

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**На правах рукописи**

**ОЧКОВ Андрей Андреевич**

**РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ МОЛЕКУЛЯРНЫМ ВАКУУМНЫМ НАСОСОМ,  
АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ  
МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ В ТРЕБУЕМОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э.Баумана).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
МГТУ им.Н.Э.Баумана  
Демихов Константин Евгеньевич.

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие:

Защита диссертации состоится «    »    201    г. в    часов    минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экз., заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.16

кандидат технических наук, доцент

\_\_\_\_\_ М.А. Колосов

## **Введение**

### **Актуальность исследования**

В последние годы турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН) привлекают к себе все больше внимания исследователей в различных областях науки и техники. Это является вполне обоснованным, так как высоковакуумные механические насосы (ВМН), к которым относятся ТМН, обладают существенными преимуществами перед целым рядом других аналогичных средств откачки. Прежде всего это связано с тем, что современные ТМН отличаются оптимальными характеристиками и параметрами. Это стало возможным в результате того, что к настоящему времени создана достаточно стройная теория рабочих процессов, имеющих место в ТМН. Весомый вклад в это внесли исследования, проводимые в течение многих лет в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре вакуумной и компрессорной техники. В результате разработаны методы расчета различных конструкций современных ТМН, созданы и исследованы оригинальные ВМН на базе схем турбомолекулярных и молекулярных вакуумных насосов, получены современные рекомендации по проектированию высоковакуумных механических насосов с улучшенными характеристиками.

В настоящее время возникла проблема оптимизации турбомолекулярных вакуумных насосов, особенно с комбинированной проточной частью, работающих в требуемом диапазоне давлений при различных режимах течения газа. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре вакуумной и компрессорной техники разработан метод расчета оптимальных параметров межлопаточных каналов колес ТМН, однако он не позволяет обеспечить процесс оптимизации в требуемом широком диапазоне рабочих давлений насоса и, тем более, при различных режимах течения газа.

Соискателем разработаны комплексный алгоритм и программа расчета оптимальной откачной характеристики ТМН с комбинированной проточной частью в требуемом широком диапазоне давлений при различных режимах течения газа. Разработана универсальная математическая модель процесса откачки газа как цилиндрическим, так и дисковым молекулярным вакуумным насосом.

**Объектом исследования** являются высоковакуумные механические насосы.

**Предметом исследования** является процесс течения газа в проточной части высоковакуумных механических насосов, работающих в требуемом широком диапазоне давлений всасывания.

**Целью работы** является решение задачи оптимизации основных параметров проточной части высоковакуумных механических насосов, работающих в требуемом диапазоне давлений всасывания.

**Задачи исследования:**

1. Разработка универсальной математической модели процесса откачки газа цилиндрическим и дисковым молекулярными вакуумными насосами.
2. Разработка алгоритма и программы расчета оптимальных параметров проточной части высоковакуумных механических насосов в требуемом широком диапазоне давлений.
3. Определение наиболее эффективного диапазона рабочих давлений турбомолекулярного вакуумного насоса.

**Научная новизна**

1. Разработана универсальная математическая модель, описывающая рабочий процесс откачки газа молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне изменения откачных параметров, которая позволяет рассчитать параметры каналов как дисковых, так и цилиндрических молекулярных вакуумных насосов.
2. Произведена оценка эффективности влияния различных факторов на основные характеристики цилиндрических и дисковых молекулярных вакуумных насосов.
3. Разработаны алгоритм и программа расчета оптимальных параметров проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса в требуемом широком диапазоне давлений при различных режимах течения газа.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что:

1. Разработаны универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом, алгоритм и программа расчета оптимальных параметров проточной части ТМН, что позволяет создавать высоковакуумные механические насосы, обеспечивающие заданные параметры откачки.
2. Исследовано влияние основных параметров проточной части МВН на его откачные характеристики. Полученные результаты использовались при совершенствовании рабочих процессов, протекающих в проточной части высоковакуумных механических насосов.
3. Разработаны практические рекомендации для проектирования оптимальных высоковакуумных механических насосов, работающих в требуемом диапазоне давлений.
4. Результаты работы используются компанией ООО «Мегатехника Мск» при проектировании высоковакуумных механических насосов и исследовании рабочих процессов, протекающих в проточной части высоковакуумных

механических насосов, внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актами о внедрении.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях:

1. Пятая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». (г. Москва. 2012)
2. Шестая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». (г. Москва. 2013)
3. IX Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология». (Москва, КВЦ «Сокольники», 15-17 апреля 2014г.)
4. Восьмая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». (г. Москва. 2015)

### **Публикации**

Основные научные результаты диссертации отражены в 10 научных статьях, в том числе в 8 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

### **Положения, выносимые на защиту**

Универсальная математическая модель откачки газа молекулярным вакуумным насосом. Оценка влияния параметров проточной части МВН на его основные характеристики. Алгоритм и программа расчета оптимальных параметров проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса в требуемом диапазоне давлений. Определение эффективного диапазона рабочих давлений турбомолекулярного вакуумного насоса.

### **Личный вклад соискателя**

Все исследования, представленные в диссертационной работе, проведены лично соискателем совместно с научным руководителем в процессе работы над материалом диссертации. Заимствованный материал в диссертации обозначен ссылками.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, приложения с кодами разработанных программ расчета. Диссертационная работа изложена на 101 странице, содержит 33 иллюстрации и 11 таблиц. Библиография включает 92 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и объект исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** дан анализ научных работ, посвященных исследованиям разработанных математических моделей процессов откачки газа молекулярными вакуумными насосами, методов расчета откачных параметров МВН, методов расчета оптимальных параметров проточной части ТМН. Выявлено, что не создано универсальных математических моделей откачки газа разными типами МВН.

Разработанные методы расчета оптимальных параметров проточной части ТМН позволяют произвести процесс оптимизации при работе турбомолекулярного вакуумного насоса при фиксированном давлении газа на стороне всасывания.

Отмечено, что на современном этапе развития ВМН создание универсальной математической модели процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом является актуальной задачей. Также отмечено, что не решена задача оптимизации высоковакуумных механических насосов, обеспечивающих требуемые параметры откачки в требуемом диапазоне рабочих давлений.

На основании проведенного анализа известных научных работ сформулированы цели диссертации, обоснована ее актуальность и значимость для развития вакуумной техники, поставлены задачи исследования, отмечена научная новизна проведенных исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке универсальной математической модели откачки газа разными типами молекулярных вакуумных насосов.

На Рис. 1 приведена расчетная конструктивная схема поперечного разреза цилиндрического МВН.

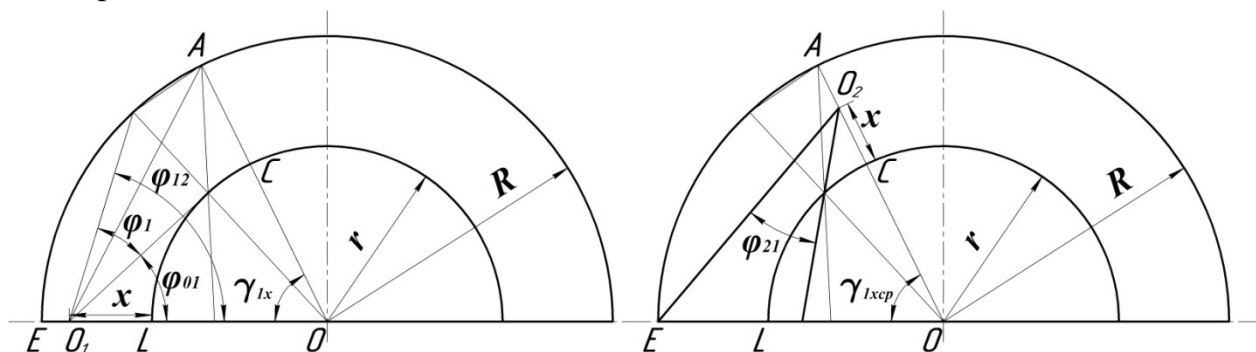


Рис. 1.

Расчетная схема переноса молекул газа каналом цилиндрического МВН в направлении откачки (а) и со стороны нагнетания (б).

При разработке данной математической модели были приняты следующие допущения:

- режим течения газа – молекулярный;
- задача двумерная;
- тепловые скорости молекул выбираются в соответствии с законом распределения тепловых скоростей молекул газа Максвелла-Больцмана;
- при переходе через рассматриваемую ступень насоса считается, что молекула прошла через нее в определенном направлении, если она после не более чем двух соударений со стенками не вернется через рассматриваемый участок входа в ступень;
- при взаимодействии с поверхностью молекулы отражаются преимущественно по нормали в соответствии с диффузным законом отражения;
- коэффициент аккомодации при взаимодействии молекул с поверхностями насоса равен единице.

При этом рассматривается традиционная схема МВН с постоянной высотой канала.

С учетом принятых допущений можно заключить, что из общего числа молекул, прошедших через некоторое сечение канала  $EL$  (Рис. 1,а) в окрестности произвольной точки  $O_l$ , не вернутся через него после взаимодействия со стенками, ограничивающими канал, те молекулы, направление движения которых заключено в пределах угла  $\varphi_{12} = \varphi_{l1} + \varphi_{0l1}$ .

Изменяя значение координаты точки входа на сторону всасывания  $EL$  от  $r$  до  $R$ , рассчитывается среднее значение угла  $\varphi_{12cp}$ .

$$\varphi_{12cp} = \int_r^R \varphi_{12x} dx.$$

Тогда вероятность того, что молекулы пройдут через данную ступень в направлении откачки, определяется следующей зависимостью

$$K_{12} = \frac{\varphi_{12cp}}{\pi}.$$

Угловая протяженность участка ротора, с которым могут непосредственно взаимодействовать (с учетом принятых допущений) молекулы газа, вошедшие в канал в окрестности точки  $O_l$  сечения  $EL$ , характеризуется углом  $\gamma_{1xcp}$ . Его величина определяется, исходя из геометрических соотношений канала МВН, рассмотрев различные положения точки  $O_l$  в пределах отрезка  $EL$ . Данный угол также характеризует положение сечения нагнетания рассматриваемой ступени.

На основании принятых допущений можно также заключить, что из числа молекул, попавших во внутренний объем ступени со стороны нагнетания в

окрестности точки  $O_2$  сечения  $AC$  (Рис. 1,б), перейдут на сторону всасывания (отрезок  $EL$ ) те молекулы, направление движения которых заключено в пределах угла  $\varphi_{21}$ , который характеризует прохождение молекул со стороны нагнетания ступени МВН на сторону всасывания в зависимости от геометрии насоса и от составляющей  $u/v_n$  (отношение окружной скорости ротора к наиболее вероятной скорости теплового движения молекул газа).

Изменяя значение координаты точки входа на сторону нагнетания  $AC$  от  $r$  до  $R$ , рассчитывается среднее значение угла  $\varphi_{12cp}$ .

$$\varphi_{21cp} = \int_r^R \varphi_{21x} dx.$$

Вероятность того, что молекулы пройдут через данную ступень со стороны нагнетания на сторону всасывания, определяется зависимостью

$$K_{21} = \frac{\varphi_{21cp}}{\pi}.$$

Зная  $K_{12}$  и  $K_{21}$ , можно рассчитать основные характеристики рассматриваемой условной ступени молекулярного вакуумного насоса, протяженность которой характеризуется углом  $\gamma_{1xcp}$ . К ним относятся:  $K_{max}$  – вероятность перехода молекул через ступень МВН,  $\tau_{max}$  – степень повышения давления ступени МВН.

$$K_{max} = K_{12} - K_{21} \frac{F_2}{F_1},$$

$$\tau_{max} = \frac{K_{12}}{K_{21}} \frac{F_2}{F_1},$$

где  $F_1$ ,  $F_2$  – площади входного и выходного сечений ступени МВН соответственно.

Максимальное значение быстроты действия цилиндрического МВН рассчитывается по формуле

$$S_{max} = \frac{1}{4} v_a K_{max} R b (1 - \lambda)$$

где  $v_a$  – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул,  $b$  – ширина рабочего канала,  $\lambda = r/R$ ,  $K_{max}$  – вероятность перехода молекул через первую ступень МВН. Степень повышения давлений цилиндрического МВН рассчитывается по формуле

$$\tau = \prod_{i=1}^n \tau_{max i},$$

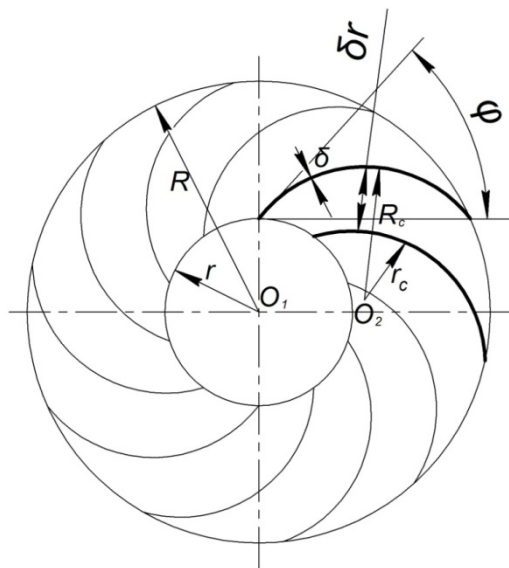


где  $\tau_{\max i}$  – максимальная степень повышения давлений  $i$ -ой ступени  $n$  – число условных ступеней на всей протяженности рабочего канала МВН, характеризующимися углом  $\gamma_{\text{иср}}$ .

Разработанная математическая модель позволяет также описать процесс откачки газа дисковыми ступенями молекулярного вакуумного насоса при условии, что:

- спиралевидный канал МВН представлен в виде канала цилиндрического МВН, протяженность которого равна углу закрутки спирали;
- стенки, ограничивающие спиралевидный канал, эквидистантны в пределах каждой условной ступени.

Расчетная схема дискового МВН представлена на Рис. 2.



**Рис. 2.**

Расчетная схема дискового МВН.

( $\delta r = R_c - r_c$  - ширина канала МВН,  $\delta$  – толщина стенки, ограничивающей канал,  $r, R$  – соответственно внутренний и внешний радиусы диска,  $\varphi$  – угол закрутки спирали)

Рабочий канал дисковой ступени представлен в виде рабочего канала цилиндрической молекулярной ступени.

На основании проведенного анализа конструкций дисковых МВН относительный радиус  $\lambda = r/R$  выбирался в диапазоне 0.65-0.7, а протяженность рабочего канала цилиндрического МВН выбиралась в пределах угла закрутки спирали дискового МВН.

Быстрота откачки одного колеса дисковой ступени рассчитывается по формуле

$$S_{\max} = K_{\max} \pi m h \frac{R^2 - r^2}{2\varphi}$$

где  $h$  – высота рабочего канала,  $m$  – угловая скорость,  $\varphi$  – угол закрутки спирали. Степень повышения давления, создаваемая одним диском, будет рассчитываться по формуле:

$$\tau_{\max} = \tau \frac{\varphi}{\gamma_{1хсп}}$$

где  $\tau$  – степень повышения давления одной условной ступени,  $\gamma_{1хсп}$  – угол, определяющий протяженность условной ступени,  $\varphi$  – угол закрутки спирали.

Для описания процесса откачки газа МВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа использовалась математическая модель, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре вакуумной и компрессорной техники. В основу разработанной модели положены следующие предпосылки:

- в проточной части насоса отмечается молекулярно-вязкостный режим течения газа;
- в рассматриваемом объеме молекулы подразделяются на три группы: молекулы, не испытывающие столкновений между собой; молекулы, частота столкновений которых с поверхностями, ограничивающими межлопаточный канал, сопоставима с частотой межмолекулярных взаимодействий; молекулы преимущественно испытывающие столкновения между собой.

В установившемся режиме работы насоса результирующий поток молекул  $Q$ , проходящий через рабочий канал в направлении откачки, определяется как разность прямого потока  $Q_1$ , переносимого со стороны всасывания на сторону нагнетания, и обратного потока  $Q_2$ :  $Q = Q_1 - Q_2$ .

Используя понятие удельных потоков, эту зависимость можно записать в следующем виде:

$$KN_1 = K_{12}N_1 - K_{21}N_2$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий результирующий поток молекул, переносимый через рабочий канал МВН в прямом направлении;  $N_1$  – число молекул, попадающих на единичную площадку в торцевом сечении на стороне всасывания рабочего канала МВН;  $K_{12}$  – коэффициент, характеризующий возможность перехода молекул, попавших в канал на стороне всасывания, в направлении откачки;  $K_{21}$  – коэффициент, характеризующий вероятность переноса молекул, попавших в канал на стороне нагнетания, в направлении, обратном откачке;  $N_2$  – число молекул, попадающих на единичную площадку канала со стороны нагнетания ступени.

Тогда в соответствии с принятыми допущениями поток молекул  $Q_1$  может быть представлен в виде

$$K_{12}N_1 = K_1'N_1 + K_1''N_1 + K_1'''N_1$$

где  $K_1'$ ,  $K_1''$ ,  $K_1'''$  - коэффициенты, характеризующие потоки со стороны всасывания на сторону нагнетания молекул, относящихся к соответствующей группе, или

$$K_{12} = K_1' + K_1'' + K_1'''$$

Аналогично для обратного потока

$$K_{21}N_2 = K_2'N_2 + K_2''N_2 + K_2'''N_2$$

или

$$K_{21} = K_2' + K_2'' + K_2'''$$

Здесь  $K_2'$ ,  $K_2''$ ,  $K_2'''$  - коэффициенты, характеризующие потоки соответствующих классов, переносимые в направлении со стороны нагнетания на сторону всасывания условной ступени МВН.

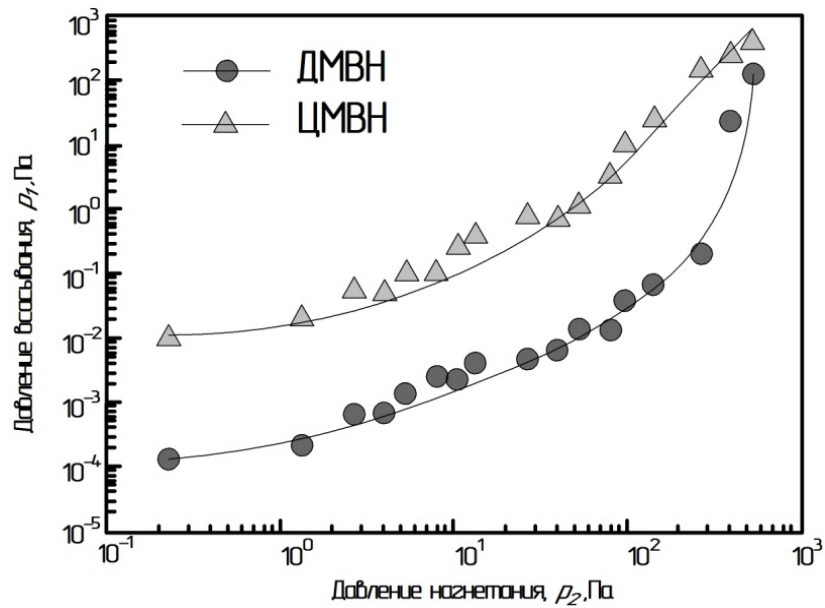
В известной математической модели процесса откачки газа цилиндрическим МВН коэффициенты  $K_{12}$ ,  $K_{21}$  определяются с использованием зависимостей для расчета вероятности перехода молекул через рабочие каналы насоса ТМН с введением корректирующих коэффициентов.

Данная математическая модель процесса откачки газа молекулярными вакуумными насосами предусматривает применение полученных в настоящей работе зависимостей для расчета значений вероятностей перехода молекул газа через каналы МВН.

Для оценки точности разработанной математической модели процесса откачки газа цилиндрическим и дисковым МВН было проведено сравнение полученных расчетных данных с результатами эксперимента, проведенного другими исследователями.

Графическое сравнение экспериментальных (показаны характерными знаками: треугольниками – для цилиндрического МВН, кругами – для дискового МВН) и расчетных (соответствующие графики) с использованием разработанной математической модели представлено на Рис. 3.

Анализируя данные, полученные при сравнении, можно заключить, что расхождения расчета по разработанной математической модели с экспериментом не превышают 10-20 %.



**Рис. 3.**

Зависимость давления на стороне всасывания дискового (ДМВН) и цилиндрического (ЦМВН) насоса от давления нагнетания.

В третьей главе рассматриваются разработанные алгоритм и программа расчёта турбомолекулярных вакуумных насосов, позволяющие определять оптимальные размеры отдельных рабочих колёс и проточной части насоса в целом при работе его в требуемом диапазоне давлений всасывания. Управляющими параметрами при расчёте являются:  $\alpha$ ,  $a/b$ ,  $\lambda$  – угол наклона, относительная ширина и относительная высота межлопаточного канала соответственно,  $D_2$  – величина наружного диаметра колёс. Комплексным критерием оптимальности выбран условный объём проточной части:

$$A_{\min} = \frac{\pi}{4} D_{2onm}^2 N_{onm}$$

где  $D_{2onm}$  – диаметр рабочего колеса,  $N_{onm}$  – число колёс в пакете, обеспечивающие минимальный условный объём проточной части.

Как показали проведенные расчеты, при изменении давления на стороне всасывания происходит существенное изменение оптимального значения условного объёма. При этом каждому значению давления соответствуют различные значения  $A_{\min}$ . Для компенсации такого влияния необходимо выбирать насос с быстротой откачки  $S_{n2}$  больше заданной в техническом задании быстроты откачки  $S_{n1}$ . Задача оптимизации заключается в минимизации разности  $S_{n2} - S_{n1} = \Delta S$ .

С целью минимизации  $\Delta S$  и обеспечения быстроты откачки ТМН в заданном диапазоне давлений всасывания был предложен вариант решения данной проблемы, связанный с определением оптимальных параметров

форвакуумного насоса (ФН), работающего совместно с данным турбомолекулярным вакуумным насосом.

Разработаны программа расчета оптимальных значений основных параметров проточной части ТМН и программа расчета оптимальных характеристик форвакуумных насосов, позволяющих обеспечить заданные параметры откачки на стороне всасывания ТМН, работающих в требуемом диапазоне давлений всасывания. Критерием оптимальности при этом выбрано значение быстроты откачки ФН.

На начальном этапе вводятся исходные данные: требуемый диапазон рабочих давлений на стороне всасывания ТМН ( $p1...p2$ ), начальное значение давления всасывания и быстроты откачки форвакуумного насоса ( $p\phi0, S\phi0$ ), быстрота действия ТМН ( $S_H$ ).

На следующем шаге выполняется расчет оптимальных параметров проточной части ТМН на заданные параметры, приняв определенные значения шагов изменения быстроты откачки и давления всасывания форвакуумного насоса ( $dS\phi, dp\phi$ ).

Основным этапом разработанной программы расчета является определение оптимальных параметров форвакуумного насоса для заданного диапазона рабочих давлений ТМН. Начиная с исходных значений быстроты откачки и давления ФН выполняется расчет достигаемого при этом давления всасывания ТМН  $p$ .

Если  $p < p1$ , расчет считается завершенным, в противном же случае производится увеличение быстроты откачки ФН на заданный шаг ее изменения, если по-прежнему  $p > p1$ , то уменьшается давление всасывания ФН на величину заданного шага во всем принятом диапазоне его изменения. При этом значение быстроты откачки ФН остается неизменным до тех пор, пока давление ФН не выйдет за границы диапазона его изменения, заданного в начале программы.

Параметры форвакуумного насоса для давления  $p2$  на стороне всасывания ТМН рассчитывается аналогичным образом.

**В четвертой главе** проведена оценка влияния различных параметров на основные характеристики цилиндрических и дисковых МВН. Разработана программа расчета оптимальных параметров проточной части цилиндрического МВН. При оптимизации в качестве управляющих параметров были выбраны:  $\alpha$  – угол наклона рабочего канала,  $\lambda$  – относительная высота рабочего канала,  $N_{зак}$  – число заходов спирали. Критерий оптимальности – объем проточной части.

На основании расчетов, проведенных с помощью разработанной программы получены следующие рекомендации: для обеспечения минимального значения выбранного критерия оптимальности (объем проточной части)

необходимо выбирать значения управляемого параметра  $\lambda$  в диапазоне 0.85 ... 0.95,  $\alpha - 75 \dots 80^\circ$ ,  $N_{зах} - 3$ .

Была разработана программа расчета проточной части с оптимальными параметрами дискового МВН. Критерием оптимальности был выбран объем проточной части МВН. При оптимизации в качестве управляющих параметров были выбраны:  $n$  – число заходов спирали колеса МВН,  $\varphi$  – угол закрутки спирали колеса МВН.

Анализируя результаты расчета, можно сделать вывод, с целью обеспечения повышенных значений быстроты откачки следует уменьшать величины углов закрутки спирали, в то время как для увеличения создаваемых значений степени повышения давлений углы закрутки должны возрастать. Для каждого конкретного случая необходимо рассчитывать оптимальные параметры с использованием разработанной программы расчета.

**Пятая глава** посвящена определению оптимальных параметров проточной части ТМН в требуемом диапазоне давлений с использованием эмпирической зависимости степени повышения давлений  $\tau$ , создаваемой колесом ТМН, от вероятности перехода молекул через межлопаточный канал ТМН  $K$ .

$$\tau_i = ae^{bK_i} + c,$$

где  $\tau_i$  – максимальная величина рабочего отношения давлений, создаваемое произвольным колесом;  $K_i$  – коэффициент, характеризующий полезную быстроту откачки данного колеса;  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты.

При этом :

$$a = \frac{\tau_{\max n} - 1}{1 - e^{bK_{\max 1}}},$$

$$c = \frac{1 - \tau_{\max n} e^{bK_{\max 1}}}{1 - e^{bK_{\max 1}}},$$

где  $K_{\max 1}$  – коэффициент, характеризующий максимальное значение быстроты откачки, создаваемое первым колесом в пакете (на стороне всасывания),  $\tau_{\max n}$  – максимальное значение степени повышения давлений, создаваемое рабочим колесом, расположенным на стороне нагнетания пакета.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, при заданных величинах удельных газовыделений с поверхностей насоса минимизация числа колес в проточной части ТМН, обеспечивающего заданные параметры откачки, позволяет существенно уменьшить массо-габаритные характеристики насоса. При выборе коэффициента  $K_1$ , характеризующего

эффективность откачки первого колеса в пакете проточной части и, следовательно, насоса в целом, необходимо учитывать особенности эксплуатации разрабатываемого ТМН (обеспечение минимальных значений давления всасывания). В случае, когда отсутствуют четкие доводы в пользу одного из этих приоритетов, рекомендуется выбирать значение коэффициента  $K_I=0,6 \dots 0,7$ .

**В шестой главе** была рассмотрена проблема выбора диапазона давлений газа, создаваемого на стороне всасывания, являющегося наиболее приемлемым и эффективным для данного вида насоса с учетом таких факторов, как массогабаритные характеристики и требуемые откачные параметры (зависимость быстроты откачки  $S_n$  от давления всасывания:  $S_n=f(p_{вс})$ ). Обязательным условием при этом является обеспечение быстроты откачки не меньше заданного значения  $S_p$  в определенном диапазоне давлений  $p_{вс1}-p_{вс2}$ .

Как показали проведенные исследования, возможно превышение величины  $S_p$  на определенном участке откачной характеристики с тем, чтобы обеспечить быстроту откачки ТМН, заданную по условию, во всем заданном диапазоне давлений газа на стороне всасывания. Следует отметить, что разработанная программа расчета обеспечивает минимизацию величины условного объема проточной части  $A$ , а также минимальное отклонение максимального значения быстроты откачки  $S_n$  (соответствующей откачной характеристике) от заданной величины  $S_p$ .

Как показали результаты расчета, при увеличении наибольшего в диапазоне давления газа (от  $10^{-2}$  до  $10$  Па) величина необходимой максимальной быстроты откачки  $S_n$  (для обеспечения номинального значения  $S_p$  во всем диапазоне) возрастает примерно в 10 раз, минимальная величина условного объема проточной части увеличивается в 17-20 раз. Это вызвано нарушением молекулярного режима течения газа в значительной части объема проточной части ТМН и необходимостью компенсировать ухудшение параметров откачки рабочими колесами увеличением геометрических размеров проточной части. Причем для насосов с большей быстротой действия этот процесс начинается уже при давлении больше  $10^{-2}$  Па, в то время, как для малых насосов при  $p>10^{-1}$  Па.

При необходимости реализации поставленного условия в области достаточно низких давлений газа ( $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Па) возникает проблема, связанная с увеличением потоков газа на стороне всасывания в результате газовыделений с внутренних поверхностей насоса. Это может привести к необходимости повышения параметров откачки рабочих колес (например, за счет увеличения размеров рабочих колес), особенно для насосов с относительно малой быстротой действия.

В результате проведенных исследований можно заключить, что наиболее эффективным диапазоном рабочих давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярных вакуумных насосов с оптимальными характеристиками можно считать:  $p_{вс}=10^{-6} \dots 10^{-1} (10^{-2})$  Па.

Если необходимо расширить диапазон создаваемых в откачиваемом объеме давлений, необходимо уменьшать величины удельных газовыделений с поверхностей ТМН. Также можно предусматривать использование в совокупности с ТМН других видов средств откачки, отличающихся эффективной работой при соответствующих значениях давления газа, например, молекулярных вакуумных насосов в составе дополнительной ступени комбинированного турбомолекулярного вакуумного насоса. Возможно также совместное использование дисковых и цилиндрических МВН в составе молекулярной ступени комбинированного ТМН. Это позволит еще больше расширить эффективный диапазон рабочих давлений турбомолекулярного насоса.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Разработана универсальная математическая модель, описывающая рабочий процесс откачки газа молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне изменения откачных параметров, которая позволяет рассчитать параметры каналов как дисковых, так и цилиндрических молекулярных вакуумных насосов. Точность разработанной ММ проверена сопоставлением с экспериментальными данными, максимальная погрешность расчета не превысила 10-20%.
2. Произведена оценка эффективности влияния различных факторов на основные характеристики молекулярных вакуумных насосов: цилиндрического и дискового. Выданы рекомендации по проектированию. С целью обеспечения минимального условного объема проточной части цилиндрического МВН угол наклона спирали  $\alpha$  необходимо выбирать в диапазоне  $75-85^\circ$ , относительный радиус МВН  $\lambda$  – в диапазоне 0.85-0.95, число заходов спирали – 3. С целью обеспечения повышенных значений скорости откачки дискового МВН следует уменьшать величины углов закрутки спирали, в то время как для увеличения создаваемых значений степени повышения давлений углы закрутки должны возрастать.
3. Разработаны алгоритм и программа расчета оптимальных параметров проточной части высоковакуумных механических насосов в требуемом диапазоне давлений. Показано, что эффективный диапазон рабочих давлений газа на стороне всасывания ТМН  $10^{-6} \dots 10^{-1}$  Па. Разработана программа расчета,



позволяющая определить минимальные параметры форвакуумного насоса, обеспечивающего работу ТМН в заданном диапазоне давлений.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Демихов К. Е., Очков А. А. Математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне давлений // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 128–136. (0,563 п.л. / 0,282 п.л.)
2. Демихов К.Е., Очков А.А.. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. №7 (7) С. 21-24. (0,25 п.л. / 0,125 п.л.)
3. Демихов К.Е., Очков А.А., Цакадзе Г.Т. Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. №5 (116). С. 98-103. (0,375 п.л. / 0,188 п.л.)
4. Демихов К.Е., Очков А.А. Определение оптимальных параметров проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. №6 (105). С. 121-129. (0,563 п.л. / 0,282 п.л.)
5. Демихов К.Е., Очков А.А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016. №5 (110). С. 89-95. (0,375 п.л. / 0,188 п.л.)
6. Демихов К.Е., Очков А.А. Особенности выбора форвакуумного насоса для турбомолекулярного вакуумного насоса, обеспечивающего требуемые параметры откачки. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016. №6 (111). С. 89-95. (0,375 п.л. / 0,188 п.л.)
7. Демихов К.Е., Очков А.А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). С. 1-8. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)
8. Демихов К.Е., Очков А.А. Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. №6 (117). С. 134-143. (0,625 п.л. / 0,313 п.л.)
9. Демихов К. Е., Очков А. А., Полежаев А. Влияние различных параметров проточной части цилиндрического молекулярного вакуумного насоса на его характеристики // Машины и Установки: проектирование, разработка и

эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 3. С. 1–8. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

10. Демихов К.Е., Очков А.А. Оценка эффективности влияния основных конструктивных параметров проточной части дискового молекулярного вакуумного насоса на его характеристики в широком диапазоне давлений // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. №2. С. 25-34. (0,625 п.л. / 0,313 п.л.)

11. Демихов К.Е., Очков А.А. Оптимизация параметров турбомолекулярных вакуумных насосов в широком диапазоне давлений // Сборник докладов пятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. 2012. С. 76-78. (0,188 п.л. / 0,094 п.л.)

12. Демихов К.Е., Очков А.А. Программа расчета оптимальных параметров проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов в широком диапазоне давлений // Сборник докладов шестой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. 2013. С. 102-106. (0,313 п.л. / 0,156 п.л.)

13. Демихов К.Е., Очков А.А. Расчет оптимальных параметров турбомолекулярного вакуумного насоса в широком диапазоне давлений // Сборник докладов IX Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». Москва. КВЦ «Сокольники». 15-17 апреля 2014 г. С. 144-147. (0,25 п.л. / 0,125 п.л.)

14. Демихов К.Е., Очков А.А. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью в широком диапазоне давлений // Сборник докладов восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2015. С. 618-620. (0,188 п.л. / 0,094 п.л.)