

На правах рукописи

**Шостак Юлия Алексеевна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ  
КОМБИНИРОВАННОГО ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО НАСОСА В  
МОЛЕКУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА**

Специальность 05.04.06. Вакуумная, компрессорная техника и  
пневмосистемы

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

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 кафедры «Вакуумная и компрессорная техника»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Никулин Николай Константинович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Аэродинамика ЛА»  
ФГБОУ ВО «МАИ»  
**Никитченко Юрий Алексеевич**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИА»  
**Бушин Сергей Артурович**

Ведущее предприятие: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года в \_\_\_\_\_ на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5., стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент

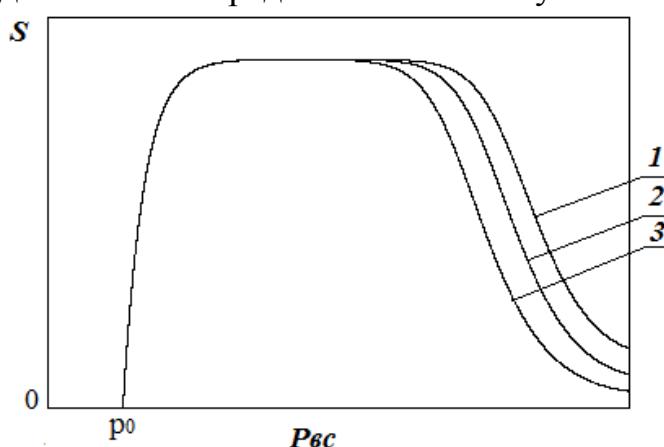
О.В. Белова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность вопроса

Высоковакуумные системы с турбомолекулярными насосами (ТМН) широко применяются для создания чистого безмасляного вакуума в различных областях науки и промышленности. Высоковакуумная система состоит из высоковакуумных и форвакуумных средств откачки. Откачная характеристика (зависимость быстроты откачки от давления всасывания) вакуумной системы на базе высоковакуумных насосов в большей степени определяется откачной характеристикой высоковакуумного насоса.

Совершенствование конструкции ТМН ведется по пути повышения быстроты действия и расширению диапазона рабочих давлений. Расширение диапазона рабочих давлений ТМН в область высоких давлений всасывания позволяет снизить требования по давлению всасывания, предъявляемые к форвакуумным насосам (ФН) и использовать в составе высоковакуумной системы более простые и экономически доступные ФН, например, мембранные, спиральные, а также ФН меньшей быстроты действия. С целью расширения диапазона рабочих давлений были предложены и получили широкое распространение комбинированные ТМН. Комбинированный ТМН – высоковакуумный насос, состоящий из последовательно соединенных проточных частей турбомолекулярного насоса и молекулярного. Комбинированный ТМН содержит первые со стороны всасывания рабочие колеса от турбомолекулярного насоса, а последние – от молекулярного насоса. С увеличением быстроты действия молекулярной ступени, расширяется диапазон давлений всасывания комбинированного ТМН в сторону больших давлений, т. е. чем больше быстрота действия молекулярной ступени, тем шире диапазон давлений на стороне всасывания ТМН. Типичная откачная характеристика комбинированного ТМН с молекулярными ступенями различной производительности представлена на Рисунке 1.



## Рисунок 1.

Откачные характеристики комбинированного ТМН при работе с молекулярной ступенью номинальной быстроты действия  $S_1$  (кривая 1);  $S_2$  (кривая 2);  $S_3$  (кривая 3);  $S_1 > S_2 > S_3$ .  $p_0$  – предельное остаточное давление комбинированного ТМН

На сегодняшний день расширение диапазона рабочих давлений реализуется следующими способами:

– совершенствуются проточные части молекулярных ступеней. В составе комбинированного насоса применяются молекулярные проточные части с наилучшими параметрами;

– в составе комбинированного насоса применяются молекулярные ступени быстроты действия большей, чем достаточная для обеспечения молекулярного режима за последним колесом турбомолекулярной (осевой) ступени.

Применение в составе комбинированного насоса молекулярной ступени большей быстроты действия, чем достаточная для обеспечения молекулярного режима за последним колесом ТМН-ступени имеет существенный недостаток: увеличение быстроты действия молекулярной ступени приводит к увеличению общих габаритов комбинированного ТМН, за которые в настоящее время ведется конкурентная борьба между производителями.

Целесообразно исследовать возможность расширения диапазона рабочих давлений комбинированного ТМН за счет повышения эффективности совместной работы осевой и молекулярной ступеней, т. е. путем согласованного объединения проточных частей турбомолекулярного и молекулярного насосов в единую комбинированную проточную часть. Межступенчатый канал является элементом, соединяющим осевую и молекулярную ступени комбинированной проточной части ТМН. В процессе анализа факторов, оказывающих влияние на эффективность откачки комбинированного ТМН, установлено, что межступенчатый канал снижает эффективность работы молекулярной ступени.

Целесообразно рассматривать способы снижения сопротивления межступенчатого канала потоку откачиваемого газа.

В настоящее время существует теоретическое описание процесса откачки проточной частью турбомолекулярного и молекулярного насосов, но не существует теории, описывающей процесс откачки газа комбинированным ТМН с учетом влияния межступенчатого канала.

Поэтому актуальной и нерешенной научной задачей остается исследование влияния межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН с целью расширения диапазона рабочих давлений.

**Объект исследования** – комбинированный ТМН.

**Предмет исследования** – процесс течения газа в проточной части комбинированного ТМН с учетом влияния межступенчатого канала.

**Целью** данной работы является расширение диапазона рабочих давлений комбинированного ТМН.

**Задачи исследования**

1. Разработать комплексную математическую модель (далее ММ) течения газа в комбинированной проточной части ТМН, позволяющую:

- моделировать течение газа в комбинированных проточных частях с различными типами молекулярных ступеней (изменять геометрию межступенчатого канала);

- учитывать влияние направления потока газа на откачные параметры.
- 2. Разработать математическую модель процесса течения газа и конструктивную схему молекулярной ступени дискового типа.
- 3. Создать методику расчета откачных параметров комбинированного ТМН, позволяющую учитывать воздействие межступенчатого канала.
- 4. Разработать алгоритмы и программы для реализации расчета проточной части комбинированного ТМН.
- 5. Провести численное исследование влияния межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН.
- 6. Разработать рекомендации по проектированию комбинированной проточной части ТМН.

### **Научная новизна**

- 1. Впервые разработана комплексная математическая модель процесса течения газа в проточной части комбинированного ТМН в молекулярном режиме течения газа, отличающаяся учетом влияния межступенчатого канала, позволяющая определять влияние геометрических и динамических параметров канала на откачную характеристику комбинированного ТМН.
- 2. Впервые разработана методика расчета откачных параметров комбинированного ТМН, позволившая учитывать влияние конструкции межступенчатого канала.
- 3. Впервые исследовано влияние параметров межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН. Межступенчатый канал снижает эффективность молекулярной ступени комбинированного ТМН в диапазоне от 10 до 60 % в зависимости от параметров канала. За счет увеличения ширины канала отношение рабочих давлений при одинаковой быстроте действия увеличивается в 3-15 раз. За счет экранирования подвижных поверхностей отношение рабочих давлений при одинаковой быстроте действия увеличивается в 8-130 раз.
- 4. Впервые предложена математическая модель и конструктивная схема молекулярной ступени нового дискового типа, а также конструктивная схема дискового молекулярного вакуумного насоса как самостоятельного средства откачки.

### **Практическая значимость**

- 1. Методика расчета откачных параметров комбинированного ТМН позволяет учитывать конструктивные параметры межступенчатого канала при определении откачной характеристики комбинированного ТМН на этапе проектирования.
- 2. Разработанные алгоритмы и программы позволили получить численные результаты расчета, провести анализ влияния параметров межступенчатого канала на процесс откачки комбинированной проточной частью и дать практические рекомендации по расширению диапазона рабочих давлений комбинированного ТМН.
- 3. Разработанные рекомендации по выбору относительной ширины межступенчатого канала, экранизации подвижных поверхностей, позволяют расширить диапазон рабочих давлений комбинированного ТМН на 2 – 2,5

порядка и снизить требования, предъявляемые к форвакуумным насосам: повысить предельное остаточное давление и снизить рабочую быстроту действия.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов расчетно-теоретических исследований подтверждается использованием фундаментальных законов физики и уравнений, прошедших верификацию.

Достоверность результатов, полученных на основе разработанных математических моделей течения газа в дисковой молекулярной ступени и в межступенчатом канале подтверждена путем сопоставления для тестовых задач расчетных значений коэффициента проводимости канала с истинными значениями, в качестве которых приняты данные натурных экспериментов, полученные Клаузингом. Относительная погрешность расчета не превышает 4%.

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

1. Комплексная математическая модель течения газа в проточной части комбинированного ТМН.
2. Методика расчета проточной части комбинированного ТМН, с учетом влияния межступенчатого канала.
3. Результаты теоретических исследований процесса течения газа в проточной части комбинированного ТМН.
4. Рекомендации по выбору геометрических и динамических параметров межступенчатого канала.

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: V и VI Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты», МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2014, 2015); VII Российская студенческая научно-техническая конференция "Вакуумная техника и технология", КНИТУ (Казань, 2015); VIII Российская студенческая научно-техническая конференция "Вакуумная техника и технология", (Казань, 2017); 13-я Международная научно-техническая конференция (Москва, КВЦ "Сокольники", 2018); XIV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2021); Всероссийская научно-техническая молодежная конференция «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты», МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2021); 11-я Международная научно-технической конференция "Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства", Омский государственный технический университет (Омск, 2021).

### **Личный вклад соискателя**

Все исследования, выполненные в диссертационной работе, проведены персонально соискателем. Материал, вошедший в диссертационную работу из публикаций с соавторами, принадлежит лично соискателю, заимствованный материал обозначен ссылками.

## **Публикации**

Ключевые научные результаты диссертации изложены в 9 печатных научных работах, включая 3 статьи в изданиях, рецензируемых ВАК РФ, общим объемом 8,05 п.л.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, списка сокращений, списка условных обозначений, 3 глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 117 страниц, включает 43 иллюстрации и 5 таблиц. Список литературы состоит из 108 источников.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обсуждается актуальность исследования, приведена краткая аннотация содержания работы, объявлены цель работы, объект и предмет исследования. Сформулированы научная новизна, практическая ценность полученных результатов и защищаемые положения.

**В первой главе** диссертации проведен обзор научно-технической литературы, по результатам которого объявлен вопрос, проведен анализ его текущего состояния на научной арене, выявлена проблематика, доказана актуальность, определена степень разработанности, дана оценка новизны, осуществлено целеполагание и поставлена научная задача.

Для описания процессов течения газа в комбинированной проточной части ТМН применяются методы, основанные на решении кинетического уравнения Больцмана и статистические методы. Метод, основанный на решении кинетического уравнения, является базовым и основополагающим подходом моделирования процесса течения газа в вакуумных системах. В зависимости от уровня сложности системы способы решения уравнения могут быть как аналитическими, так и численными. Преимуществом метода является широкая область применения, от молекулярного до вязкостного режима течения газа. Сложные геометрические формы проточных частей насосов приводят к сложной форме или отсутствию аналитического решения кинетического уравнения. В таких случаях целесообразно применение статистических методов. Статистические методы обладают рядом преимуществ и широко применяются при расчетах вакуумных систем.

На основе проведенного обзора научно-технической литературы сделаны следующие выводы. Имеется теория расчета осевой ступени комбинированного ТМН. Существуют некоторые методы расчета молекулярных ступеней различных типов, однако ряд вопросов в имеющейся теории расчета молекулярных вакуумных насосов (МВН) остается открытым. В математических моделях принимается большое количество допущений, к примеру, пренебрегается перетеканием газа через осевые и радиальные зазоры МВН, методики расчета изобилиуют применением эмпирических данных. Современная теория расчета МВН остается недостаточно полной. Молекулярные ступени известных типов требуют более высокой точности изготовления в сравнении с осевой ступенью. Не исследована роль

согласованной работы и эффективность совместной работы осевой и молекулярной ступеней комбинированного ТМН и не определен уровень потерь при несогласованной работе осевой и молекулярной ступеней в составе комбинированной проточной части ТМН. Не определено влияние параметров межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН.

**Во второй главе** демонстрируется процесс математического моделирования течения газа в проточной части комбинированного ТМН.

Моделирование течения газа в комбинированной проточной части реализуется схематизированным модульным принципом. При таком подходе сложная проточная часть или вакуумная система разбивается на «элементарные» объемы. Проточная часть условно разбивается на 3 модуля: ТМН-ступень, межступенчатый канал и молекулярная ступень (Рисунок 2).

Разработаны математические модели, описывающие процесс течения газа в каждом модуле и приводится процедура реализации расчета основных параметров откачки в каждом из 3-х модулей. Каждый модуль ограничен входным и выходным сечениями.

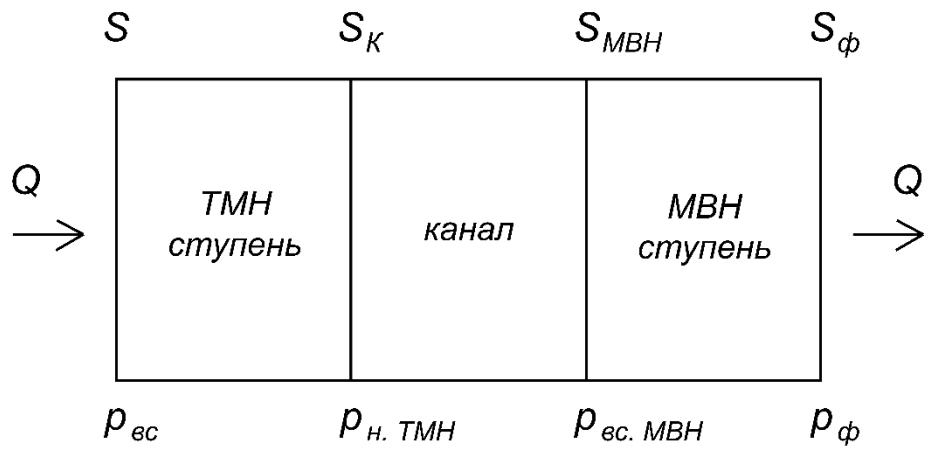


Рисунок 2.

Схема разбиения на модули проточной части комбинированного ТМН

$S$  – быстрота откачки камеры;  $p_{ec}$  – давление в камере;  $S_K$  – быстрота откачки во входном сечении канала;  $p_{h, TMN}$  – давление нагнетания ТМН-ступени;  $S_{MBH}$  – быстрота откачки на стороне всасывания МВН-ступени;  $p_{ec, MBH}$  – давление всасывания МВН-ступени;  $S_\phi$  – быстрота откачки на стороне нагнетания МВН-ступени;  $p_\phi$  – форвакуумное давление

Три математические модели, описывающие процесс течения газа в каждом модуле, позиционируются как подмодели и объединяются в общую комплексную математическую модель откачки газа всей проточной частью комбинированного ТМН. Сопряжение трех подмоделей осуществляется из условия постоянства газового потока в каждом сечении проточной части насоса.

В качестве первого модуля в составе комбинированной проточной части традиционно применяются проточные части механических насосов известных типов (Геде, Зигбана, и др.). В настоящей работе в качестве рассматриваемой

молекулярной ступени в составе комбинированного ТМН предложена принципиально новая конструкция молекулярного насоса – дискового молекулярного вакуумного насоса (ДМВН). ДМВН является средством получения вакуума и предложен впервые.

Конструктивная схема ДМВН представлена на Рисунке 3.

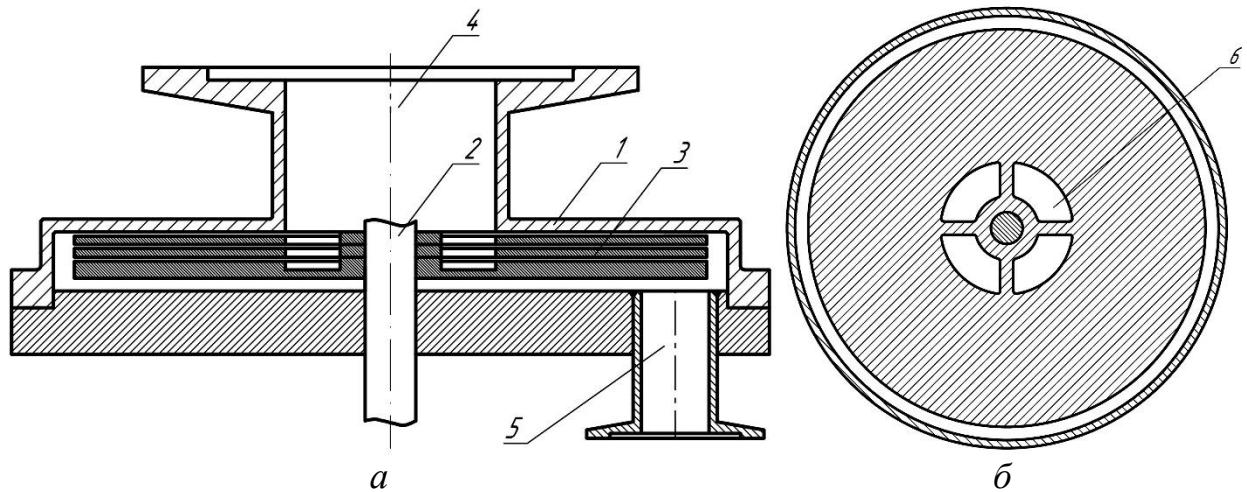


Рисунок 3.

Конструктивная схема дискового молекулярного вакуумного насоса (ДМВН): *а* – продольный разрез ДМВН; *б* – профиль диска 3

ДМВН состоит из вала 2, расположенного в корпусе 1, на котором закреплены диски 3. Вал приводится в движение приводным механизмом.

Принцип действия дискового молекулярного насоса заключается в том, что молекулы газа попадают во всасывающий патрубок 4, а затем через отверстия 6, предусмотренные профилем дисков, попадают в междисковое пространство. При столкновении с подвижной поверхностью вращающихся дисков молекулам газа сообщается дополнительный импульс количества движения в направлении откачки и последние вовлекаются в движение по щелевым каналам проточной части насоса от входных отверстий 6, со стороны всасывания, к периферии дисков, в сторону нагнетания, а затем через нагнетательный патрубок 5 удаляются из полости нагнетания форвакуумным насосом.

Поскольку конструкция ДМВН является новой и на сегодняшний день не производится, в открытой литературе не имеется методов расчета таких машин. В диссертационной работе рассмотрены существующие аналоги ДМВН и выделены ближайшие. Проведен анализ имеющихся математических моделей, а также методик и методов расчета выявленных аналогов.

Из предшествующего уровня техники известен аналог ДМВН – молекулярная ступень типа Twistorr компании Agilent technologies. Технология Twistorr представляет собой конструкцию молекулярной ступени, состоящую из чередующихся статорных и роторных дисков. Роторные диски выполнены гладкими заодно с валом, на ответных статорных частях с обеих сторон нарезаны спиралевидные каналы, что требует высокой точности изготовления каналов и сборки проточной части. С одной стороны статорного

колеса откачиваемый газ движется по спиральному каналу от центра к периферии, с обратной – от периферии к центру. Недостатками рассмотренной конструкции является необходимость высокой точности изготовления статорных колес и сборки проточной части насоса (обеспечение величины зазоров  $10^{-5} – 10^{-6}$  м).

Из предшествующего уровня техники известен ближайший аналог ДМВН – молекулярный насос дискового типа со спиральным каналом от внешнего диаметра к центру диска – молекулярный насос Зигбана.

Недостатками последнего также является необходимость высокой точности изготовления и сборки проточной части (обеспечение величины зазоров  $10^{-5} – 10^{-6}$  м). Необходимость нарезки каналов сложной формы (архимедова спираль) требует наличия высокоточного дорогостоящего оборудования (фрезерные станки с числовым программным управлением – ЧПУ). Также к недостаткам можно отнести высокие требования к чистоте откачиваемого газа, а именно к наличию в нем взвешенных твердых частиц.

Отличие проточной части ДМВН от проточной части молекулярного насоса Зигбана, а также от молекулярной ступени, выполненной с применением технологии Twistoff, используемой в турбомолекулярных насосах, заключается в конструкции проточной части. В отличие от приведенных аналогов, в конструкциях которых чередуются роторные и статорные диски, на которых нарезаны спиралевидные каналы, проточная часть ДМВН состоит исключительно из гладких роторных дисков, профиль которых представлен на Рисунке 3, б.

Задачей, на решение которой направлено применение ДМВН как самостоятельного средства откачки или в составе комбинированных ТМН, является снижение финансовых затрат на изготовление проточной части насоса путем значительного упрощения конструкции проточной части и технологического процесса изготовления дисков, при сохранении или незначительном изменении быстроты действия насоса (до 5%). Значительное упрощение достигается путем создания конструкции насоса с увеличенными зазорами: от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

Необходимость разработки математической модели откачки газа дисковой ступенью обусловлена отсутствием каких-либо методов расчета такой конструкции, ввиду того, что конструкция предложена впервые и является принципиально новой. При применении молекулярной ступени известного типа расчет основных параметров молекулярной ступени может проводиться по известным методикам на основе существующих математических моделей.

При моделировании течения газа в дисковой ступени применен метод пробной частицы Монте-Карло, изложены основные допущения, описан алгоритм реализации расчета и определена область применения математической модели. Данная модель применима при молекулярном режиме течения газа. Расчетная схема дисковой молекулярной ступени представлена на Рисунке 4.

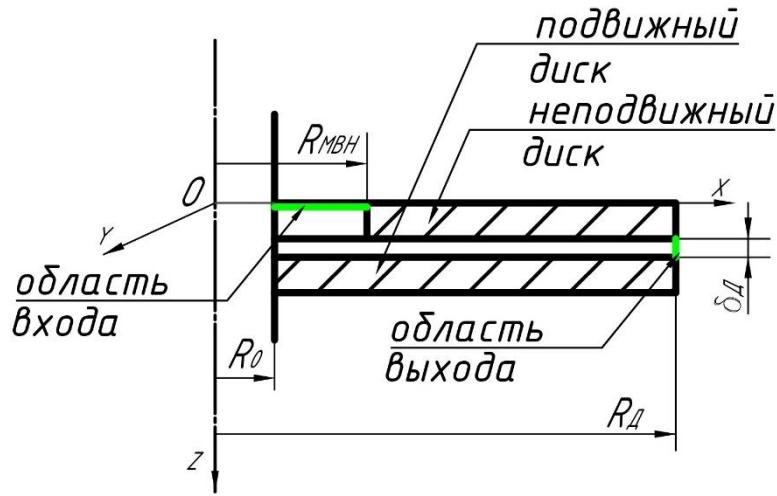


Рисунок 4.  
Расчетная схема дисковой молекулярной ступени (ДМВН)

Определены основные параметры молекулярной ступени.

Максимальная быстрота действия  $S_{\max MBH}$  и максимальное отношение давлений  $\tau_{\max MBH}$  дисковой молекулярной ступени, состоящей из  $N$  рабочих дисков:

$$S_{\max MBH} = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k1_{1D} F_{1D} - k1_{2D} F_{2D}) + (N-1) \cdot \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k2_{1D} F_{1D} - k2_{2D} F_{2D})$$

$$\tau_{\max MBH} = \frac{k1_{1D} F_{1D} + (N-1)k2_{1D} F_{1D}}{k1_{2D} F_{2D} + (N-1)k2_{2D} F_{2D}},$$

где  $\vartheta_{cp}$  – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа;  $k1_{1D}$  – вероятность перехода молекул газа через первое междисковое пространство в прямом направлении;  $k2_{1D}$  – вероятность перехода молекул газа через второе и последующие междисковые пространства в прямом направлении;  $k2_{2D}$  – вероятность перехода молекул газа через второе и последующие междисковые пространства в обратном направлении;  $k1_{2D}$  – вероятность перехода молекул газа через первое междисковое пространство в обратном направлении;  $F_{1D}$  – площадь входного отверстия в дисковую молекулярную ступень;  $F_{2D}$  – площадь выходного отверстия в дисковой молекулярной ступени.

Откачная характеристика МВН-ступени:

$$S_{MBH}(p_{\text{вс.} MBH}) = S_{\max MBH} \cdot \frac{\tau_{\max MBH} - \frac{p_{\phi}}{p_{\text{вс.} MBH}}}{\tau_{\max MBH} - 1}$$

В качестве второго модуля в составе комбинированной проточной части рассматривается межступенчатый канал.

Подход, метод, допущения и алгоритм реализации расчета аналогичны примененным для расчета 1-го модуля (МВН-ступени). Расчетная схема межступенчатого канала представлена на Рисунке 5.

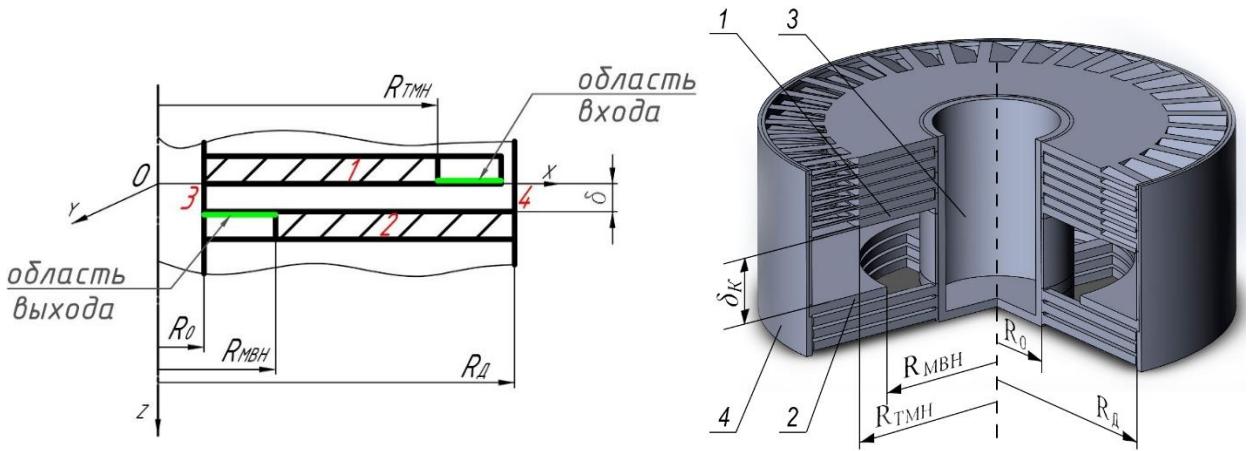


Рисунок 5.

Расчетная схема межступенчатого канала

1 – последнее колесо ТМН-ступени; 2 – первый статорный диск МВН-ступени; 3 – ротор; 4 – корпус

Течение газа моделируется в канале между двумя дисками. Роторный диск (последнее колесо ТМН-ступени) закреплен на валу или изготовлен заодно с валом. Ротор вращается с угловой скоростью  $\omega$ . Второй диск (первое колесо МВН-ступени) является статорным и фиксируется на корпусной поверхности. В продольном направлении исследуемый канал ограничен цилиндрической поверхностью корпуса насоса, как показано на Рисунке 5.

Роторный и статорный диски радиуса  $R_d$  расположены на расстоянии  $\delta_K$  друг от друга. Роторный диск зафиксирован на валу радиуса  $R_0$ , а статорный на корпусной цилиндрической поверхности. Для определения вероятностей перехода молекул откачиваемого газа через межступенчатый канал выбирается и рассматривается число тестовых молекул  $N_{общ}$ , прослеживается их движение с момента старта с поверхности входа в систему до момента выхода из нее.

Описана процедура вычисления вероятности перехода молекул газа через межступенчатый канал.

Результирующий поток молекул газа, перетекающий через канал с входа на выход в единицу времени:

$$Q_U = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{1K} F_{1K} p_{h.TMH} - k_{2K} F_{2K} p_{sc.MBH})$$

где  $F_{1K}$  – площадь входного отверстия в межступенчатый канал,  $m^2$ ;  $F_{2K}$  – площадь выходного отверстия из межступенчатого канала,  $m^2$ ;  $\vartheta_{cp}$  – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул,  $p_{h.TMH}$  – давление нагнетания турбомолекулярной ступени, т. е. давление во входном сечении межступенчатого канала.

Получаемое отношение давлений в межступенчатом канале определяется выражением:

$$\tau_K = \frac{k_{1K} F_{1K}}{k_{2K} F_{2K}}$$

Быстрота откачки во входном сечении канала:

$$S_K = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K} \tau_K).$$

В качестве третьего модуля в составе комбинированной проточной части рассматривается турбомолекулярная ступень.

При расчете приняты следующие допущения:

- максимальная быстрота действия постоянна:  $S_{\max.TMH} = const$ ;

- натекания в следствие негерметичности отсутствуют;

- отсутствует поток газовыделений с поверхностей форвакуумной полости;

По работам авторов Шнеппа, Шерстюка, посвященным осевым вентиляторам с рабочими колесами, аналогичными колесам ТМН, максимальная быстрота действия в вязкостном режиме снижается незначительно (до 17 %).

Апроксимирующая зависимость, полученная по экспериментальным данным автора Sawada, отношения давлений, создаваемого ТМН-ступенью от давления на входе в молекулярную ступень:

$$\tau_{\max.TMH}(p_{\text{вс.МВН}}) = \tau_{\max.v} + \frac{\tau_{\max.m} - \tau_{\max.v}}{1 + \frac{0.75}{Kn}}$$

или

$$\tau_{\max.TMH}(p_{\text{вс.МВН}}) = \tau_{\max.v} + \frac{\tau_{\max.m} - \tau_{\max.v}}{1 + \frac{115.2 \cdot a/b \cdot H \cdot p_{\text{вс.МВН}}}{\sin \alpha}},$$

где  $\tau_{\max.m}$  – максимальное отношение давлений, создаваемое ТМН-ступенью в молекулярном режиме течения газа;  $\tau_{\max.v}$  – максимальное отношение давлений, создаваемое ТМН-ступенью в вязкостном режиме течения газа;

$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{a}$  – критерий Кнудсена;  $a$  – характерный размер в ТМН-ступени, ширина входа в межлопаточный канал;  $b$  – длина межлопаточного канала;  $a/b = 0.8$  – отношение ширины межлопаточного канала к его длине;  $H$  – ширина лопатки колеса ТМН-ступени в осевом направлении;  $\alpha$  – угол наклона межлопаточного канала ТМН-ступени.

Течение газа во всей проточной части комбинированного ТМН описывается комплексной математической моделью, которая образуется сопряжением трех приведенных выше подмоделей из условия постоянства потока откачиваемого газа от входа в насос до выхода.

Поток газа на всасывании МВН-ступени определяется уравнением:

$$Q_{\text{МВН}} = S_{\text{МВН}} \cdot p_{\text{вс.МВН}}$$

Поток газа на входе в межступенчатый канал:

$$Q_U = S_K \cdot p_{\text{н.ТМН}}$$

Условие сопряжения подмоделей 1-го и 2-го модулей:

$$Q_U = Q_{MBH}$$

В результате сопряжения получена откачная характеристика МВН-ступени с учетом канала.

Давление во входном сечении канала:

$$p_{h.TMH}(p_{vc.MBH}) = \frac{p_{vc.MBH}(S_{MBH} + \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{2K} F_{2K})}{\frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{1K} F_{1K}}$$

Быстрота откачки МВН-ступени во входном сечении канала:

$$S_K(p_{vc.MBH}) = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K}) \frac{p_{vc.MBH}}{p_{h.TMH}(p_{vc.MBH})}$$

Зависимость быстроты откачки от давления во входном сечении канала  $S_K = f(p_{h.TMH}(p_{vc.MBH}))$  представляет собой откачную характеристику МВН-ступени с учетом канала.

Поток газа во входном сечении ТМН-ступени:

$$Q_{vc} = S \cdot p_{vc}$$

Условие сопряжения подмоделей 2-го и 3-го модулей:

$$Q_U = Q_{vc}$$

Зависимость давления всасывания ТМН от давления всасывания МВН-ступени при учете канала:

$$p_{vc}(p_{vc.MBH}) = \frac{p_{h.TMH}(p_{vc.MBH})}{\tau_{max.TMH}(p_{h.TMH}(p_{vc.MBH})) - \frac{S(p_{vc.MBH})}{S_{max.TMH}} \cdot (\tau_{max.TMH}(p_{h.TMH}(p_{vc.MBH})) - 1)}$$

Быстрота откачки во входном сечении ТМН:

$$S(p_{vc.MBH}) = S_K(p_{vc.MBH}) \cdot \frac{\tau_{max.TMH}(p_{h.TMH}(p_{vc.MBH}))}{1 + \frac{S_K(p_{vc.MBH})}{S_{max.TMH}} \cdot (\tau_{max.TMH}(p_{h.TMH}(p_{vc.MBH})) - 1)}$$

В конечном результате получена откачная характеристика комбинированного ТМН с учетом канала – зависимость быстроты откачки камеры от давления всасывания ТМН  $S = f(p_{vc})$ .

Созданная комплексная математическая модель течения газа во всей проточной части является инструментом, позволившим определить и проанализировать влияние межступенчатого канала на откачную характеристику насоса, а также разработать методику расчета откачных параметров комбинированного ТМН, схема которой представлена на в тексте диссертации.

Методика применима при проектировании новых комбинированных ТМН и расчете их откачных характеристик. Расчет по данной методике открыл возможность учитывать влияние межступенчатого канала, за счет чего

обладает повышенной точностью и является усовершенствованным расчетом комбинированной проточной части.

Все расчеты вероятности перехода молекул газа через элементы проточной части по разработанным подмоделям произведены в интегрированной среде разработки Visual Studio на языке C++ с относительной ошибкой  $\delta K$  не более 5% (норма относительной погрешности  $|\delta K| \leq 5\%$ ), что обеспечивалось проведением численного эксперимента с требуемым числом тестовых частиц. В тестовой ситуации проводилось сопоставление внутреннего параметра подмодели – вероятности перехода молекул газа через элемент системы – с истинными значениями, в качестве которых приняты экспериментальные данные, полученные Клаузингом. Относительная погрешность расчета не превышает 4%.

**В третьей главе** представлены результаты численных испытаний, проведенных с помощью разработанной комплексной математической модели и проведено теоретическое исследование влияния параметров межступенчатого канала на откачную характеристику молекулярной ступени и на общую откачную характеристику комбинированного ТМН.

Для выявления влияния канала выполняется расчет откачных характеристик МВН-ступени и всего насоса с учетом канала при его различных геометрических и скоростных параметрах. Каналы разбиваются по типам. К каждому типу относится канал, обладающий определенными признаками, в числе которых:

- граничное условие на поверхности последнего колеса ТМН-ступени;
- граничное условие на цилиндрической поверхности ротора;
- величина относительной ширины канала  $\delta K/(R_{TMN} - R_{MBN})$ .

Безразмерная скорость подвижных поверхностей определяется отношением  $u/v_h$ ; где  $u$  – окружная скорость на наружном диаметре рабочих колес и дисков, ротора;  $v_h$  – наиболее вероятная скорость теплового движения молекул рабочего газа.

Граничное условие на поверхности последнего колеса ТМН-ступени может формулироваться в 2-х вариантах:

- $u_1/v_h = 0$ , что соответствует неподвижной поверхности, ограничивающей канал со стороны осевой ступени (конструктивно, например, установка последнего колеса осевой ступени статорным, постановка статорного экранирующего диска или экранизация кольцевой подвижной поверхности последнего колеса ТМН-ступени, радиуса  $R_{TMN} - R_0$  иными способами).

- $u_1/v_h \neq 0$ , что соответствует подвижной кольцевой поверхности последнего колеса ТМН-ступени.

Аналогично формулируется граничное условие на цилиндрической поверхности ротора:  $u_2/v_h = 0$  или  $u_2/v_h \neq 0$ .

Фиксируется значение величины относительной ширины  $\delta K/(R_{TMN} - R_{MBN})$  для каждого типа канала.

Таким образом формируется упорядоченный набор типов межступенчатого канала, возможных к применению для соединения данных

осевой и молекулярной ступеней и строятся откачные характеристики МВН-ступени и всего насоса с учетом канала различных типов.

Откачные характеристики МВН-ступени с учетом канала приведены на Рисунке 6, характер которых демонстрирует, что воздействие канала приводит к снижению эффективности молекулярной ступени.

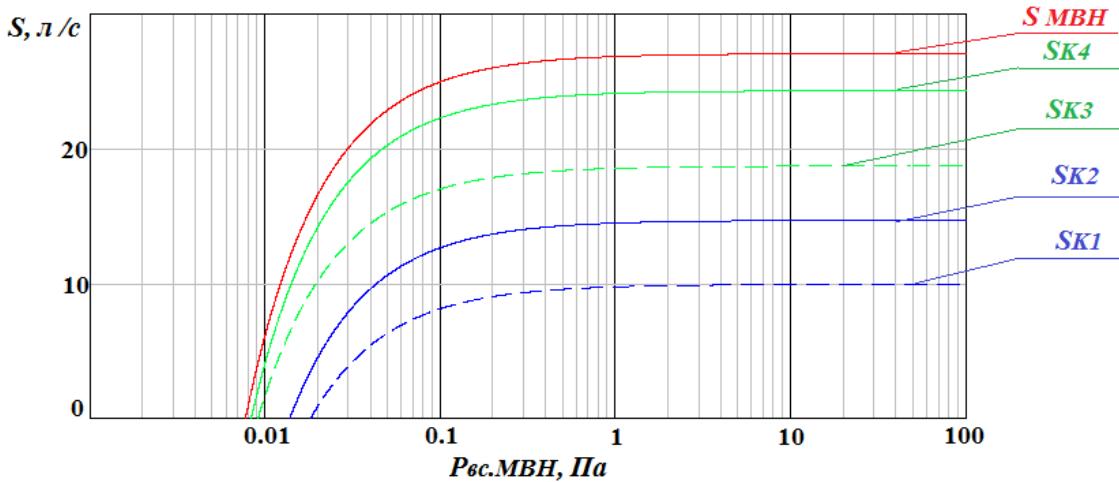


Рисунок 6.

#### Откачная характеристика МВН-ступени

$S_{MBH}$  – без учета канала;  $S_{K1}$  – с учетом канала 1-го типа ( $u/v_h \neq 0$ ,  $\delta_K/(R_{TMH}-R_{MBH}) = 0.3$ );  $S_{K2}$  – с учетом канала 2-го типа ( $u/v_h \neq 0$ ,  $\delta_K/(R_{TMH}-R_{MBH}) = 2$ );  $S_{K3}$  – с учетом канала 3-го типа ( $u/v_h = 0$ ,  $\delta_K/(R_{TMH}-R_{MBH}) = 0.3$ );  $S_{K4}$  – с учетом канала 4-го типа ( $u/v_h = 0$ ,  $\delta_K/(R_{TMH}-R_{MBH}) = 2$ ); при  $p_{\phi min} = 0.1$  Па, номинальная быстрота действия форвакуумного насоса 15 л / с

Количественная оценка влияния канала на откачную характеристику может быть проведена определением величины снижения быстроты действия МВН-ступени  $\delta S_{MBH}$  за счет сопротивления канала, определяемой следующим образом:

$$\delta S_{MBH} = \frac{S_{MBH} - S_{Ki}}{S_{MBH}} \cdot 100\%,$$

где  $S_{Ki}$  – быстрота откачки МВН-ступени во входном сечении канала  $i$ -го типа.

Результаты расчета  $\delta S_{MBH}$  представлены в диссертации на странице 94.

Межступенчатый канал снижает эффективность молекулярной ступени комбинированного ТМН в диапазоне от 10 до 60 % в зависимости от параметров канала.

Откачные характеристики комбинированного ТМН представлены на Рисунке 7.

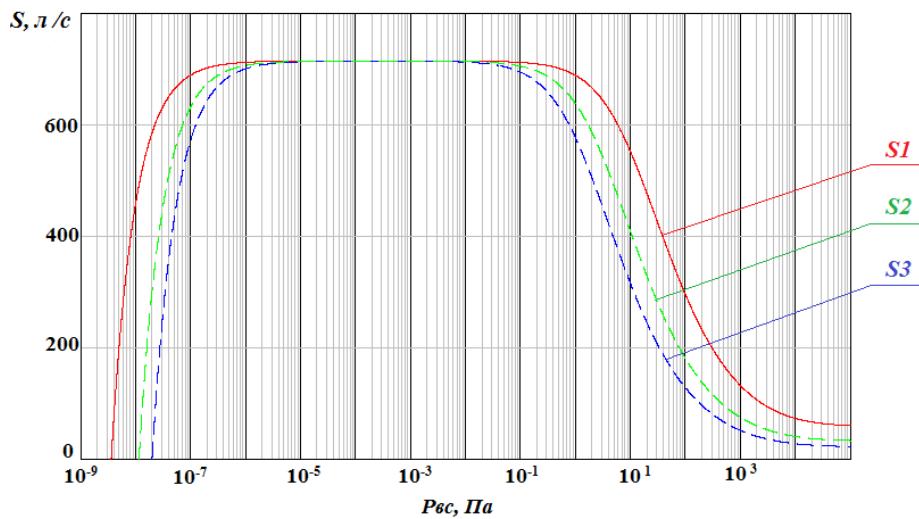


Рисунок 7.

Откачная характеристика комбинированного ТМН

$S1$  – без учета канала;  $S2$  – с учетом канала 1-го типа;  $S3$  – с учетом канала 2-го типа; при  $p_{\phi \min} = 0.1 \text{ Па}$

Приведена количественная оценка влияния параметров канала на откачную характеристику ТМН. Определены границы эффекта, оказываемого межступенчатым каналом на процесс откачки.

**В заключении** перечислены выполненные в рамках диссертационного исследования задачи, сформулирован результат решения поставленной научной задачи, сделаны выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа установлено отсутствие открытых данных о влиянии канала на откачную характеристику ТМН.

2. Разработана ММ процесса течения газа в проточной части комбинированного ТМН в молекулярном режиме течения газа, отличающаяся учетом влияния межступенчатого канала, позволившая определить влияние основных параметров канала на откачную характеристику насоса, определить влияние межступенчатого канала на процесс течения газа в проточной части комбинированного ТМН.

3. Разработана методика расчета проточной части комбинированного ТМН, позволившая учитывать действие межступенчатого канала при расчете и проектировании комбинированных ТМН.

4. Разработан алгоритм и программа для реализации расчета проточной части комбинированного ТМН с молекулярной ступенью дискового типа.

5. Проведено численное исследование влияния межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН на основе разработанной ММ.

6. Математические модели процесса течения газа в межступенчатом канале и дисковой ступени верифицированы. Относительная погрешность

расчета, полученная путем сопоставления расчетных значений вероятности перехода молекул газа через элементы системы с экспериментальными данными, опубликованными в открытой литературе, не превысила 4%.

7. Проведен анализ и определено качественное и оценено количественное влияние параметров межступенчатого канала на откачную характеристику ТМН.

Разработаны рекомендации по проектированию комбинированных проточных частей ТМН.

При малых значениях относительной ширины канала с одной стороны минимален обратный объемный поток газа через канал, но с другой стороны отношение давлений  $\tau$ , получаемое в канале, достигает максимальных значений (от 1,6 до 6,5). Величина отношения давлений, получаемая в канале,  $\tau$  резко снижается при относительной ширине канала от 0 до 0,5 и практически не изменяется при величине относительной ширины большей 2.

Рекомендованный диапазон относительной ширины канала - от 0,5 до 2. Следует принимать максимальную ширину канала из рекомендованного диапазона, которую позволяет массогабаритный критерий.

Межступенчатый канал снижает эффективность молекулярной ступени комбинированного ТМН в диапазоне от 10 до 60 % в зависимости от параметров канала. При расчете и проектировании межступенчатого канала рекомендуется исходить из того, что проводимость канала должна превышать быстроту действия молекулярной ступени не менее, чем в 5 – 10 раз.

При проектировании проточной части следует минимизировать площадь подвижных поверхностей, ограничивающих канал. С увеличением скорости вращения ротора или площади подвижных поверхностей, ограничивающих канал, сопротивление канала возрастает.

За счет увеличения ширины канала отношение рабочих давлений при одинаковой быстроте действия увеличивается в 3-15 раз.

За счет экранирования подвижных поверхностей отношение рабочих давлений при одинаковой быстроте действия увеличивается в 8-130 раз.

За счет параметров канала возможно расширение диапазона рабочих давлений на 2-2,3 порядка.

Неучет в расчете межступенчатого канала приводит к теоретическому завышению быстроты действия до 70%, а также завышению отношения рабочих давлений до 50 – 470 раз, т. е. теоретическому расширению диапазона рабочих давлений до 1,5 – 2,5 порядка.

8. Разработаны конструктивные схемы ДМВН и комбинированного ТМН с молекулярной ступенью дискового типа.

9. Результаты работы внедрены в практику проектирования проточных частей ТМН в ООО «ЮЭйч Вакуум». Подана заявка на патент РФ на полезную модель №2022110177 от 15.04.2022, описывающая конструктивную схему ДМВН

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследование межступенчатого канала комбинированного турбомолекулярного насоса / Ю. А. Шостак [и др.]. Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 9–17. (1,04 п.л. / 0,2 п.л.).
2. Влияние межступенчатого канала на эффективность молекулярной ступени комбинированного турбомолекулярного насоса / Ю. А. Шостак [и др.]. Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 45–53. (1,04 п.л. / 0,23 п.л.).
3. Определение перетеканий газа через торцовый зазор в дисковом вакуумном насосе / Н. К. Никулин [и др.]. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. № 6. С. 15–39. (2,89 п.л. / 0,7 п.л.).
4. Обзор конструкций турбомолекулярных насосов с различными типами молекулярных ступеней / Ю. А. Шостак [и др.]. Теория и практика современной науки. 2017. № 5 (23). С. 1115–1120. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).
5. Моделирование течения газа в проточной части комбинированного турбомолекулярного насоса с дисковой ступенью / Ю. А. Шостак [и др.]. Вакуумная техника и технология. 2018. Т. 28, № 4. С. 17–21. (0,58 п.л. / 0,15 п.л.).
6. Моделирование течения газа в проточной части комбинированного турбомолекулярного насоса с дисковой ступенью / Ю. А. Шостак [и др.]. Вакуумная техника, материалы и технология: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции, Москва, КВЦ "Сокольники". 2018. С. 63–68. (0,4 п.л. / 0,15 п.л.).
7. Исследование межступенчатого канала комбинированного турбомолекулярного насоса / Ю. А. Шостак [и др.]. Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 11-й Международной научно-технической конференции, Омск. 2021. Омский государственный технический университет. С. 95–96 (0,23 п.л.).
8. Investigation of interstage channel of hybrid turbomolecular pump. / Shostak J. A. [et al.]. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC. 2021. Vol. 2412, Issue 1, No. 030032. 11 p. (1,27 п.л. / 0,2 п.л.).
9. Перспектива разработки нового вида молекулярного вакуумного насоса дискового типа / В.А. Мишустин [и др.]. Теория и практика современной науки. 2017. № 5(23). С. 1077-1083 (0.35 п.л.).