + \int_{x=0}^{b_1} P_{1x} \cdot P_{x2} dx + \int_{y=0}^{b_2} P_{1y} \cdot P_{y2} dy$$

$$P_{21} = P_{21}' + \int_{x=0}^{b_1} P_{2x} \cdot P_{x1} dx + \int_{y=0}^{b_2} P_{2y} \cdot P_{y1} dy \quad (I)$$

Вероятности $P_{12}', P_{1x}, P_{1y} (P_{21}', P_{2x}, P_{2y})$ определяются путем вычисления числа молекул, проходящих элементарный участок сечения входа $d\varphi_0 (d\varphi'_0)$ и поступающих на элементарные участки $dx, dy, d\varphi_0, d\varphi'_0$ с последующим интегрированием по всем участкам

входа и выхода или стенок канала. Доля этих молекул от всего количества N_1 (N_2) дает искомую вероятность. Например, вероятность поступления молекул на любой i -ый участок, начало и конец которого расположены под углами θ_i и θ_2 от нормали к $d\varphi_0$ можно записать

$$P_{10} = \frac{1}{\varphi_0} \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_0'} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0'} \int_{\theta_i}^{\theta_2} f(U_m) U_m \cos \theta_i dU_m d\theta_i d\varphi_0 \quad (2)$$

где $f(U_m)$ - функция распределения молекул по скоростям, которая с учетом непрерывно изменяющегося направления скорости U_i получена в следующем виде

$$f(U_m) = \frac{2U}{U_H} \exp \left[-(U^2 + C_i^2 - 2UC_i \sin(\theta_i - \psi_i)) \right]$$

где U_m - скорость молекул относительно канала, $C_i = v_i/U_H$ - безразмерная скорость i -го участка, $U = U_m/U_H$ - безразмерная относительная скорость молекул, ψ_i - угол между направлениями скоростей i -го участка и участка входа $d\varphi(d\psi)$.

После интегрирования (2) по всем скоростям U и замены интегрирования по θ на интегрирование по участкам φ_0' получим

$$P_{12}' = \frac{1}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0'} \int_0^{\varphi_0'} \left[-\frac{\delta_1 h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2} + e^{-h^2 \delta_1^2} \left(\frac{1}{2} + h^2 \delta_1^2 \right) (1 + \phi_{12}) \right] \delta_3 d\varphi_0 d\varphi_0'$$

где $h = \mu C_1$, $\delta_1 = \sin(\theta_{12} - \psi_{12})$, $\delta_2 = \cos(\theta_{12} - \psi_{12})$, (3)

$$\delta_3 = \frac{\cos \theta_{12} \sin \beta_{12}}{\sin \theta_{12}}, \quad \phi_{12} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{h\delta_1} e^{-t^2} dt, \quad \mu = R_2/R_1$$

Вероятности P_{21}' , P_{1x} , P_{x1} , P_{1y} , P_{y1} получим аналогично с учетом подстановки соответствующих пределов интегрирования, значений скорости C_2 , C_x , C_y , углов θ , ψ , β и величины ε , определяемых из геометрических соотношений канала. Вероятности P_{x2} , P_{y2} определяются системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_{x2} &= m_{x2} dx + \int_{y=0}^{\beta_2} P_{y2} m_{xy} dy \\ P_{y2} &= m_{y2} dy + \int_{x=0}^{\beta_1} P_{x2} m_{yx} dx \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $m_{xy} dy$, $m_{yx} dx$ - доли молекул, отраженных от участков dy , dx и поступивших на участки dx , dy ; $m_{x2} dx$, $m_{y2} dy$ доли моле-

кул, отраженных от участков dx, dy в направлении выхода из канала. В соответствии с законом косинуса для диффузно отраженных молекул имеем

$$\begin{aligned} m_{xy} dy &= \frac{1}{2} \cos \phi d\phi & m_{x2} dx &= \frac{1}{2} (1 + \sin \phi_2) dx \\ m_{yx} dx &= \frac{1}{2} \cos \phi' d\phi' & m_{y2} dy &= \frac{1}{2} (1 - \sin \phi'_2) dy \end{aligned}$$

где $\phi, \phi', \phi_2, \phi'_2$ углы, определяющие направления потоков молекул от нормали к участкам dx или dy .

Полученные решения распространяются на каналы различных профилей, образованных изменением угла α_2 и дают возможность проводить анализ зависимостей от геометрических соотношений каналов, скорости, температуры газа и его молекулярной массы. Кроме того, при значениях μ , близких к единице, профиль исследуемого канала приближается к профилю каналов ОСК, что позволяет распространить на них полученные решения.

Количественный анализ проведен по результатам численных решений для канала с параллельными стенками, получившего наибольшее распространение в практике. Анализ проведен в диапазоне значений:

$$\alpha_1 = 15 \div 70^\circ; \bar{S}_1 = 0,25 \div 1,5; C_1 = 0 \div 2,25; \mu = 0,9 \div 0,98$$

Для всех вариантов получены как промежуточные $P_{12}', P_{21}', P_{1x}, P_{2x}, P_{1y}, P_{2y}, P_{x1}, P_{x2}$ так и окончательные P_{12}, P_{21} значения вероятностей, а так же их разность $Q_{max} = P_{12} - P_{21}$ и отношение $K_{max} = P_{12}/P_{21}$. По промежуточным значениям вероятностей анализировалось распределение молекул по отдельным участкам канала и зависимость его от скорости. Отметим, что при увеличении скорости каналов вероятности $P_{12}, P_{12}', P_{1x}, P_{2x}$ растут, а вероятности $P_{21}, P_{21}', P_{1y}, P_{2y}$ снижаются. Вероятности $P_{x1}, P_{y1}, P_{x2}, P_{y2}$ от скорости не зависят. С ростом скорости, молекулярной массы газа и с понижением его температуры вероятность P_{12} сначала возрастает, а затем, достигнув максимума, заметно снижается. Вероятность P_{21} при этом постоянно уменьшается. При одновременном росте температуры газа на входе T_1 и выходе T_2 вероятность P_{12} снижается, а вероятность P_{21} увеличивается. При понижении температуры газа только на выходе снижается вероятность P_{21} , что приводит к увеличению $P_{12} - P_{21}$ и P_{12}/P_{21} . Температура стенок не оказывает влияния на распределение молекул в канале.

Графики зависимостей $Q_{max} = f(C, T, \mu)$ и $K_{max} = f(C, T, \mu)$ приведе-

ны на рис.2. Отметим, что принятой геометрии канала соответствует семейство кривых, отличающихся значениями μ . При увеличении μ от 0,9 до 0,98 величины Q_{max} и K_{max} заметно возрастают. Влияние геометрических соотношений канала на Q_{max} и K_{max} показывают графики на рис. 3,4,5. Как и для каналов ОСК значения S_{max} максимальные при $\bar{S}_1 = 1,4$, $\alpha_1 = 50+60^\circ$, а значения K_{max} при $\bar{S}_1 < 0,5$, $\alpha_1 > 60^\circ$. Сравнение этих результатов с известными показало их хорошее совпадение, особенно при $\mu = 0,98$.

В многоступенчатых РСК рассмотрен процесс перехода молекул через осевые и радиальные зазоры между решетками и приведены аналитические зависимости влияния этих зазоров на процесс откачки. На процесс перехода молекул через радиальный зазор между барабанами установлено влияние тангенциального разброса молекул движущимися поверхностями. Оценка показала, что концентрация молекул зависит от относительной величины зазора μ_3 и скорости внешнего барабана. Однако, перераспределение концентрации молекул оказалось незначительной ($\sim 3\%$) и ей можно пренебречь в практических расчетах.

Глава 3. Экспериментальное исследование молекулярных процессов в каналах. Экспериментальные исследования предприняты для проверки теоретических результатов. Для выполнения этой задачи был создан стенд, включающий герметичную цилиндрическую камеру, в которой устанавливалась на валу исследуемая решетка. Решетка разделяла камеру на две полости: входную и выходную. При вращении решетки измерялись быстрота действия S и давления на входе P_1 и выходе P_2 . Измерения проводились в диапазоне давлений от $6,6 \cdot 10^{-2}$ до $6,6 \cdot 10^{-4}$ Па при изменении частоты вращения решетки от 0 до 2600 об/с. Пробными газами являлись: гелий, воздух, аргон, фреон II2. Исследовались пять решеток, отличающихся геометрическими соотношениями каналов. Одна из них исследовалась при различных зазорах: 0,5; 1; 1,25; 1,5; 2 мм.

Максимально возможная погрешность измерений быстроты действия после проведения мероприятий, повышающих точность манометрических преобразователей ПМИ-2, снижена до $\pm 12\%$, а измерений давлений до $\pm 10\%$.

По данным измерений S , P_1 и P_2 определялись Q_{max} и K_{max} , которые сравнивались с их теоретическими значениями.

Результаты экспериментов показали:

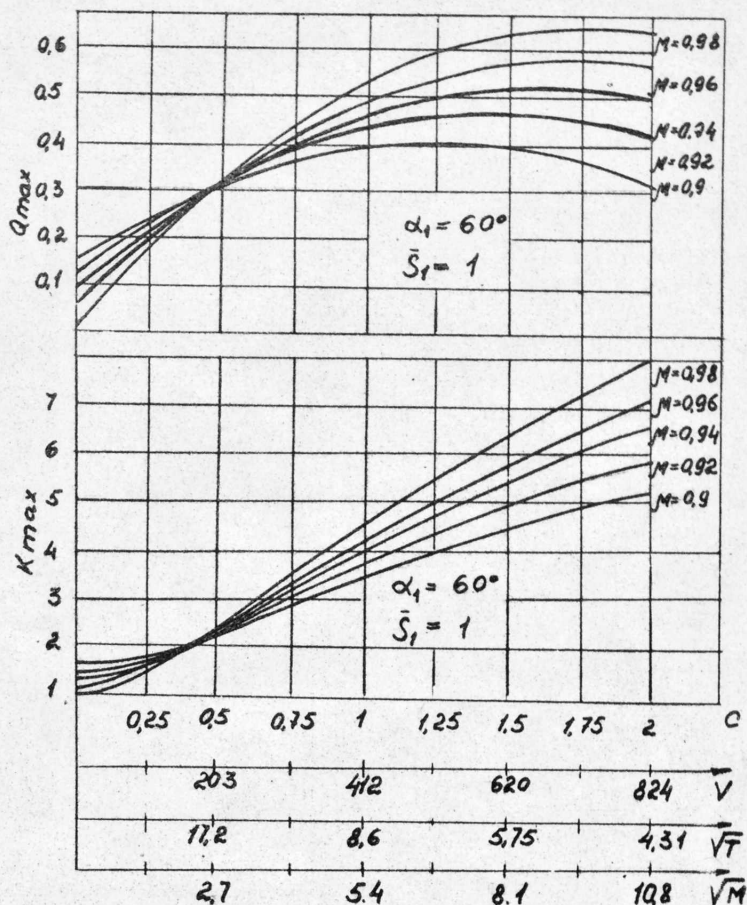


Рис.2. Графики зависимости $Q_{max} = f(C, V, T, M)$ и $K_{max} = f(C, V, T, M)$.

шкала V построена при $M = 29$, $T = 300^\circ \text{K}$,
 шкала $\sqrt{M}$ построена при $V = 203 \text{ м/с}$, $T = 500 \text{ K}$,
 шкала $\sqrt{T}$ построена при $V = 203 \text{ м/с}$, $M = 29$.

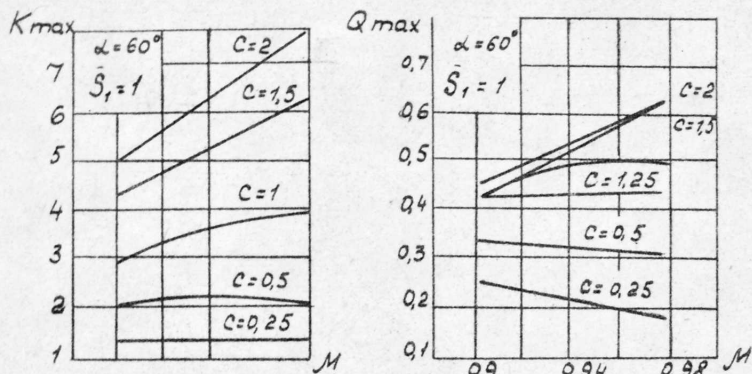


Рис. 3. Графики зависимостей $K_{max} = f(M)$ и $Q_{max} = f(M)$.

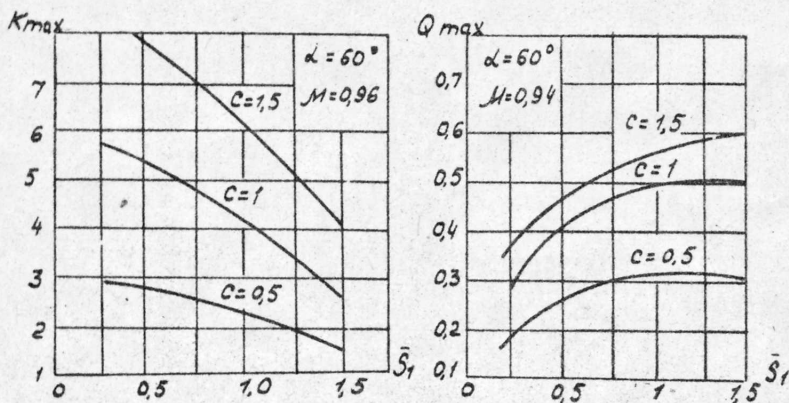


Рис. 4. Графики зависимостей $K_{max} = f(\bar{S}_1)$ и $Q_{max} = f(\bar{S}_1)$.

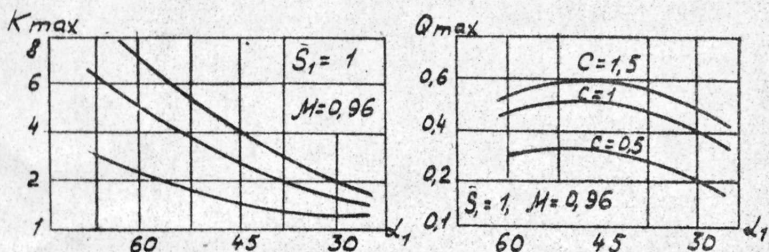


Рис. 5. Графики зависимостей $K_{max} = f(\alpha)$ и $Q_{max} = f(\alpha)$.

1. Зависимость $Q = f(K_{max})$ остается линейной во всем исследуемом диапазоне скоростей, что подтвердило справедливость основного уравнения процесса молекулярной откачки.

2. С увеличением скорости решетки значения Q_{max} и K_{max} возрастают, что соответствует расчетным данным. Расхождение экспериментальных данных в диапазоне относительных скоростей от 0 до 0,5 не превышало 10%, а в диапазоне от 0,5 до 0,8 оказалось 15%.

3. При увеличении молекулярной массы газа от 4 до 116 Q_{max} и K_{max} возрастают, поскольку возрастает относительная скорость C . S_{max} при этом практически не изменяется.

4. При увеличении зазора от 0,5 до 2 мм S_{max} возросла на 10%, а K_{max} из-за увеличения обратных перетеканий существенно снизилась (7%). Увеличение S_{max} объясняется особенностью молекулярных процессов в осевом зазоре, создающих дополнительный откачной эффект, учет которого уменьшает имеющиеся расхождения.

Многоступенчатая РСК исследовалась на отдельном стенде, содержащем три вращающиеся и три неподвижные решетки, установленные поочередно одна в другую. При частотах вращения 1500, 2000, 2600 1/с получены следующие значения K_{max} : 3,8; 7; 20,3, что всего на 5% расходится с расчетными.

Глава 4. Применение результатов исследований молекулярных процессов. Результаты исследований могут быть применены для расчетов распределения потоков молекул и их характеристик, проводимости каналов, экранов, ловушек и др., характеристик турбомолекулярных и термомолекулярных вакуумных насосов.

Для расчетов проводимости и распределения потоков молекул используется уравнение

$$U = P^* F_{вх} \cdot V$$

где $F_{вх}$ - площадь входа в каналы, V - объем газа, падающего на единицу площади, P^* - вероятность перехода молекул при $C = 0$. Подстановкой значений P_{12}^* , P_{21}^* , P_{1x}^* , P_{1y}^* можно получить величину проводимости и потоков молекул, проходящих канал без встречи со стенками U'_{12} или, встречающихся с ними U_{1x} , U_{1y} соответственно. Наделяя эти потоки тем или иным признаком, можно получить их распределение.

Разность проводимостей во встречных направлениях дает результирующий поток газа.

$$S = F_{6x} V (P_{12} - P_{21} \sqrt{\frac{T_2 \cdot M_1}{T_1 \cdot M_2}} \varepsilon \cdot K), \quad (5)$$

который может быть получен при выполнении следующих условий:

$$1. P_{12} \cdot F_{6x1} \neq P_{21} F_{6x2} \quad 2. T_1 \neq T_2 \quad 3. M_1 \neq M_2$$

Первое условие выполняется при движении наклонных каналов, обеспечивающих турбомолекулярный процесс откачки, второе условие выполняется нагревом газа на входе или охлаждением его на выходе, что обеспечивает турбомолекулярный процесс откачки. Для выполнения третьего условия требуется на входе и выходе поддерживать газ с различными молекулярными массами. При этом возникает перемещение более легкого газа в сторону с более тяжелым газом.

В практике наибольшее распространение получил турбомолекулярный процесс откачки. Методика расчета этого процесса предусматривает определение эффективной скорости действия $S_{эф}$ и предельного остаточного давления P_{np} на базе известных значений вероятностей P_{12} , P_{21} потока газовыделений Q_2 , проводимости входного патрубка насоса U_{6n} и форвакуумного давления $P_{фв}$

$$S_{эф} = \frac{(S_{max} \frac{K_{max} - P_{фв}/P_{6x}}{K_{max} - 1} - \frac{Q_2}{P_{6x}}) U_{6n}}{S_{max} \frac{K_{max} - P_{фв}/P_{6x}}{K_{max} - 1} - \frac{Q_2}{P_{6x}} + U_{6n}} \quad (6)$$

$$P_{np} = \frac{K_{max} - 1}{K_{max} \cdot Q_2 S_{max}} + \frac{P_{фв}}{K_{max}}$$

$$S_{max} = 2\pi R_1 \ell_1 V (P_{12} \varepsilon_1 - P_{21} \varepsilon_2 \mu)$$

$$K_{max} = \prod_{j=1}^n \frac{P_{12j} \varepsilon_{1j}}{P_{21j} \varepsilon_{2j} \mu} \quad (j=1, 2 \dots n)$$

Здесь ℓ_1 - длина каналов, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - коэффициенты использования рабочих площадей решеток, R_1 - радиус внешней поверхности решетки.

Методика расчета НВТ предусматривает так же определение основных размеров барабанных решеток: радиуса R_1 , длины ℓ_1 и числа каналов α из условия обеспечения требуемой величины S_{max} и необходимой прочности решеток. Оставив уравнения напряжений в бандаже и лопатке и решив их совместно с уравнением (5) полу-

чили следующие формулы для определения R_1 , ℓ_1 , z :

$$R_1 = \left[\frac{S_{\max}}{\frac{2\pi}{1-\lambda} \left(1 - \frac{\lambda}{\beta(1+\mu)^2}\right) V(P_{12}-P_{21}\epsilon) \sqrt{\beta, \frac{1-\mu}{1+\mu}}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\ell_1 = \left[\frac{S_{\max} \sqrt{\beta, \frac{1-\mu}{1+\mu}}}{\frac{2\pi}{1-\lambda} \left(1 - \frac{\lambda}{\beta(1+\mu)^2}\right) V(P_{12}-P_{21}\epsilon)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$z = \frac{2\pi}{40(1-\lambda)} \left[1 - \frac{\lambda}{\beta(1+\mu)^2} \right] \quad (9)$$

Здесь $\beta = \frac{\kappa \gamma V_1^2}{496\tau}$ и $\beta_1 = \frac{896\tau}{3V_1^2 \gamma \kappa}$ — комплексы величины, постоянных при заданных допустимых напряжениях σ_τ , назначенного запаса прочности κ , плотности материала решетки γ и ее окружной скорости V_1 , $\lambda = \ell_0/\ell_p$ — относительная ширина бандажа, μ — относительная толщина решетки.

Проведенный анализ показал, что при увеличении λ радиус решетки R_1 и длина канала ℓ_1 растут, а количество каналов z снижается. При увеличении значения μ радиус R_1 и количество z растут, а длина ℓ_1 уменьшается, что позволяет выбирать желательные соотношения R_1 , ℓ_1 , z . Опробирование методики проведено при расчетах нового насоса НВТ-6300Д с радиальной структурой каналов.

В практике нередки случаи откачки с помощью НВТ различных газов, а так же газов, имеющих повышенную или пониженную температуру. Проведенный в работе анализ этих случаев показал, что с ростом молекулярной массы M газа, $S_{\max}$ на линейном участке зависимости $Q = f(M)$ практически не изменяется, а затем заметно снижается. При этом установлено, что диапазон молекулярных масс, в котором $S_{\max}$ не изменяется, зависит от скорости решеток, чем и объясняется имеющийся разброс опытных данных. При увеличении температуры газа $S_{\max}$ заметно растет, а $K_{\max}$ снижается.

На зависимости $S_{эф} = f(M)$ и $S_{эф} = f(T)$ дополнительно оказывает влияние коэффициент Клаузинга K_λ и величины $K_{\max}$, $K = P_{эф}/P_{бк}$:

$$S_{эф M} = \left[\frac{\sqrt{M}}{A_{бк} K_\lambda d} + \frac{\sqrt{M} K_{\max}}{F_{бк} d (P_{12}-P_{21}\epsilon) (K_{\max} - P_{эф}/P_{бк})} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$S_{эф T} = \left[\frac{1}{A_{бк} K_\lambda b \sqrt{T}} + \frac{K_{\max} - P_{эф}/P_{бк}}{F_{бк} b \sqrt{T} (P_{12}-P_{21}\epsilon) (K_{\max} - 1)} \right]^{-1} \quad (11)$$

Анализ этих зависимостей показал, что при увеличении M до 10 быстрота действия $S_{эф}$ резко растет вследствие роста величины K_{max} , а затем, достигнув максимума при $M = 15+20$, плавно снижается. При значениях $M > 60$ изменение $S_{эф}$ становится незначительным. При увеличении температуры газа $S_{эф}$ так же сначала растет, а затем снижается вследствие уменьшения величины K_{max} .

Приведенные выводы подтверждаются опытными данными.

ВЫВОДЫ

Исследованы процессы молекулярного переноса массы через систему радиальных каналов, состоящей из барабанных решеток, установленных одна в другую с некоторыми радиальными зазорами.

Получены следующие основные результаты:

1) разработана теоретическая модель перехода молекул через каналы РСК, ранее не изученных профилей, с учетом изменения величины и направления скорости при их вращении. Аналитические решения, для определения вероятностей перехода молекул могут быть распространены на каналы различных профилей РСК и ОСК;

2) получены расчетные значения вероятностей перехода молекул через канал, достаточные для анализа распределения потоков молекул и выбора необходимых размеров канала. Для процесса молекулярной откачки газа рекомендован диапазон их оптимальных значений. Достоверность теоретических результатов подтверждена экспериментами, проведенными на специально созданных стендах;

3) показано, что результаты исследований могут быть применены для расчетов распределения потоков молекул и их характеристик, проводимости экранов и ловушек и параметров термомолекулярных и турбомолекулярных насосов. Для последних разработаны инженерные методики расчетов откачных характеристик: эффективной быстроты действия $S_{эф}$, предельного остаточного давления $P_{пр}$ и основных размеров барабанных решеток;

4) установлены единые аналитические зависимости откачных характеристик НВТ от проводимости входного патрубка насоса $U_{вн}$, потока газовыделений Q_2 , вероятностей перехода молекул через канал P_{12} , P_{21} , форвакуумного давления $P_{фв}$, температуры T_2 и молекулярной массы газа;

5) с использованием результатов исследований предложены новые конструкции турбомолекулярных насосов и ловушек, на которые

получено 12 авторских свидетельств на изобретения, разработаны насосы МВН-ИтБК, НВТ-1000, НВТ-6300Д, отраслевой стандарт ОСТ 26-04-908-73 "Насосы вакуумные турбомолекулярные. Типы и основные параметры".

Содержание основных положений диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Тузанкин Ю.М., Орешникова Л.П. Особенности теории и расчета турбомолекулярных вакуумных насосов с радиальной системой каналов. - В кн.: Молекулярная газовая динамика. Новосибирск, Институт теплофизики СО АН СССР, 1980, с.185-190.
2. Тузанкин Ю.М. Влияние температуры на свободно-молекулярное течение газа во вращающемся канале. - Тепло-и массообмен в химической технологии, 1980, вып.8, с.44-48.
3. Тузанкин Ю.М., Беляев Л.А. Результаты экспериментального исследования радиального турбомолекулярного насоса. - В кн.: Физика и техника вакуума. Казань, КГУ, 1974, с.256-261.
4. Тузанкин Ю.М., Орешникова Л.П. Переход молекул через зазор между вращающимися цилиндрами. - Тепло-и массообмен в химической технологии, Казань, 1979, вып.7, с.71-73.
5. Тузанкин Ю.М., Беляев Л.А. Первый промышленный образец радиального турбонасоса. - В кн.: Физика и техника вакуума. Казань, КГУ, 1974, с.251-255.
6. Тузанкин Ю.М. Методика определения основных размеров барабанных решеток. Тез. докл. на симпозиум "Состояние и перспективы разработки и производства новых видов вакуумного оборудования". М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981, с.44-46.
7. Тузанкин Ю.М., Беляев Л.А., Угревский А.В. Молекулярные вакуумные насосы. М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975, -55 с.
8. Тузанкин Ю.М. Зависимость скорости действия НВТ от рода откачиваемого газа. Тез. докл. на симпозиум "Состояние и перспективы разработки новых видов вакуумного оборудования". М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981, с. 59-61.
9. А.С. 174314 (СССР) Молекулярный вакуумный насос / Тузанкин Ю.М., Беляев Л.А. Опубл. Б.И. 1965, № 17.
10. А.С. 245966 (СССР) Двухпоточный вакуумный турбомолекулярный насос / Тузанкин Ю.М. Опубл. Б.И. 1969, № 20.
11. А.С. 233757 (СССР) Турбомолекулярный вакуумный насос / Тузанкин Ю.М., Беляев Л.А. Опубл. Б.И., 1976, № 40.

Л-86655 от 19.10.81г. Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз. Зак. 1364.
Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана.