

На правах рукописи

СВИЧКАРЬ Елена Владимировна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА  
ОТКАЧКИ ГАЗА И МЕТОДА РАСЧЕТА ОТКАЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА  
В МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и  
пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2017

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: кандидат технических наук, доцент  
МГТУ им.Н.Э.Баумана  
Никулин Николай Константинович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
доцент Никитченко Юрий Алексеевич,  
ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»

кандидат технических наук,  
Ромочкин Юрий Геннадиевич  
начальник сектора  
ФГУП «ВЭИ им. В.И. Ленина»

Ведущее предприятие: ОАО «Научно-исследовательский  
институт вакуумной техники  
им. С.А. Векшинского»

Защита диссертации состоится «29» марта 2017 г. в 14 часов 30 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 «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент

\_\_\_\_\_ М.А. Колосов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования**

Проблема обеспечения безмасляной откачки вакуумных систем определяется многообразием технологических процессов, проводимых в условиях вакуума. Современные технологические процессы в различных отраслях промышленности выдвигают ряд требований к вакуумному оборудованию, обеспечивающему качественное выполнение этих процессов. Среди этих требований безмасляность процесса откачки и защита рабочей камеры от возможности попадания загрязняющих веществ из средств откачки. При этом вакуумное оборудование должно обеспечивать требуемые откачные параметры, должно быть простым с точки зрения эксплуатации, экономичным (во время его покупки и дальнейшей эксплуатации), компактным. Так или иначе, большинство существующих насосов способны обеспечить данные требования, но не абсолютно все. В связи, с чем на данном этапе развития вакуумной техники мировые производители вакуумных насосов и вакуумных систем стремятся совершенствовать существующие и создавать новые системы откачки, которые будут иметь лучшие характеристики, станут технологичнее, компактнее, дешевле, проще в эксплуатации.

Автором диссертации на основе анализа основных принципов работы высоковакуумной безмасляной системы откачки в зависимости от условий эксплуатации и конструкций современных вакуумных насосов, разработан молекулярно – вязкостный вакуумный насос (МВВН), который является самостоятельным средством откачки. Молекулярно–вязкостная проточная часть насоса может быть использована в качестве альтернативной замены молекулярных ступеней комбинированного ТМН. МВВН способен обеспечить откачку вакуумных установок в диапазоне давлений от  $10^{-5}$  Па до  $10^5$  Па с быстротой действия от  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с до 1 м<sup>3</sup>/с, а в составе форвакуумных ступеней комбинированного турбомолекулярного насоса (ТМН) в диапазоне от  $10^{-8}$  Па до  $10^5$  Па. Применение молекулярно-вязкостных проточных частей насоса в качестве форвакуумных ступеней комбинированных ТМН позволяет увеличить быстроту действия форвакуумной части насоса, расширить диапазон давлений насоса в целом и значительно упростить технологию изготовления и сборки вакуумного насоса.

На данный момент МВВН является новой, современной разработкой и не производится ни в одной из стран мира. Соответственно отсутствуют методы расчета данного типа вакуумного насоса в разных диапазонах давлений.

**Объектом исследования** является молекулярно-вязкостный вакуумный насос.

**Предметом исследования** является исследование течения газа в проточной части МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

**Цель работы** состоит в теоретическом исследовании течения газа в проточной части молекулярно–вязкостного вакуумного насоса и разработке метода расчета откачных параметров молекулярно–вязкостного вакуумного насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.

**Задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель процесса откачки газа проточной частью молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.
2. Создать метод расчета откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.
3. Провести исследование влияния геометрических и динамических параметров на откачные характеристики молекулярно-вязкостного вакуумного насоса.
4. Определить коэффициенты скольжения и обмена количеством движения на рабочих поверхностях каналов молекулярно-вязкостного вакуумного насоса.
5. Разработать рекомендации для проектирования молекулярно-вязкостных вакуумных насосов.

**Научная новизна**

1. Впервые разработана математическая модель процесса откачки газа проточной частью МВВН в молекулярно – вязкостном режиме течения газа.
2. Впервые разработан метод расчета откачных параметров МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа.
3. Впервые исследовано влияния геометрических и динамических параметров на откачные характеристики проточных частей МВВН.
4. Впервые получены результаты по обоснованию выбора формы и геометрических размеров каналов проточной части МВВН, позволяющие обеспечить необходимую откачную характеристику насоса.
5. Полученные результаты исследования впервые позволили разработать конструкции МВВН не имеющие аналогов в мировой практике. Молекулярно – вязкостные проточные части насосов различных форм защищены патентами РФ на полезную модель RU 164000 U1 «Молекулярно – вязкостная проточная часть» и RU 166526 U1 «Молекулярно – вязкостная проточная часть вакуумного насоса». Конструктивные схемы МВВН защищены заявками на патенты РФ на полезную модель № 2016149254, № 2016149256 от 15.12.2016 и заявками на патенты РФ на изобретение № 2016149250, № 2016149252 от 15.12.2016.

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

1. Разработана математическая модель процесса откачки газа и метод расчета откачных параметров проточной части МВВН, которые позволяют проектировать МВВН и комбинированные ТМН с молекулярно–вязкостной проточной частью в качестве форвакуумной ступени, что было внедрено при проведении исследования процессов и расчете параметров течения газа в элементах вакуумных систем.

2. Проведено исследование влияния геометрических и динамических параметров проточных частей МВВН на их откачные характеристики. Полученные данные внедрены при определении параметров течения газа в элементах вакуумных систем с подвижными элементами при создании условий низкого и среднего вакуума.
3. Проведенный анализ влияния основных размеров и формы каналов молекулярно-вязкостной проточной части позволил повысить эффективность работы насосов в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, увеличив быстроту действия проточной части и диапазон рабочих давлений.
4. Разработаны практические рекомендации для проектирования молекулярно-вязкостных вакуумных насосов.
5. Результаты работы использованы при выполнении НИР (НШ-6131.2012.8 в 2012-2013гг., НШ-5202.2014.8 за 2015 г., 7.803.2011 в 2013г.).
6. Результаты работы внедрены в практику проектирования и исследования рабочих процессов в ООО «ТАКО Лайн», ООО «ЛБМ-ВАКУУМ» и учебный процесс МГТУ им. Н.Э.Баумана, что подтверждено актами о внедрении.

#### **Апробация результатов работы**

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: научно-технический семинар «Вакуумная техника и технология» (Санкт-Петербург, 2007); Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты» (Москва, 2008); Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты» (Москва, 2012); Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2011, 2012); Международных научно-технических конференциях «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2011, 2013); научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (г. Судак, 2011, 2016).

По результатам работы разработаны проточные части МВВН с трапецеидальными и эллиптическими каналами, получены патенты РФ на полезную модель данных проточных частей.

#### **Публикации**

Результаты диссертации отражены в 15 научных статьях, в том числе в 5 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, опубликованы тезисы 2 докладов, общим объемом 3,8 п.л., получены 2 патента РФ на полезную модель.

#### **На защиту выносятся**

Математическая модель процесса откачки газа и метод расчета откачных параметров МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Результаты теоретических и экспериментальных исследований течения газа в проточной части МВВН. Рекомендации по выбору геометрических

параметров при проектировании проточной части МВВН. Разработанные конструктивные схемы МВВН.

### **Личный вклад соискателя**

Все исследования, представленные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе работы над материалами диссертации. Материал, включенный в диссертацию из совместных публикаций, принадлежит непосредственно соискателю, заимствованный материал обозначен ссылками.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, списка основных сокращений и обозначений. Диссертационная работа изложена на 169 страницах, содержит 70 иллюстрации и 7 таблиц. Библиография включает 160 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В разделе введения** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и объект исследования, указаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** представлена принципиальная схема молекулярно-вязкостного вакуумного насоса (Рисунок 1.).

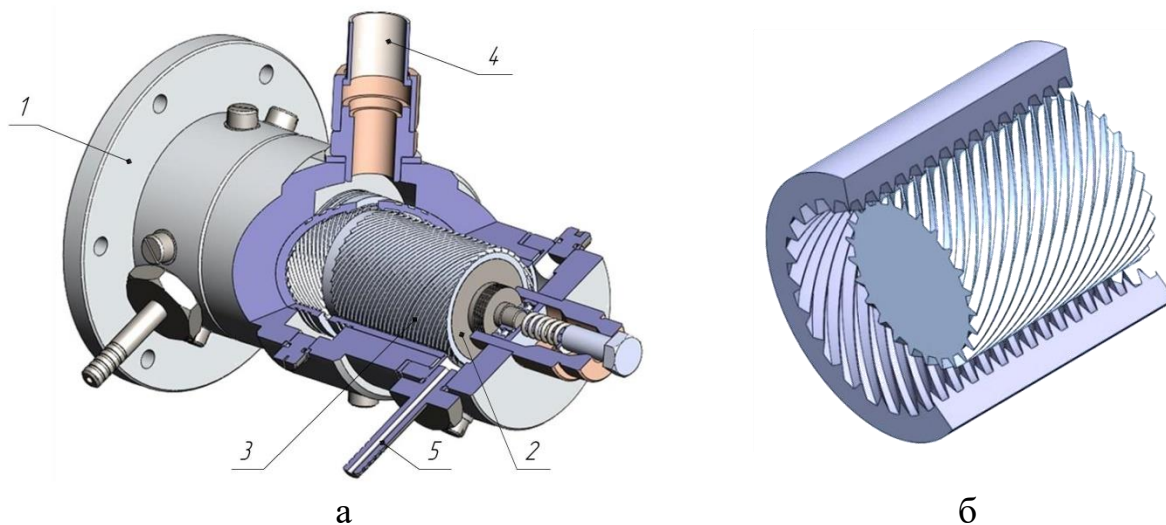


Рисунок 1. Молекулярно-вязкостный вакуумный насос

а – молекулярно-вязкостный насос; б – проточная часть насоса;  
1 – корпус; 2 – вал; 3 – проточная часть насоса; 4 – всасывающий патрубок;  
5 – нагнетательный патрубок

Молекулярно-вязкостный вакуумный насос состоит из корпуса 1, в котором вращается вал 2. На вал устанавливается ротор проточной части насоса, а в корпус устанавливается статор проточной части насоса. Газ поступает в насос через всасывающий патрубок 4 и разделяется на два потока, проходит через проточные части насоса 3 к форвакуумным патрубкам 5. Газ, поступая в форвакуумную зону насоса, откачивается

дополнительным форвакуумным насосом или выходит в атмосферу при работе МВВН без форвакуумного насоса. Проточная часть молекулярно-вязкостного вакуумного насоса образована винтовыми каналами на смежных поверхностях рабочих элементов, т.е. на роторе и статоре.

Принцип действия проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса заключается в том, что молекулы газа, попадая в каналы ротора и статора, получают дополнительное количество движения относительно каналов в направлении откачки. Дополнительное количество движения молекулы газа получают от вращающегося ротора при перемещении газа по каналам статора. За счет торможения молекул газа при столкновении со статором, они получают дополнительное количество движения относительно каналов ротора. Приращение динамического давления в каналах ротора преобразуется в статическое давление в неподвижных каналах на статоре, происходит увеличение создаваемого давления по всей длине канала. Воздействие каналов на газ приводит к движению газа по спирали.

Так как молекулярно-вязкостный вакуумный насос является новым типом вакуумных насосов и не производится ни в одной из стран мира, соответственно отсутствуют методы расчета данного типа вакуумного насоса в разных диапазонах давлений. В диссертации рассмотрены существующие вакуумные насосы, которые могут являться аналогами молекулярно-вязкостного вакуумного насоса, сравнение их основных характеристик, достоинств и недостатков. Выявлено, что одним из аналогов МВВН являются молекулярные вакуумные насосы. В связи, с чем произведен анализ существующих математических моделей и методов расчета откачных параметров молекулярных вакуумных насосов. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований молекулярных вакуумных насосов показал, что простые и удобные для расчетов методы не всегда отвечают современным требованиям по точности и универсальности их применения. Основные сложности при моделировании рабочих процессов течения газа в каналах проточных частей возникают в молекулярно-вязкостной области течения газа, не смотря на то, что молекулярные проточные части комбинированных турбомолекулярных насосов работают именно в этой области. Во всех рассмотренных работах указывается, что при исследовании течения газа в молекулярных вакуумных насосах основными факторами, определяющими точность математической модели, являются эффекты взаимодействия газа с поверхностями (скольжение газа, аккомодация, внешнее трение), которые в основном определяются из физического эксперимента.

Результаты теоретического исследования процесса откачки МВВН показали, что использование вычислительных комплексов CFD для определения основных откачных параметров МВВН возможно только для вязкостного режима течения газа. В молекулярно-вязкостном режиме течения газа необходимо учитывать переменный характер скорости скольжения по длине проточной части в зависимости от изменения давления

по длине канала, а также снижение концентрации молекул газа в проточной части насоса и преобладание взаимодействия молекул газа с поверхностью. При использовании данного метода определения основных параметров МВВН в пределах допустимой точности с экспериментальными откачными параметрами МВВН для каждого численного эксперимента появляется необходимость подбора граничных условий.

По итогам произведенного литературного обзора и его анализа сформулирована цель диссертации, обоснована её актуальность и значимость для развития вакуумной науки и техники, поставлены задачи исследования, научная новизна и защищаемые научные положения.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели процесса откачки газа молекулярно-вязкостным вакуумным насосом на основе нового метода расчета откачных параметров МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Разработанная математическая модель процесса откачки и метод определения откачных параметров насоса позволили выявить параметры, влияющие на откачную характеристику насоса, с возможностью дальнейшего повышения эффективности действия насоса в целом. Принимая во внимание принцип относительности движения и полную симметрию каналов ротора и статора, рассмотрено перемещение газа в двух отдельных проточных частях насоса, разделенных фиктивной поверхностью (Рисунок 2.), имеющей свойства ротора для каналов статора и свойства статора для каналов ротора.

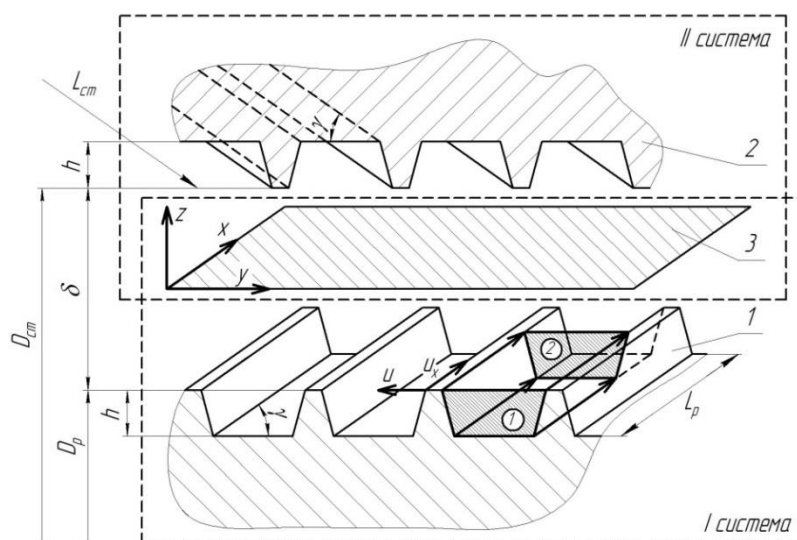


Рисунок 2. Расчетная схема молекулярно-вязкостной проточной части  
1 – ротор; 2 – статор; 3 – фиктивная поверхность

В связи с тем, что лопатки, как на роторе, так и на статоре находятся на малом расстоянии друг от друга, фиктивная поверхность представляет собой перфорированную поверхность.

Поэтому предполагается эффект прилипания газа на ней, т.е. скорость газа на фиктивной поверхности определяется скоростью подвижной поверхности. С учетом симметричности систем каналов ротор – фиктивная поверхность и фиктивная поверхность – статор, принципа относительности



движения, рассматривается лишь одна из систем каналов в предположении, что вторая система имеет аналогичные параметры. Такое разделение проточной части на составляющие учитывает существующие математические модели течения газа между параллельными поверхностями бесконечной длины.

### Допущения математической модели

При создании математической модели процесса откачки газа в проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса для молекулярно-вязкостного режима течения газа приняты следующие допущения:

- газ – идеальный;
- течение газа – установившееся, одномерное, ламинарное, изотермическое;
- плотность газа по сечению канала остается постоянной;
- не учитывается влияние входа и выхода каналов проточной части насоса на течение газа;
- на рабочих поверхностях статора и ротора предполагается скольжение газа вдоль поверхности;
- на фиктивной поверхности газ движется со скоростью ротора по отношению к каналам статора и неподвижен относительно каналов ротора.

Границы молекулярно-вязкостного режима течения газа определены числом Кнудсена в диапазоне  $10^{-2} < \text{Kn} < 0,33$ . При определении проводимости круглого трубопровода режим течения газа эффект скольжения уже наблюдается при числе Кнудсена  $\text{Kn} > 10^{-3}$ . Поэтому границы области применения математической модели процесса откачки МВВН расширены и определены числом Кнудсена в диапазоне  $10^{-3} < \text{Kn} < 0,33$ .

На Рисунке 3. представлен годограф скоростей в системе каналов статор – фиктивная поверхность в рабочем режиме, т.е. при наличии потока газа, проходящего через канал со стороны всасывания на сторону нагнетания.

В пространстве канала скорости газа  $v(y)$  и  $v(z)$  определяются из условия равновесия сил, действующих на элементарный объем газа

$$\frac{dv(z)}{dz} = -\frac{z}{\eta} \frac{dp}{dx} + C_1, \quad v(z) = -\frac{z^2}{2\eta} \frac{dp}{dx} + C_1 z + C_2$$

$$\frac{dv(y)}{dy} = -\frac{y}{\eta} \frac{dp}{dx} + C_1, \quad v(y) = -\frac{y^2}{2\eta} \frac{dp}{dx} + C_1 y + C_2,$$

где  $C_1, C_2$  – константы интегрирования.

Константы интегрирования определяются из граничных условий:

- скорость газа на фиктивной поверхности (при  $z = 0$ ) определена уравнениями

$$v(z)_{z=0} = \zeta_1 u_x, \quad v(y)_{z=0} = \zeta_1 u_x.$$

– скорость газа на рабочих поверхностях канала определяется скоростью скольжения на поверхности (на стенке канала при  $y = b(z)/2$ )

$$v(y) = v_s(y) = \zeta_2 \frac{dv(y)}{dy}, \quad v(z) = v_s(z) = \zeta_2 \frac{dv(z)}{dz}$$

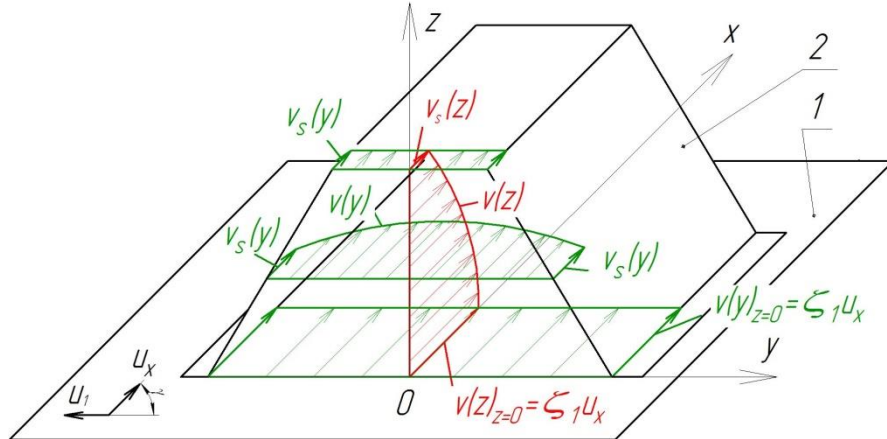


Рисунок 3. Годограф скоростей газа в канале МВВН

1 – фиктивная поверхность; 2 – статор

С учетом допущений и граничных условий построены профили скоростей газа  $v(y)$  в зависимости от ширины канала (Рисунок 4.) и  $v(z)$  в зависимости от высоты канала (Рисунок 5.) ( $\psi = 0,5$ ,  $u = 180$  м/с).

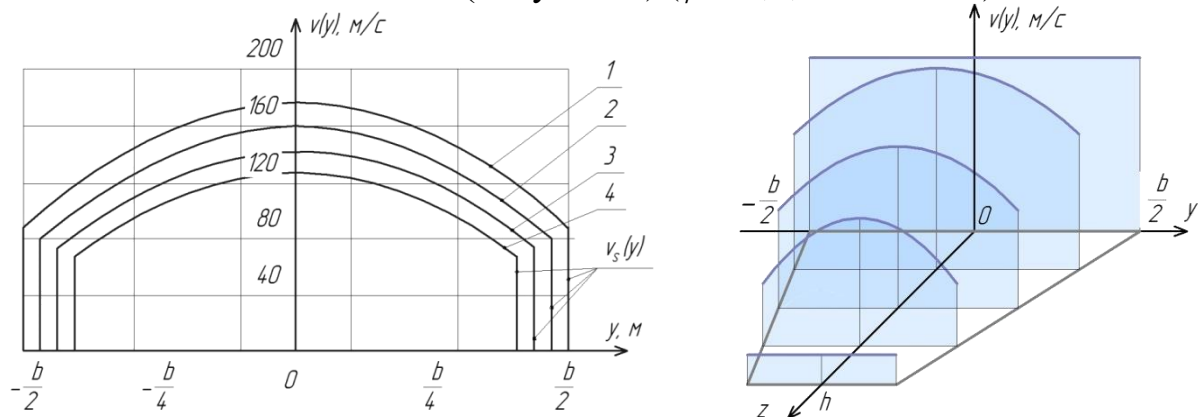


Рисунок 4. Зависимость изменения скорости  $v(y)$  в сечении канала

1 –  $h_i = 0,25h$ ; 2 –  $h_i = 0,5h$ ; 3 –  $h_i = 0,75h$ ; 4 –  $h_i = h$

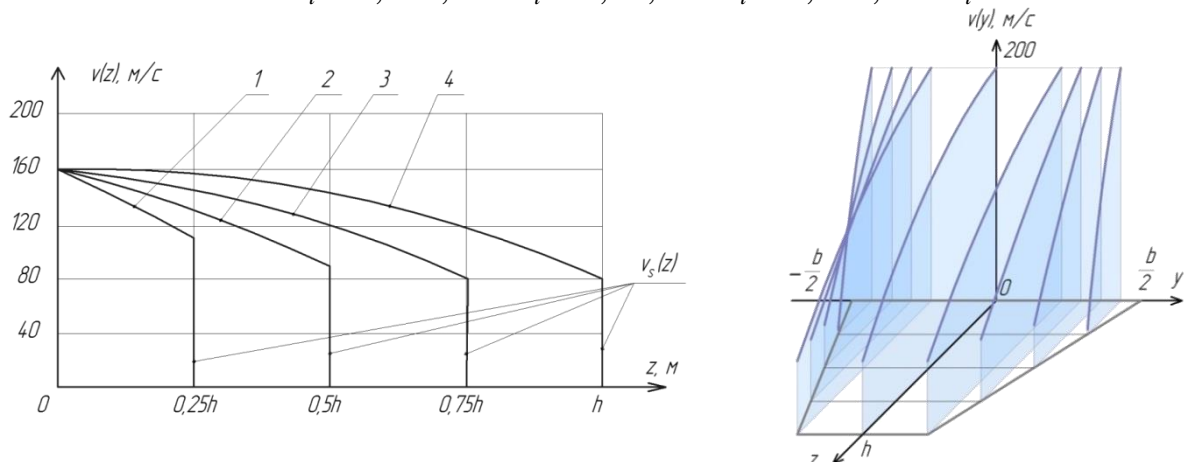


Рисунок 5. Зависимость изменения скорости  $v(z)$  в сечении канала

1 –  $h_i = 0,25h$ ; 2 –  $h_i = 0,5h$ ; 3 –  $h_i = 0,75h$ ; 4 –  $h_i = h$

С учетом допущений и граничных условий определена скорость газа в канале

$$v(y, z) = \frac{v(y) + v(z)}{2} \Rightarrow \begin{cases} z = 0 \rightarrow v(y, z) = \zeta_1 u_x, \\ 0 < z < h_i, y \in \left[ -\frac{b(z)}{2}, 0 \right] \rightarrow v(y, z) = -\frac{y^2}{4\eta} \frac{dp}{dx} + \left( \frac{b(z)}{4} - \zeta_2 \right) \frac{b(z)}{4\eta} \frac{dp}{dx} - \\ - \frac{z^2}{4\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{z}{2(\zeta_2 + h_i)} \left( \zeta_1 u_x - \frac{\zeta_2 h_i}{\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{h_i^2}{2\eta} \frac{dp}{dx} \right) + \frac{1}{2} \zeta_1 u_x, \\ 0 < z < h_i, y \in \left[ 0, \frac{b(z)}{2} \right] \rightarrow v(y, z) = -\frac{y^2}{4\eta} \frac{dp}{dx} + \left( \frac{b(z)}{4} + \zeta_2 \right) \frac{b(z)}{4\eta} \frac{dp}{dx} - \\ - \frac{z^2}{4\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{z}{2(\zeta_2 + h_i)} \left( \zeta_1 u_x - \frac{\zeta_2 h_i}{\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{h_i^2}{2\eta} \frac{dp}{dx} \right) + \frac{1}{2} \zeta_1 u_x, \\ z = h_i, y = \pm \frac{b(z)}{2} \rightarrow v(y, z) = v_s(y, z) = \frac{\zeta_2 b(z)}{4\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{\zeta_2 z}{2\eta} \frac{dp}{dx} + \\ + \frac{\zeta_2}{2(\zeta_2 + h_i)} \left( \zeta_1 u_x - \frac{\zeta_2 h_i}{\eta} \frac{dp}{dx} - \frac{h_i^2}{2\eta} \frac{dp}{dx} \right). \end{cases}$$

Полученные данные изменения скорости газа в сечении канала позволяют определить изменение скорости газа в проточной части насоса (Рисунок 6.) по осям  $z$  и  $y$  в любом сечении канала с учетом взаимодействия газа с поверхностями проточной части.

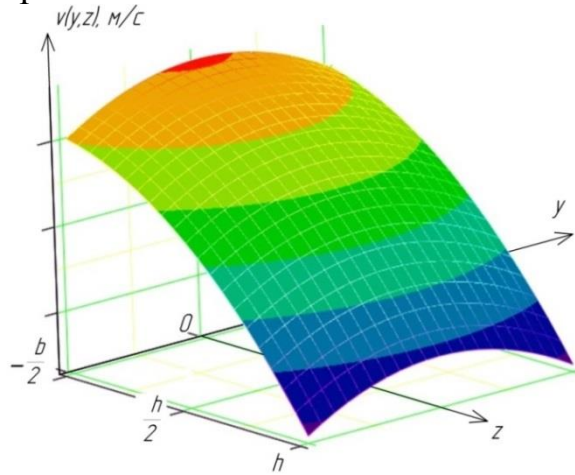


Рисунок 6. Скорость газа  $v(y, z)$  в канале проточной части МВНН

Максимальное отношение давлений, создаваемое насосом, определяется по зависимости

$$\tau_{\max} = \frac{P_n}{P_{\text{вс}}}.$$

Поток газа не меняется по длине канала, т.е. перетекание газа через зазор не влияет на общие параметры проточной части. Таким образом, быстрота

действия проточной части насоса для данного давления газа определяется зависимостью

$$S_H = N \int_F v dF = N \int_{z=0}^{z=h_1} \int_{y=-b(z)/2}^{y=b(z)/2} v(z, y) dz dy,$$

где  $N$  – число каналов ротора и статора.

Быстрота действия проточной части насоса для каналов выражена зависимостью для трапецеидальных каналов

$$S_H = \frac{\psi h N (p_n - p_{ec})}{16 L_K \eta} \left( \frac{8h^3}{3 \cos^2 \alpha} - \frac{h^3}{3} - \psi h^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{2\psi^2 h^3}{3} - \frac{\zeta_2 h^2}{2} + \zeta_2^2 h - 3\zeta_2^3 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right| \right) + \frac{1}{8} \zeta_1 u_x \psi h N \left( 3h - \zeta_2 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right| \right)$$

и для эллиптических каналов

$$S_H = \frac{\pi R^4 N (p_n - p_{ec})}{\eta L_K} \left( \frac{1}{8} + \frac{\zeta_2 - \frac{R}{2}}{3(R - \zeta_2)} \right) + \frac{\pi R^2 N \zeta_1 u_x}{L_K} \left( \frac{1}{2} - \frac{R}{3(R - \zeta_2)} \right).$$

Перепад давлений для рабочего режима течения, создаваемый проточной частью МВВН с трапецеидальными каналами, в зависимости от геометрических и скоростных параметров проточной части определен зависимостью

$$p_n - p_{ec} = \frac{2L_K \eta \left( 8 \frac{S_H}{N} - 3\zeta_1 u_x \psi h^2 + \zeta_1 \zeta_2 u_x \psi h \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right| \right)}{\psi h \left( \frac{8h^3}{3 \cos^2 \alpha} - \frac{h^3}{3} - \psi h^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{2\psi^2 h^3}{3} - \frac{\zeta_2 h^2}{2} + \zeta_2^2 h - 3\zeta_2^3 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right| \right)}$$

и для МВВН с эллиптическими каналами

$$p_n - p_{ec} = \frac{24L_K \eta (R - \zeta_2)}{R^2 (5\zeta_2 - R)} \left[ \frac{S_H}{\pi R^2 N} - \zeta_1 u_x \left( \frac{R - 3\zeta_2}{6(R - \zeta_2)} \right) \right].$$

Для безрасходного режима течения газа ( $S = 0$ ) данное уравнение для МВВН с трапецеидальными каналами принимает вид

$$p_n - p_{ec} = \frac{2L_K N \zeta_1 \eta u_x \left( \zeta_2 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right| - 3h \right)}{\frac{8h^3}{3 \cos^2 \alpha} - \frac{h^3}{3} - \psi h^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{2\psi^2 h^3}{3} - \frac{\zeta_2 h^2}{2} + \zeta_2^2 h - 3\zeta_2^3 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right|}$$

и для МВВН с эллиптическими каналами

$$p_n - p_{ec} = \frac{4L_K \zeta_1 u_x \eta (9\zeta_2 - R)}{R^2 (5\zeta_2 - R)}.$$

Полученные зависимости быстроты действия насоса, перепада давлений по длине каналов, максимального отношения давлений проточной части отражают связь между геометрическими, скоростными и откачными параметрами проточной части МВВН, учитывая не только форму профиля, но и взаимодействие газа с рабочими поверхностями проточной части насоса.

## Метод расчета откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса

Получение откачных параметров МВВН с помощью разработанной математической модели процесса откачки газа молекулярно-вязкостным вакуумным насосом возможно после дополнения ее экспериментальными коэффициентами обмена количеством движения и скольжения газа. Данные коэффициенты определяют характер взаимодействия газа с поверхностями каналов проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса.

Для проверки адекватности математической модели процесса откачки газа МВВН при определении основных откачных параметров насоса проведены экспериментальные исследования: зависимости быстроты действия насоса от давления всасывания и отношения давлений; перепада давлений в проточной части насоса и максимального отношений давлений в зависимости от окружной скорости ротора; значения коэффициентов взаимодействия газа с поверхностью.

Разработанный метод расчета откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса, схема которого представлена на Рисунке 7., может быть использован при проектировании новых молекулярно-вязкостных вакуумных насосов и расчете их откачных характеристик.

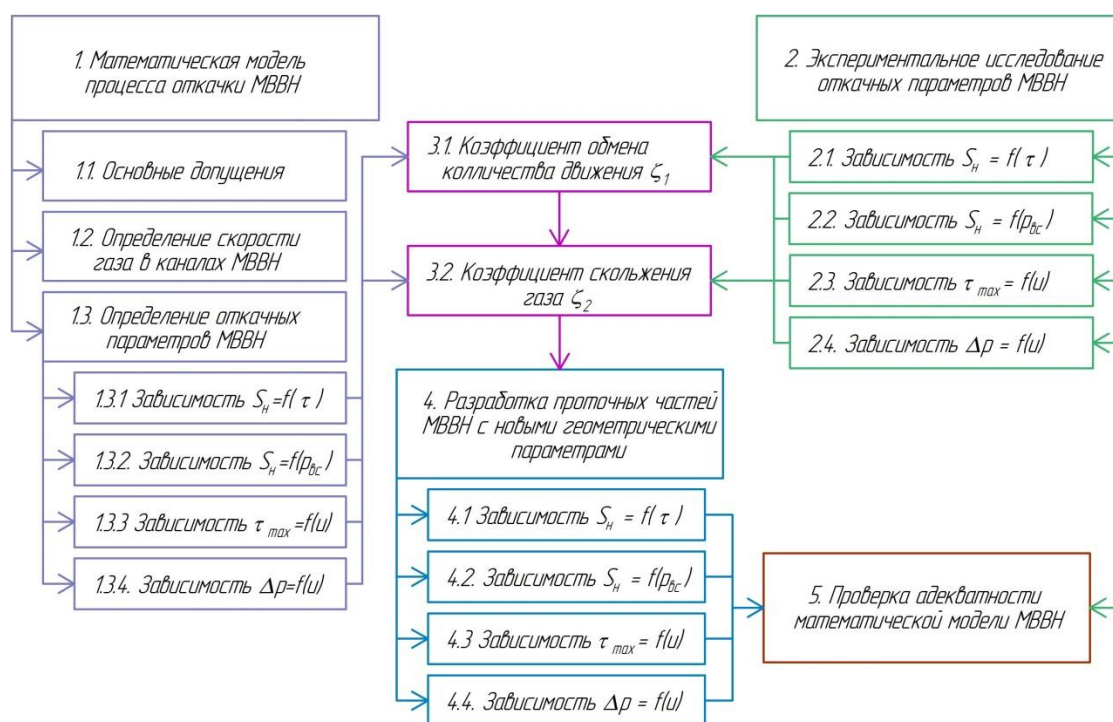


Рисунок 7. Метод расчета откачных параметров МВВН

В третьей главе представлено экспериментальное исследование откачных параметров МВВН, приведено описание экспериментального стенда, методики проведения экспериментального исследования.

Для исследования откачных параметров молекулярно-вязкостных вакуумных насосов с различными проточными частями в широком диапазоне

давлений разработан экспериментальный стенд, схема и его внешний вид представлены на Рисунке 8.

По результатам экспериментального исследования представлены зависимость изменения максимального отношения давлений от окружной скорости ротора (Рисунок 9.) и зависимость изменения быстроты действия насоса от отношения давлений в проточной части МВВН с трапецеидальными каналами (Рисунок 10.).

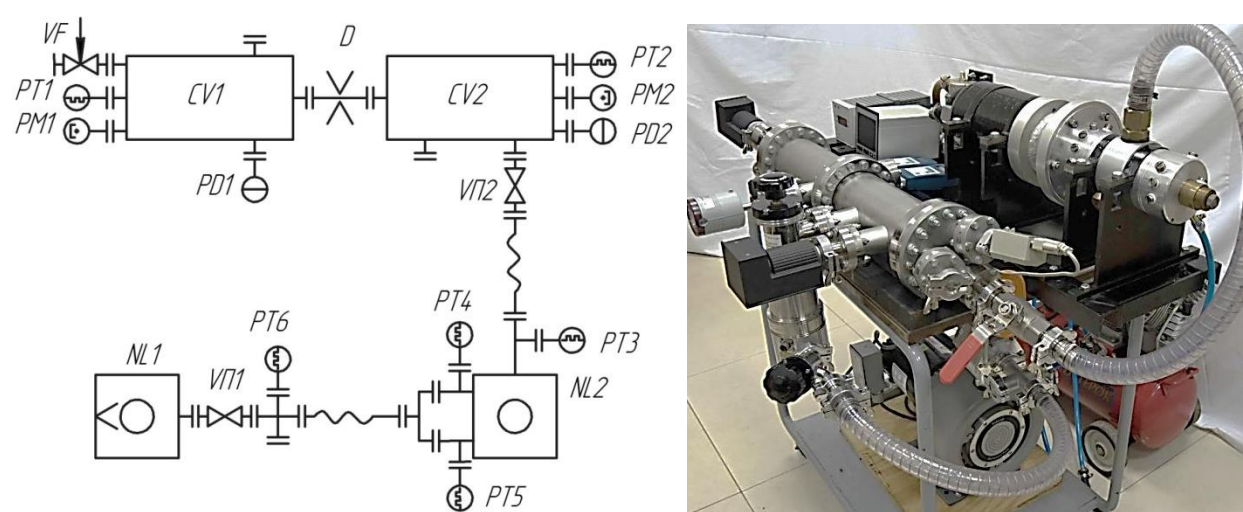


Рисунок 8. Принципиальная схема и внешний вид экспериментального стенда

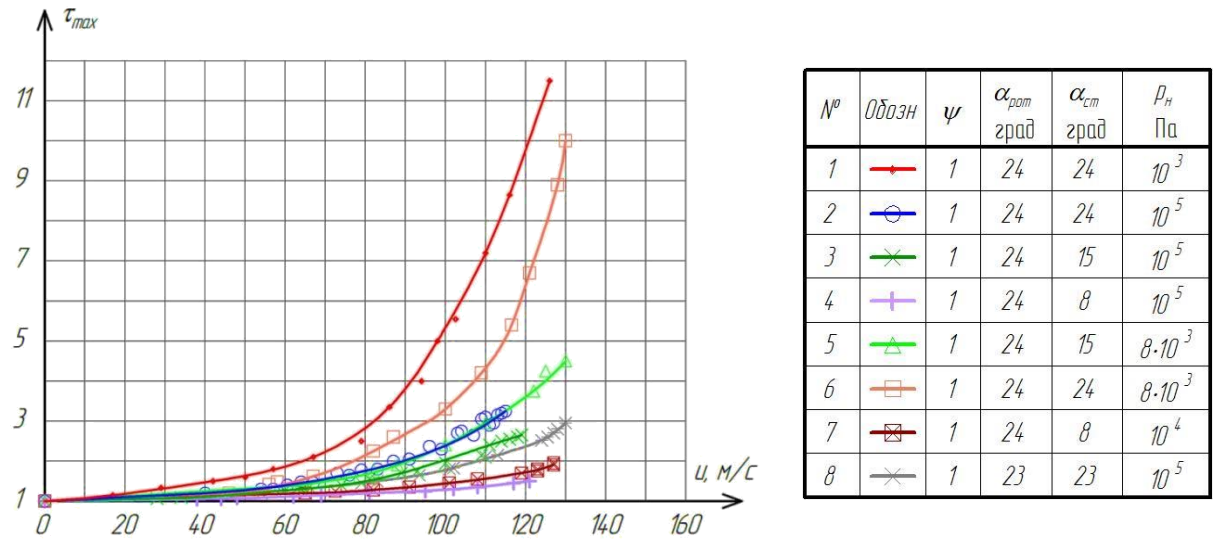


Рисунок 9. Зависимость отношения давлений насоса от окружной скорости ротора (экспериментальные данные)

В четвертой главе проведено сравнение полученных экспериментальных и теоретических откачных параметров проточной части МВВН. Достоверность полученных теоретических данных подтверждена экспериментальными исследованиями, что позволяет, сопоставляя полученные теоретические и экспериментальные данные, выявить факторы, влияющие на откачную характеристику МВВН.



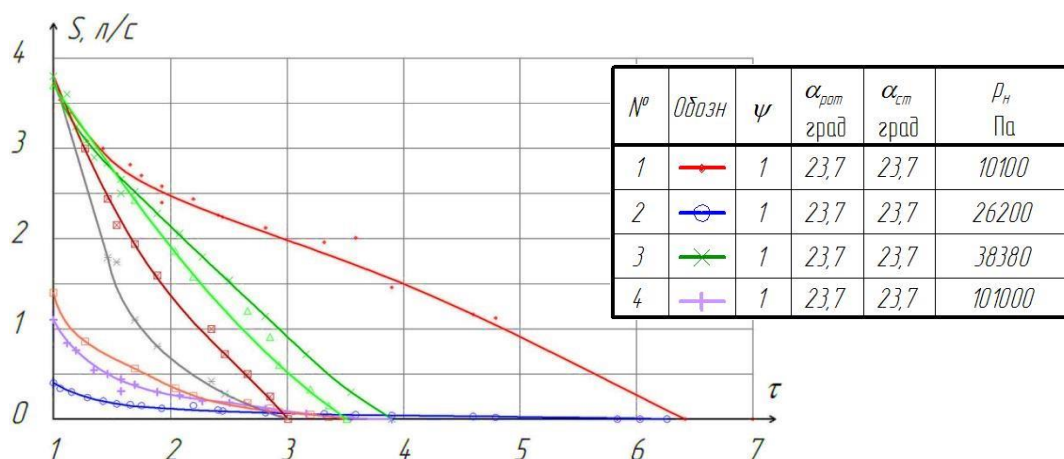


Рисунок 10. Зависимость быстроты действия насоса от отношения давлений (экспериментальные данные)

С помощью полученных экспериментальных данных определены эмпирические зависимости максимального отношения давлений для диапазонов значений окружных скоростей ротора описанные уравнениями для соответствующего диапазона давлений:

$$\begin{cases} 10^5 \text{ Па} \leq p_n \leq 10^4 \text{ Па} \rightarrow \tau_{\text{max}} = 0,065u - 4,25; \\ 10^4 \text{ Па} \leq p_n \leq 10^3 \text{ Па} \rightarrow \tau_{\text{max}} = 0,334u - 33,32; \\ p_n < 10^3 \text{ Па} \rightarrow \tau_{\text{max}} = 0,326u - 28,53. \end{cases}$$

Теоретическое исследование течения газа в каналах молекулярно-вязкостной проточной части насоса выявило влияние коэффициента обмена количеством движения, коэффициента скольжения (Рисунок 11.) на откачные параметры насоса, а также влияние геометрических и скоростных параметров проточной части насоса.

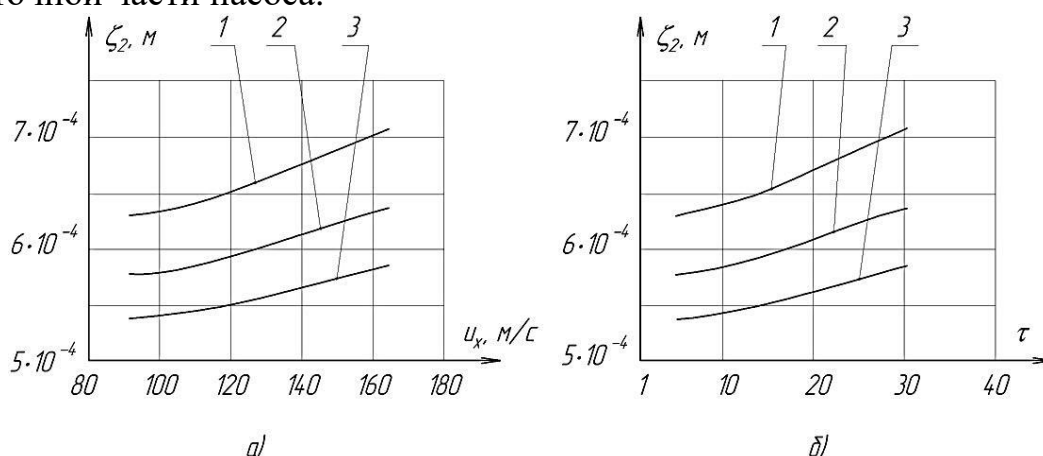


Рисунок 11. Зависимость коэффициента  $\zeta_2$  от скорости поверхности  $u_x$  (а) и от отношения давлений  $\tau$  (б) для разных значений коэффициента  $\zeta_1$   
1 – при  $\zeta_1 = 0,5$ ; 2 – при  $\zeta_1 = 0,7$ ; 3 – при  $\zeta_1 = 1$

Величина коэффициента обмена количеством движения  $\zeta_1$  меняется в диапазоне от 0 до 1 на подвижной поверхности. В молекулярно-вязкостной проточной части насоса подвижной поверхностью является фиктивная поверхность, которая рассматривается как перфорированная поверхность, так

как она образована площадками между каналами ротора и статора (шириной  $\delta_{кр}$ ) и слоем газа между этими площадками. Скорость газа на фиктивной поверхности определяется соотношениями скорости поверхности и значением коэффициента  $\zeta_1$ . При  $\zeta_1 = 1$  скорость газа в канале будет определяться скоростью поверхности  $u_x$ , что соответствует полной передаче количества движения от подвижной поверхности к газу.

Полученные данные значения коэффициента обмена количеством движения  $\zeta_1$  позволили определить характер изменения коэффициента скольжения  $\zeta_2$  в зависимости от скорости  $u_x$

$$\zeta_2 = \xi_1 u_x^2 + \xi_2 u_x + \xi_3,$$

где  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  – эмпирические коэффициенты, полученные из экспериментальных данных.

Для давления нагнетания  $p_n = 10^3$  Па и  $\zeta_1 = 0,5$  значения эмпирических коэффициентов определены величинами  $\xi_1 = 2,65 \cdot 10^{-9}$ ,  $\xi_2 = 1,0 \cdot 10^{-7}$ ,  $\xi_3 = 5,48 \cdot 10^{-4}$ . Для давления нагнетания  $p_n = 10^3$  Па и  $\zeta_1 = 1$  значения эмпирических коэффициентов определены величинами  $\xi_1 = 3,1 \cdot 10^{-9}$ ,  $\xi_2 = 2,0 \cdot 10^{-7}$ ,  $\xi_3 = 5,88 \cdot 10^{-4}$ .

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны конструктивные схемы молекулярно-вязкостных насосов.

Проведено сравнение откачных параметров MBVN (на примере MBVN-500) с двухроторными вакуумными насосами типа РУТс (Рисунок 12.) при равных габаритных размерах:

- Okta 500 компании PFEIFFER VACUUM при обеспечении откачки форвакуумным насосом DUO 125;
- Panda WV 0500 C компании Busch при обеспечении откачки форвакуумным насосом COBRA NC 0100 B.



Рисунок 12. Откачная характеристика вакуумных насосов

- 1 – Okta 500; 2 – DUO 125; 3 – MBVN-500 с форвакуумным насосом DUO125;  
 4 – Panda WV 0500 C; 5 – COBRA NC 0100 B;  
 6 – MBVN-500 с форвакуумным насосом COBRA NC 0100 B



**В заключении** перечислены выводы по результатам исследований, проведенных с помощью разработанной математической модели процесса откачки газа и метода расчета откачных параметров МВВН, рекомендации для проектирования МВВН.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель процесса откачки газа проточной частью МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, позволившая определить скорость течения газа в каналах проточной части насоса, влияние геометрических и скоростных параметров проточной части насоса на его откачную характеристику, влияние воздействия поверхности канала на течение газа в проточной части МВВН.
2. Создан метод расчета откачных параметров МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, позволивший рассчитать конструктивные и откачные параметры новых молекулярно-вязкостных вакуумных насосов, молекулярно-вязкостных проточных частей комбинированных ТМН.
3. Проведено экспериментальное исследование откачных параметров молекулярно-вязкостных вакуумных насосов и исследовано влияния геометрических и скоростных параметров проточных частей МВВН на его откачные параметры.
4. Получены экспериментальные данные для определения коэффициента обмена количеством движения ( $\zeta_1 = 1$ ) для рабочих поверхностей каналов проточных частей МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Получены экспериментальные данные коэффициента скольжения ( $\zeta_2 = \xi_1 u_x^2 + \xi_2 u_x + \xi_3$ ) для рабочих поверхностей каналов проточных частей МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения газа (при давлении нагнетания  $p_n = 10^3$  Па и коэффициенте обмена количеством движения  $\zeta_1 = 1$  значения эмпирических коэффициентов определены величинами  $\xi_1 = 3,1 \cdot 10^{-9}$ ,  $\xi_2 = 2,0 \cdot 10^{-7}$ ,  $\xi_3 = 5,88 \cdot 10^{-4}$ ).
5. Проведен анализ влияния геометрических и скоростных параметров проточной части МВВН на его откачную характеристику.

Разработаны рекомендации для создания новых типов молекулярно-вязкостный вакуумных насосов и молекулярно-вязкостных проточных частей комбинированных ТМН:

- каналы выполняются симметрично друг другу под одинаковыми углами к торцевой поверхности ротора и статора;
- формы профиля каналов ротора и статора выполняются одинаковыми, с равными габаритными размерами (трапецеидальный, эллиптический и круглый);
- ширина кромки  $\delta_{кр}$  должна стремиться к нулю и не должна превышать 5% от ширины канала  $b$ ;
- угол наклона канала к торцевой поверхности –  $\gamma = 23^\circ - 31^\circ$ ;
- угол наклона боковой поверхности канала к высоте –  $\alpha = 15^\circ - 30^\circ$ ;

- коэффициент отношения высота канала к его ширине –  $\psi = 0,5$ ;
  - минимальный зазор в проточной части насоса определяется величиной линейного удлинения диаметра ротора ( $\Delta D_p = 0,75 \cdot 10^{-4}$  м при частоте вращения ротора до 72000 об/мин). Зазор между ротором и статором в динамическом состоянии определяется зависимостью  $\delta_{дин} / h = 0,1$ . Величина зазора в статическом состоянии определяется зависимостью  $\delta_{ст} = \delta_{дин} + \Delta D_p$ .
  - окружная скорость ротора должны быть более 80 м/с.
6. Разработаны конструктивные схемы многоступенчатых многопоточных МВВН, комбинированного ТМН с молекулярно-вязкостной форвакуумной ступенью.
7. Получены патенты на полезную модель RU 164000 U1 «Молекулярно-вязкостная проточная часть» и RU 166526 U1 «Молекулярно-вязкостная проточная часть вакуумного насоса». Поданы заявки на патенты РФ на полезную модель № 2016149254, № 2016149256 от 15.12.2016 и патенты РФ на изобретение № 2016149250, № 2016149252 от 15.12.2016, описывающие конструктивные схемы многопоточных МВВН. Результаты работы внедрены в практику проектирования и исследования рабочих процессов в ООО «ТАКО Лайн», ООО «ЛБМ-ВАКУУМ» и учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в**

15 научных статьях, в том числе 5 включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Расчет параметров течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия: Машиностроение. 2009. Выпуск 4. С. 19-27 (0,35 п.л./0,35 п.л./0,1 п.л.).

2. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Работа молекулярно-вязкостного вакуумного насоса с параллельным подключением ступеней // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. Специальный выпуск. С. 25-32 (0,3 п.л./0,3 п.л./0,11 п.л.).

3. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е., Антипов И.А. Измерение температуры проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2011. №10, С. 34-37 (0,1 п.л./0,15 п.л./0,1 п.л. /0,15 п.л.).

4. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Исследование течения газа в канале МВН в вязкостном режиме течения // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2012. №10. С. 18-22 (0,3 п.л./0,3 п.л./0,03 п.л.).

5. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К. Определение зазора между ротором и статором молекулярно-вязкостного вакуумного насоса с помощью численных методов// Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. №11. (0,25 п.л./0,25 п.л.).