

50-ЛЕТИЮ МИЭМ

ПОСВЯЩАЕТСЯ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроники обуславливает совершенствование специального технологического и контрольно-аналитического оборудования электронной техники. Наряду с улучшением функциональных показателей качества, одной из основных тенденций развития электронной техники является ее миниатюризация. Снижение массогабаритных характеристик дорогостоящего и уникального высокотехнологичного оборудования позволяет осуществить его кардинальное удешевление и расширение сферы применения. В настоящее время ряд зарубежных компаний и научных центров ведет исследование и разработку миниатюрных растровых электронных микроскопов, установок для безмасочной ионно-лучевой литографии, многопучкового оборудования электронной литографии и других малогабаритных приборов и оборудования.

Помимо поддержки тенденций развития оборудования электронной техники миниатюризация вакуумных насосов позволит перенести вакуумные технологии в технику широкого потребления и приблизить прежде уникальное оборудование к потребителю. Уменьшение массогабаритных характеристик откачных средств дает широкие перспективы их применения в медицине, пищевой промышленности, экологии, сфере безопасности и других отраслях.

Практический интерес к созданию миниатюрных вакуумных насосов,

как нового класса насосов, проявляют ведущие зарубежные производители вакуумной техники. Модельный ряд турбомолекулярных, магнитных электроразрядных и геттерных насосов компаний Alcatel Vacuum Technology (Франция), Pfeiffer Vacuum, Oerlikon Leybold Vacuum (Германия), Varian, Inc. (США) и SAES Getters (Италия) содержит средства откачки, характерный габаритный размер которых не превышает 100 мм, что на сегодняшний день позволяет удовлетворить потребности электронной техники в миниатюрных высоковакуумных насосах. Однако в качестве насоса предварительного разряжения и форвакуумных насосов для них предлагаются традиционные крупногабаритные низковакуумные средства откачки, что тормозит процессы миниатюризации оборудования электронной техники в целом.

Отсутствие миниатюрных низковакуумных насосов обусловлено сложностью применения на миниатюрном уровне принципов действия традиционного оборудования вакуумной техники, нецелесообразностью и сложностью масштабирования существующих конструкций насосов. Среди возможных средств, реализующих принципы низковакуумной откачки, предлагаются спиральные, перистальтические, термомолекулярные и мембранные ВН, разрабатываемые в California Institute of Technology, University of Southern California и Jet Propulsion Laboratory (США). Однако их исследования находятся на уровне научно-исследовательских работ, и многие вопросы разработки еще остаются нерешенными.

В нашей стране известны труды Г.Ф. Корепина, О.К. Курбатова, Ю.В. Никольского, В.А. Попова и др. по разработке миниатюрных вакуумных насосов.

Решение задачи миниатюризации технологического и контрольно-аналитического оборудования электронной техники требует уменьшения габаритных размеров его основных функциональных систем, в том числе вакуумной системы и ее элементной базы, основными компонентами которой являются вакуумные насосы.

Этому и посвящена настоящая монография.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МИНИАТЮРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

1.1. Миниатюризация оборудования электронной техники

Миниатюризация представляет собой активно развиваемое практически во всех областях техники направление, делающее более доступным ранее уникальное и дорогостоящее оборудование. Применение новых принципов действия, технологий и материалов позволяет кардинально снизить стоимость, массогабаритные характеристики и энергопотребление приборов и оборудования по сравнению с традиционным исполнением.

В настоящее время, используя новые достижения научно-технического прогресса, ведутся исследовательские работы, направленные на миниатюризацию технологического и контрольно-аналитического оборудования ЭТ.

В этом направлении в настоящее время работают ведущие зарубежные компании и научные центры: JEOL Ltd., Fujitsu Labs. Ltd. (Япония); IBM Research, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California (США); Deutsche Telekom Forshungs und Technologiezentrum, ICT GmbH, Applied Materials/Integrated Circuit Testing GmbH (Германия); Munro's Electron Beam Software Ltd. (Великобритания) и др.

Разрабатываемые миниатюрные растровые электронные микроскопы (РЭМ) высокого разрешения позволят снизить затраты на эксплуатацию контрольно-аналитического оборудования ЭТ [1-5]. Помимо этого, создание малогабаритных РЭМ дает возможность использовать их в "полевых" условиях, что сделает исследования среды обитания человека более эффек-

ТИВНЫМИ.

Процессы миниатюризации затрагивают технологическое оборудование микроэлектроники, работающее по принципу многопучковой обработки материалов [6-8], и установки для безмасочной ионно-лучевой литографии [9-10]. Переход нанотехнологий, использующих вакуум [11-12], от лабораторных исследований к промышленному выпуску потребует уменьшения массогабаритных характеристик оборудования.

Оборудование таких технологических процессов ЭТ, как ионная имплантация, магнетронное распыление, выращивание монокристаллов, сушка электротехнических изделий, плазмохимическое и ионно-лучевое травление, химическое осаждение из газовой фазы, молекулярно-лучевая эпитаксия, электронно-лучевая сварка и плавка, металлизация конденсаторных пленок, течеискание и других, также имеет потенциал к миниатюризации.

Миниатюризация контрольно-аналитического оборудования позволит создавать портативные и мобильные исследовательские приборы, делающие возможным проведение научных "in-situ" исследований за пределами лабораторий, что особенно актуально при реализации космических программ [13]. Национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства NASA совместно с университетами, научными центрами и компаниями California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, University of Southern California, Goddard Space Flight Center, Center for Space Microelectronics Technology, Sandia National Laboratories, Lawrence Berkeley National Laboratory, Phoenix Analysis and Design Technologies, Inc., Thorleaf Research, Inc. (США), Creare, Inc. (Германия) ведет активные разработки, направленные на создание контрольно-аналитического оборудования нового поколения.

За последние тридцать лет при помощи газовых масс-спектрометров были проведены исследования атмосферы Марса, Венеры, Юпитера, спут-

ника Сатурна Титана, шлейфа кометы Галлея [14]. В настоящее время ведутся разработки миниатюрного оборудования, объединяющего в себе принципы газовой хроматографии и масс-спектрометрии, потенциально применимого для научных исследований в рамках беспилотных межпланетных миссий [15-18].

Стремление к снижению массогабаритных характеристик оборудования требует миниатюризации всех его систем, как функциональных, так и систем энергопитания, контроля, управления, вакуумной системы, и др. Последние достижения в области сенсорных технологий привели к созданию газовых масс-спектрометров размерами со спичечный коробок, однако, вакуумные системы для поддержания их работы по-прежнему остаются большими, массивными и потребляющими большую мощность. Существующие и разрабатываемые миниатюрные технологические и контрольно-аналитические системы испытывают недостаток вакуумных систем с низкими массогабаритными характеристиками. Оборудование ЭТ такого класса предъявляет требования к вакуумным системам по размерам, массе, энергопотреблению, экологической безопасности и интеграции.

Необходимость миниатюризации вакуумных систем оборудования ЭТ накладывает новые требования на массогабаритные характеристики элементной базы вакуумных систем — насосов, коммутационно-регулирующей аппаратуры, контрольно-измерительных устройств, ловушек, коммуникаций.

Основными и незаменимыми элементами вакуумных систем являются ВН. Во многом от возможности снижения их массогабаритных характеристик будет зависеть успех миниатюризации вакуумных систем и оборудования ЭТ.

1.2. Современные миниатюрные

вакуумные насосы

1.2.1. Классификация вакуумных насосов по признаку "уровень габаритных размеров"

Поскольку габаритные размеры ВН на протяжении истории развития вакуумной техники оставались в практически неизменном диапазоне значений, классификация ВН по признаку "уровень габаритных размеров" до недавнего времени не вводилась. Однако сегодня, в связи с процессами миниатюризации, затронувшими и вакуумную технику, эта потребность возникла.

Для определения термина "миниатюрный ВН" и проведения анализа насосов этого класса предлагается классификация ВН по признаку "уровень габаритных размеров", представленная в табл. 1.1. Разделение на классы проведено в соответствии с характером физического взаимодействия человека (оператора, монтажника) с ВН, которое отражает массогабаритные характеристики ВН.

Каждому классу соответствует диапазон значений параметра "характерный габаритный размер". Габаритный размер, принимаемый в качестве характерного, для каждого вида ВН свой (например, для турбомолекулярного насоса – внешний диаметр корпуса, для магнитного электроразрядного – максимальный габаритный размер). Выбор характерного габаритного размера зависит от принципа действия ВН. Помимо этого он не должен включать в себя размеры фланцев, станин, держателей и вспомогательных элементов ВН, которые могут отсутствовать или быть заменены на аналогичные элементы других размеров. При этом другие габаритные размеры могут превосходить характерный. Характерный габаритный размер ВН включает в себя габаритные размеры его привода.

Таблица 1.1.

Классификация ВН по признаку "уровень габаритных размеров"

Класс	d_0 , мм*	Характеристика
Сверхбольшой ВН	>1500	Размер ВН соизмерим или превышает рост человека; для его удерживания требуется домкрат или кран
Большой ВН	700÷1500	Для удерживания ВН требуется домкрат
Традиционный ВН	100÷700	ВН может быть удержан вручную одним или двумя людьми
Миниатюрный ВН	5÷100	ВН свободно помещается и удерживается в руке человека
Сверхминиатюрный ВН	< 5	Для удерживания ВН требуются приспособления типа пинцет или манипуляторы

* d_0 – диапазон соответствующих значений параметра "характерный габаритный размер"

1.2.2. Миниатюрные высоковакуумные насосы

Миниатюризация высоковакуумных насосов успешно осуществляется на основе турбомолекулярных, гибридных турбомолекулярных, магнитных электроразрядных, испарительно-ионных насосов и ВН с нераспыляемым геттером.

Среди всех миниатюрных насосов наиболее полно реализованы турбомолекулярные (ТМН) и гибридные турбомолекулярные ВН. Лидеры мирового рынка ТМН, компании Alcatel Vacuum Technology (Франция), Pfeiffer Vacuum, Oerlikon Leybold Vacuum (Германия) и Varian, Inc. (США)

осуществляют серийный выпуск миниатюрных насосов [19-22]. Более высокого уровня миниатюризации удалось достичь компаниям Creare, Inc. (Германия) и Phoenix Analysis and Design Technology (США) [23-25]. Снижение габаритных размеров и энергопотребления разрабатываемых ими насосов влечет за собой значительное уменьшение быстроты действия.

Благодаря высоким коэффициентам сжатия (до 10^{11} по азоту) ТМН остаются одними из лучших средств достижения сверхвысокого вакуума. Использование в подшипниках легких и термически стабильных керамических шариков вместе с запатентованной Varian технологией "сухой смазки" делает возможным получение безмасляного вакуума. Применение легкого монолитного ротора из высокотехнологичного алюминиевого сплава снижает нагрузку на подшипники, что положительно отражается на надежности и ресурсе. В отличие от традиционных насосов, пространственное расположение миниатюрных ТМН произвольно из-за малой инерции ротора.

В зависимости от условий работы охлаждение насоса может быть как водяным, так и воздушным. В определенных случаях охлаждения не требуется. Комплектация фланцами различных стандартов определяет высокую совместимость ТМН с разными системами. Имеет место выпуск безфланцевых насосов для непосредственной интеграции в оборудование.

Турбомолекулярные насосы практически достигли своего геометрического предела, обусловленного принципами откачки, и их дальнейшая миниатюризация по мнению специалистов маловероятна [24, 25].

Миниатюрные магнитные электроразрядные ВН с разрядом Пеннинга были созданы рядом компаний и научных групп, включая Varian, Inc., Thermionics Laboratory, Inc., Gamma Vacuum, LLC., AVT (США) и ЦНИИ "Электроприбор" (г. Санкт-Петербург, Россия) [26 - 30]. Компания Duniway Stockroom Corp. и лаборатория Jet Propulsion Laboratory (JPL)

(США) в своих разработках приближаются к миниатюрным размерам [31].

В миниатюрных магнитных электроразрядных ВН используются те же конструктивные и физические принципы, что и на уровне традиционных насосов, что способствует уменьшению значений их массогабаритных характеристик. Миниатюризация ВН этого вида идет по пути уменьшения количества ячеек Пеннинга. Одним из главных ограничений использования магнитных электроразрядных ВН стандартной диодной конфигурации является низкая быстрота действия по инертным газам. Для их откачки один из титановых катодов заменяют танталовым, что увеличивает стоимость насоса. Такие насосы носят названия "Differential Ion" и "Noble Diode". Альтернативным решением проблемы является использование катодов различной конфигурации [31]. Другими проблемами проектирования миниатюрных магнитных электроразрядных ВН насосов являются обеспечение однородности магнитного поля и достаточной проводимости анодных ячеек, ограничение по высоковольтному пробое и инициирование запуска.

Выбор магнитных материалов определяет массогабаритные и стоимостные характеристики насосов. Наряду с ферритами и алнико 5, применяются дорогостоящие самарий-кобальтовые магниты и магниты из NdFeB.

НИИ "Исток" (г. Фрязино, Россия) разработана серия миниатюрных магнитных электроразрядных насосов полумагнетронного типа со скоростями откачки 0,5, 1, 2 л/с с максимальным объемом корпуса 43 см³ [32].

Использование новаторской конструкции круглого анода испарительно-ионного ВН орбитронного типа, предложенной California Institute of Technology и лабораторией JPL (США), позволяет свести габариты насоса к миллиметровым размерам [33]. Как и в традиционном насосе, электроны под воздействием положительного потенциала анода закручиваются

вокруг него. В предлагаемой конфигурации с заменой традиционного анода-стержня кольцевым проволочным анодом не требуется отражения электронов от торцов корпуса и, как следствие, приложения отрицательного потенциала к ним. Характеристики, которые можно достичь с помощью кольцевой конфигурации анода, пока не оценены.

Хорошо поддаются масштабированию ВН с нераспыляемым геттером (НГ), конструкции которых достаточно исследованы и отработаны. Мировой лидер в их производстве SAES Getters (Италия) предлагает насосы, массогабаритные характеристики которых позволяют отнести их к миниатюрным [34, 35]. Их главным элементом является, как правило, сменный титан-ванадиевый картридж, от геометрической формы, пористости и состава поверхностного слоя которого зависит быстрота действия насоса.

Отсутствие масла и подвижных частей, успешное функционирование в сильных магнитных полях, постоянство быстроты действия во всем диапазоне давлений делают ВН с НГ эффективным средством достижения сверхвысокого вакуума. Отдельно в качестве преимущества выступает высокая быстрота действия по водороду. Предел насыщения, необходимость замены и восстановления картриджа являются негативным моментом при переходе на миниатюрный уровень.

В табл. 1.2 приведена сравнительная характеристика видов миниатюрных высоковакуумных насосов. Данные по каждому параметру даются в виде диапазона значений и представляют собой экспертную оценку.

Таблица 1.2.

Сравнительная характеристика видов
миниатюрных высоковакуумных насосов

Вид насоса	S_n , л/с	$P_{\text{пред}}$, Па	Характерный размер, мм	m, кг	W, Вт*
ТМН и гибридный ТМН	5-70	10^{-8} - 10^{-3}	50-100	0,2-2	$1 \cdot 10^2$
Магнитный электроразрядный ВН	0,1-10	10^{-9} - 10^{-4}	10-100	1-10	1-5
ВН с НГ	50-200**	10^{-10} - 10^{-8}	70-100	0,5-2	10^2 - 10^3

* Обозначения: S_n – номинальная быстрота действия по воздуху,

$P_{\text{пред}}$ – предельное остаточное давление, m – масса, W – потребляемая мощность.

** Быстрота действия по СО.

1.2.3. Миниатюрные низковакуумные насосы

В настоящее время не существует миниатюрных низковакуумных насосов, удовлетворяющих темпам миниатюризации оборудования.

Среди возможных средств, реализующих принципы низковакуумной откачки, предлагаются безмасляные спиральные ВН, работающие за счет относительного вращательного движения обращенных друг к другу спиралей Архимеда, одна из которых неподвижна. Газ захватывается периферийной частью спиралей, после чего при движении спиралей относительно друг друга перемещается к центру спирали, непрерывно сжимаясь. Цикл откачки завершается при достижении газом центра, где он удаляется через выхлопное отверстие.

Спиральные ВН выпускаются серийно рядом фирм на традиционном уровне габаритных размеров. В настоящее время ведется разработка миниатюрных ВН такого вида в ряде лабораторий США, а также University of Southern California (USC) и JPL, занимающихся моделированием работы

насоса [36].

Однако разработчики сталкиваются с рядом трудностей – требуемой высокой точностью изготовления и сборки, быстрым износом, утечкой газа и необходимостью создания компактного привода. Влияние точности изготовления на предельное остаточное давление насоса приведено на рис. 1.1.

Для увеличения коэффициента сжатия и, как следствие, снижения предельного остаточного давления спиральные ВН могут быть составлены из набора спиральных ячеек. USC и JPL было проведено моделирование

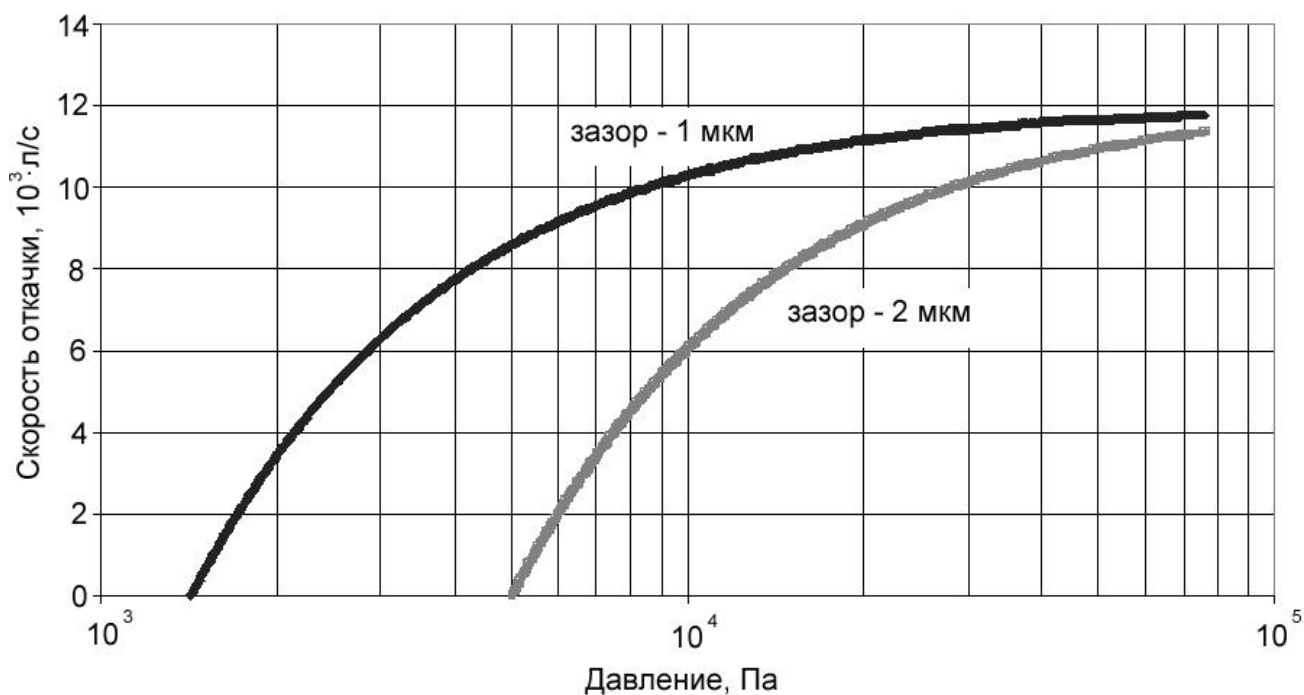


Рис. 1.1. Зависимость быстроты действия от давления на входе спиральных ВН с различными значениями зазоров между спиральями (JPL)

работы спиральных ВН, состоящих из разного числа ячеек, результаты которого приведены в табл. 1.3. Ячейки были изготовлены на сапфировой основе, материал спирали – никель. Диаметр спирали, содержащей 2,5 витка, составляет около 6 мм; режим работы – 100 циклов откачки в секунду.

Как видно из табл. 1.3 и рис. 1.2 практически во всем диапазоне давлений скорость откачки постоянна и не зависит от числа ступеней.

Другой способ повышения коэффициента сжатия – увеличение числа витков спирали, которое может достигать десяти. Оба способа ведут к увеличению габаритных размеров и энергопотребления.

С целью возможности миниатюризации низковакуумных насосов исследуются также безмасляные перистальтические ВН, принцип действия которых заключается в вытеснении объема при помощи волнообразно

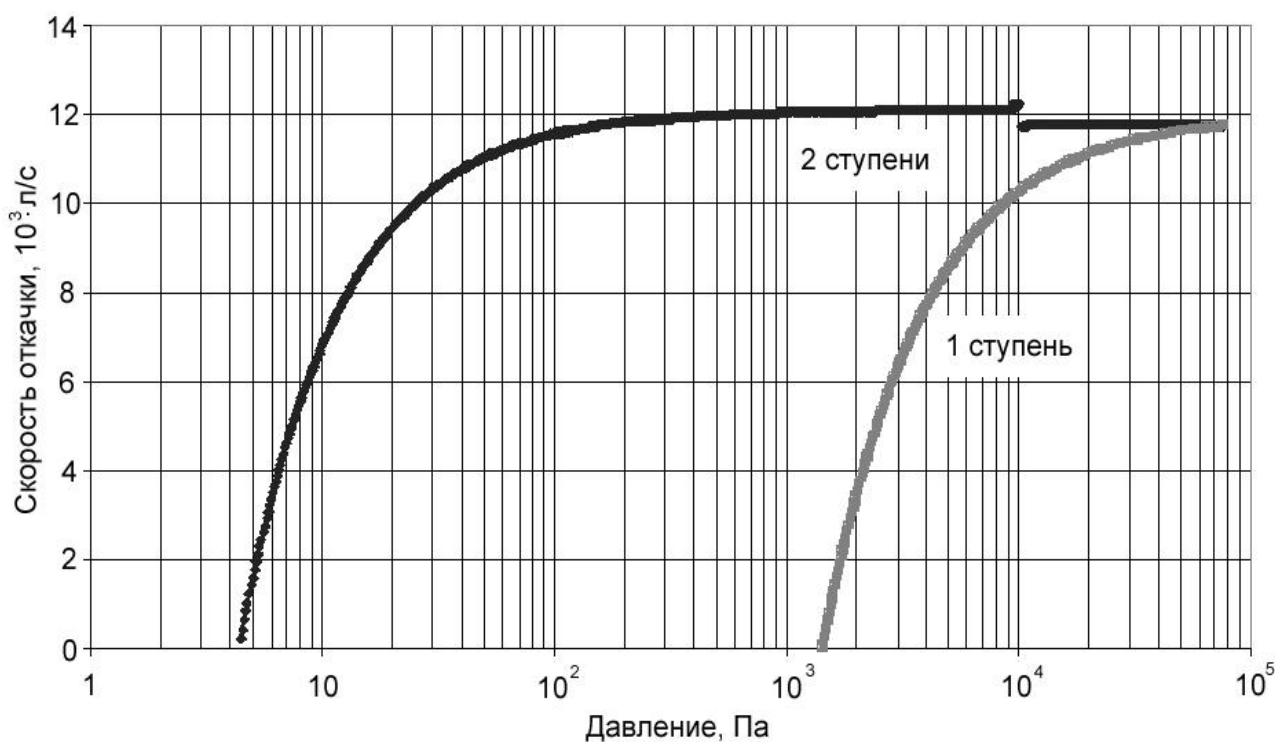


Рис. 1.2. Зависимость быстроты действия от давления на входе одноступенчатого и двухступенчатого спирального ВН (JPL)

Таблица 1.3.

Сравнение результатов моделирования спирального ВН с различным числом ступеней (JPL)

Число ступеней	1 ступень	2 ступени	3 ступени
Номинальная быстрота действия, л/с	$12 \cdot 10^{-3}$		
Предельное остаточное давление, Па	$1,5 \cdot 10^3$	4,4	$7 \cdot 10^{-1}$
Потребляемая мощность, Вт	2,5	4,8	7,2

сокращающихся стенок полых трубок. Для создания волны используются три типа привода: пневматический, пьезоэлектрический и магнитный.

На рис. 1.3 представлена структурно-конструктивная схема перистальтического ВН с пневматическим приводом, исследуемого JPL [37]. Насос содержит несколько откачных каналов 4, расположенных перпендикулярно пневмоканалам 3, взаимодействие между которыми осуществляется посредством камер блокирования 2.

Откачной канал 6 (рис. 1.4) имеет поперечное сечение в форме арки и заключен между пластиковой подложкой 3 и нижним слоем силиконовой резины 2. Пневмоканал прямоугольного сечения 4 образован соединением верхнего слоя резины 1 и тонкого слоя герметизирующего материала 5, нанесенного на нижний слой резины. В пневмоканал подается воздух под давлением, достаточном для прогиба нижнего резинового слоя и смыкания его с подложкой, что приводит к блокированию откачного канала. Периодически подавая воздух в соседние пневмоканалы с некоторым сдвигом фаз, можно создать перистальтическую волну, распространяющуюся вдоль откачных каналов и откачивающую газ в их направлении.

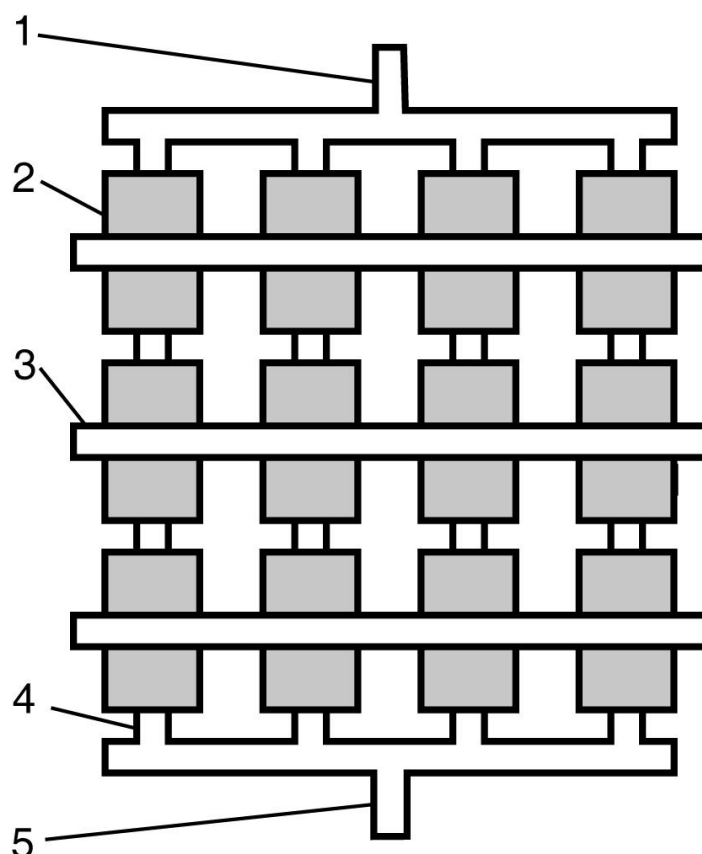


Рис. 1.3. Структурно-конструктивная схема перистальтического ВН с пневматическим приводом (JPL):

1 – входное отверстие; 2 – камера блокирования;
3 – пневмоканал; 4 – откачной канал; 5 – выхлопное отверстие

Ожидается, что такой насос будет способен работать в диапазоне от 10^2 до 10^{-1} Па. Габариты насоса оцениваются как $25 \times 50 \times 50$ мм, масса – 0,2 кг, потребляемая мощность – 2-3 Вт. Предполагается, что скорость откачки будет находиться в диапазоне $1,5 \cdot 10^{-3}$ - $1,5 \cdot 10^{-2}$ л/с.

Преимущества перистальтического ВН с пневмоприводом заключаются в минимальном техническом обслуживании и способности выдерживать ударные и вибрационные нагрузки. В перспективе возможно создание модулей, интегрирующих в себе насос вместе с пневмоисточником.

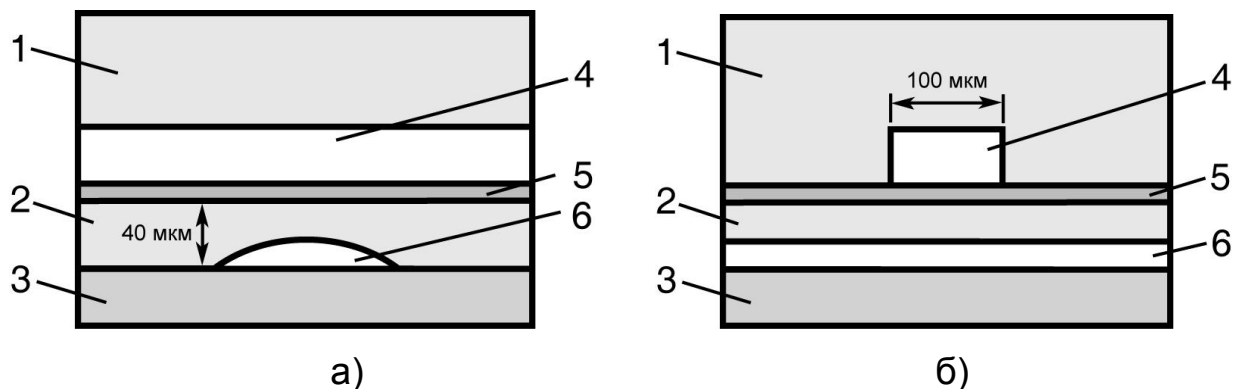


Рис. 1.4. Сечение камеры блокирования:

1 – верхний слой резины; 2 – нижний слой резины;
3 – подложка; 4 – пневмоканал; 5 – герметизирующий материал; 6 – откачной канал: а – поперечное,
б – продольное

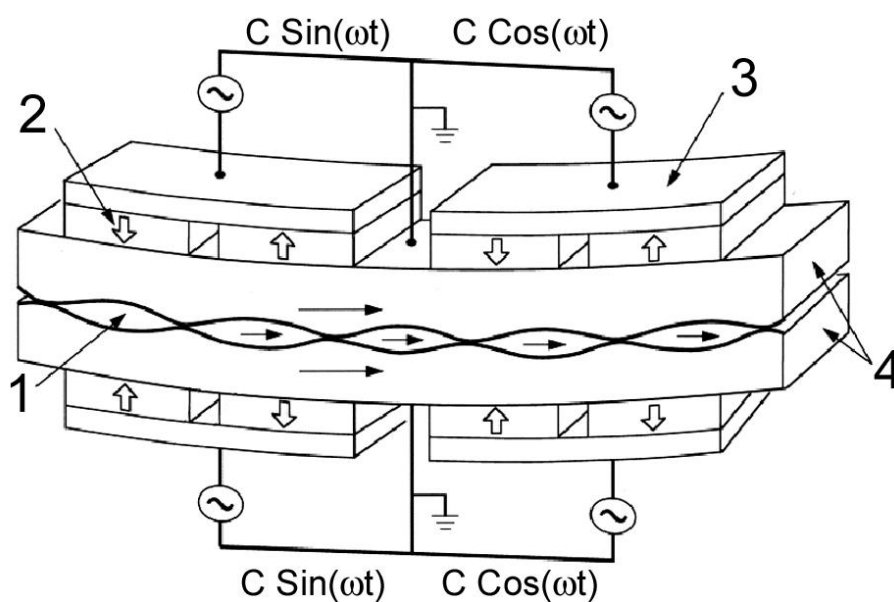


Рис. 1.5. Конструктивная схема перистальтического ВН с пьезоприводом (JPL):

1 – откачивающая камера; 2 – пьезоэлектрическое кольцо;
3 – электрод; 4 – статоры

JPL ведется разработка перистальтического ВН с пьезоприводом, принцип действия которого представлен на рис. 1.5 [38]. Откачка достига-

ется за счет формирования откачивающих камер 1, заключенных между двумя статорами 4, и их перемещения от впускного до выхлопного отверстия. На статорах 4, внутренняя поверхность которых покрыта силиконовой резиной, располагаются пьезоэлектрические кольца 2, разделенные на несколько секций. Соседние секции кольца имеют противоположную пьезоэлектрическую поляризацию. Приложенное к серебряным электродам 3, расположенным на пьезоэлектрических кольцах 2, в соответствии с заданными законами напряжение позволяет формировать откачивающие камеры, заполненные удаляемым газом, и перемещать их в направлении распространения перистальтической волны.

Пьезоэлектрические кольца делают трех-, четырех- и пятиволновыми. Количество волн, как и материал статора (нержавеющая сталь, алюминий, бронза), влияют на резонансную частоту, при которой амплитуда перистальтической волны, а, следовательно, и скорость откачки, максимальна. Вышеописанная структура заключается в корпус, к впускному и выпускному отверстиям которого подводятся трубки. Был создан экспериментальный образец насоса, однако его испытание проводилось только для откачки воды.

Исследуются различные конструктивные схемы перистальтического ВН с пьезоприводом, например, с прямолинейным распространением перистальтической волны [23].

Перистальтический ВН с магнитным приводом разрабатывается в JPL [39]. Насос состоит из нескольких откачивающих камер, изготовленных из силиконовой резины с алюминиевым покрытием. Постоянные магниты установлены над откачивающими камерами и на вращающемся колесе, расположенном под камерами. Оценочные параметры насоса: масса $\sim 0,2$ кг, объем $\sim 25 \times 50 \times 50$ мм, потребляемая мощность ~ 5 Вт, предельное остаточное давление – 10^{-1} Па.

Неоспоримыми преимуществами перистальтических ВН являются отсутствие масла, клапанов, малые "мертвые" объемы, низкая себестоимость и простота технологии. К их недостаткам относятся низкая производительность и большая скорость утечки, что на данный момент не позволяет использовать их в качестве форвакуумных для высоковакуумных насосов.

Весьма перспективными являются термомолекулярные ВН (известные в литературе также как транспирационные и насосы Кнудсена), исследование которых проводится в USC и JPL [40]. Отсутствие подвижных частей, масел и рабочих жидкостей, возможность применения технологий микроэлектромеханических систем делают привлекательным использование термомолекулярного ВН в качестве миниатюрного низковакуумного насоса.

Физический эффект термической транспирации (эффект термокрипа) был описан Рейнольдсом в 1879 году. После того, как в 1910 году Кнудсеном был создан многоступенчатый насос, этот вид насосов существовал лишь в виде лабораторных прототипов. Только в 90-х годах прошлого столетия под влиянием процессов миниатюризации на данный способ откачки внимание было обращено вновь.

Явление термической транспирации заключается в движении газа из холодного объема в горячий через соединяющий их капилляр. Откачная ступень термомолекулярного ВН (рис. 1.6) состоит из капиллярной части 1 – транспирационной мембраны с таким диаметром пор, что газ течет в них в молекулярном режиме, и соединительной части 2 с вязкостным режимом течения газа. Диаметр пор лежит в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Вдоль оси транспирационной мембраны создается температурный градиент и возникает поток газа от ее холодной стенки к горячей (рис. 1.7).

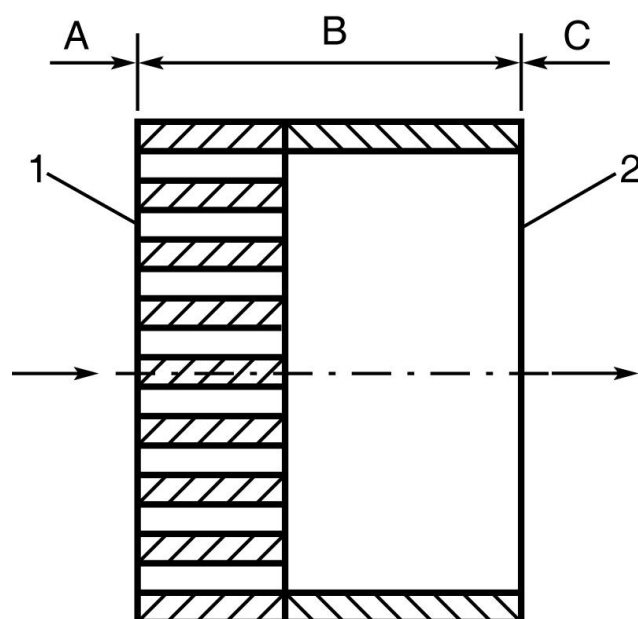


Рис. 1.6. Конструктивная схема откачной ступени термомолекулярного ВН:
 1 – капиллярная часть; 2 – соединительная часть;
 А – ступень $i-1$; В – ступень i ; С – ступень $i+1$

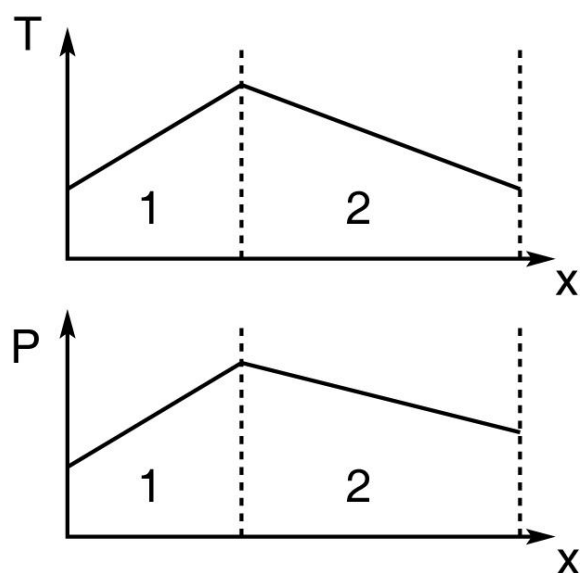


Рис. 1.7. Характер распределения температуры T и давления P по ширине x ступени термомолекулярного ВН:
 1 – капиллярная часть; 2 – соединительная часть

В соединительной части температура снижается к исходному значению. Для того чтобы достигнуть в насосе нужной разности давлений, то же самое повторяется на протяжении многих индивидуально нагреваемых ступеней. Разность давлений, получаемая на одной ступени, зависит от числа Кнудсена в капиллярной части.

USC была запатентована конструкция одноступенчатого термомолекулярного ВН (рис. 1.8), в основе которой лежит использование кремниевого аэрогеля в качестве транспирационной мембраны 5, что позволяет увеличить число Кнудсена в капиллярах [41].

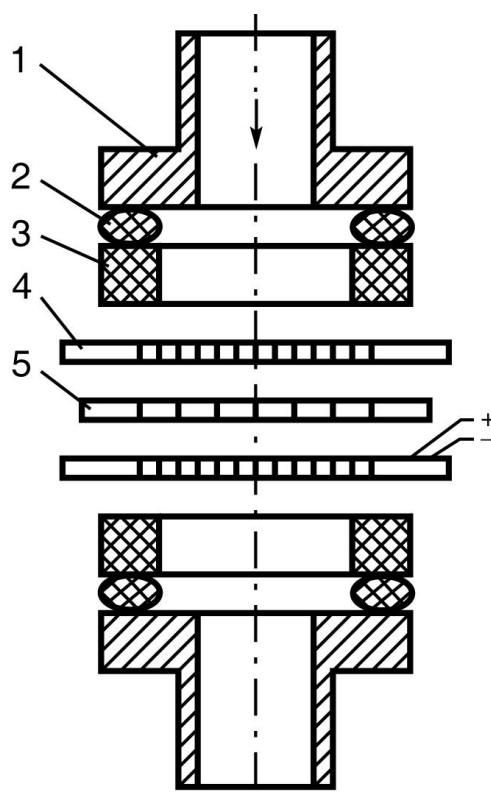


Рис. 1.8. Конструктивная схема одноступенчатого термомолекулярного ВН (USC):

1 – патрубок; 2 – уплотнение; 3 – соединительная часть;
4 – пластина с нагревателем; 5 – транспирационная мембрана

Таблица 1.4

Расчетные характеристики 24-ступенчатого миниатюрного термомолекулярного ВН (USC)

Параметр	Значение
Номинальная быстрота действия, л/с	$1,86 \cdot 10^{-4}$
Предельное остаточное давление, Па	1
Коэффициент сжатия	10
Объем насоса, см ³	33
Потребляемая мощность, Вт	1,5

Для создания температурного градиента применяется кремниевая пластина 4 с тонкопленочным золотым нагревателем. Соединительная часть представляет собой кольцо из пирекса 3, а в качестве уплотнения используется эпоксидная смола 2. Расчетные характеристики аналогичного насоса, состоящего из 24 ступеней, представлены в табл. 1.4.

В настоящее время USC и JPL создали и проводят испытания одноступенчатого термомолекулярного ВН, на основе которых планируется создание сорокаступенчатого насоса объемом не более 1 см³ и потребляющего около 100 мВт.

В нашей стране исследования термомолекулярного ВН ведется в Центральном аэрогидродинамический институте им. проф. Н.Е. Жуковского (г. Жуковский) [42].

Потенциально эти насосы имеют высокую производительность при многоступенчатом исполнении. Однако такая эффективность может быть достигнута при минимизации термических потерь сквозь его стенки. При

успешном решении проблемы эти миниатюрные насосы будут способны функционировать в диапазоне давлений от атмосферы до сверхвысокого вакуума.

В качестве миниатюрных низковакуумных насосов могут быть использованы мембранные (диафрагменные) насосы. Существует множество конструкций таких насосов с различными приводами, среди которых преобладает пьезопровод. Принцип действия мембранных насосов идентичен принципу действия всех ВН объемного действия – расширение рабочего объема, сжатие газа, его удаление. Отличительной особенностью миниатюрных мембранных ВН является то, что они могут использоваться как для откачки жидкостей, так и газов. При этом большинство созданных конструкций используются для откачки и транспортировки именно жидкостей, потому характеристики их работы по газам могут быть лишь оценены.

В табл. 1.5 приведена сравнительная характеристика видов миниатюрных низковакуумных ВН.

Рассмотренная совокупность принципов откачки не является исчерпывающей для решения задач миниатюризации. Под влиянием процессов миниатюризации следует ожидать использования новых физических принципов действия в ВН.

1.3 Задачи исследования

Проведенные литературный обзор, патентный поиск и маркетинговые исследования показали, что потребности рынка в миниатюрных высоковакуумных средствах откачки на сегодняшний день удовлетворены, од-

Таблица 1.5

Сравнительная характеристика видов миниатюрных низковакуумных насосов

Вид насоса	S_n , л/с	$P_{\text{пред}}$, Па	Характерный размер, мм	m , кг	W , Вт*
Спиральный ВН	$10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1} \div 10^3$	10÷30	—**	1÷10
Перистальтический ВН	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$10^{-1} \div 10$	20÷50	0,2÷0,5	1÷10
Термомолекулярный ВН	$10^{-4} \div 10^{-2}$	1÷10	30÷100	—	1÷5
Мембранный ВН	$10^{-7} \div 10^{-3}$	$>5 \cdot 10^3$	$10^{-1} \div 10$	$10^{-3} \div 10^{-1}$	$10^{-3} \div 5$

* Обозначения: S_n – номинальная быстрота действия по воздуху, $P_{\text{пред}}$ – предельное остаточное давление, m – масса, W – потребляемая мощность.

** Данные отсутствуют.

нако в качестве насосов предварительного разряжения и форвакуумных насосов для них используются традиционные низковакуумные ВН, что тормозит процессы миниатюризации наукоемкого вакуумного технологического и контрольно-аналитического оборудования [43]. Исходя из этого, следует, что наибольшим научным и практическим интересом обладает задача исследования и разработки МНН, которые могут быть использованы в качестве насосов предварительного разряжения, окончательного разряжения и форвакуумных насосов.

В монографии рассматривается миниатюризация откачных средств вакуумного технологического и контрольно-аналитического оборудования ЭТ, и вопросы разработки низковакуумных насосов нового класса с характерными габаритными размерами от 5 до 100 мм.

Граф связей свойств оборудования ЭТ и ВН, представленный на рис. 1.9, определяет собой постановку задачи. Вершинами графа являются показатели качества оборудования ЭТ, высоковакуумных насосов и низковакуумных насосов, ребрами – факт связи друг с другом.

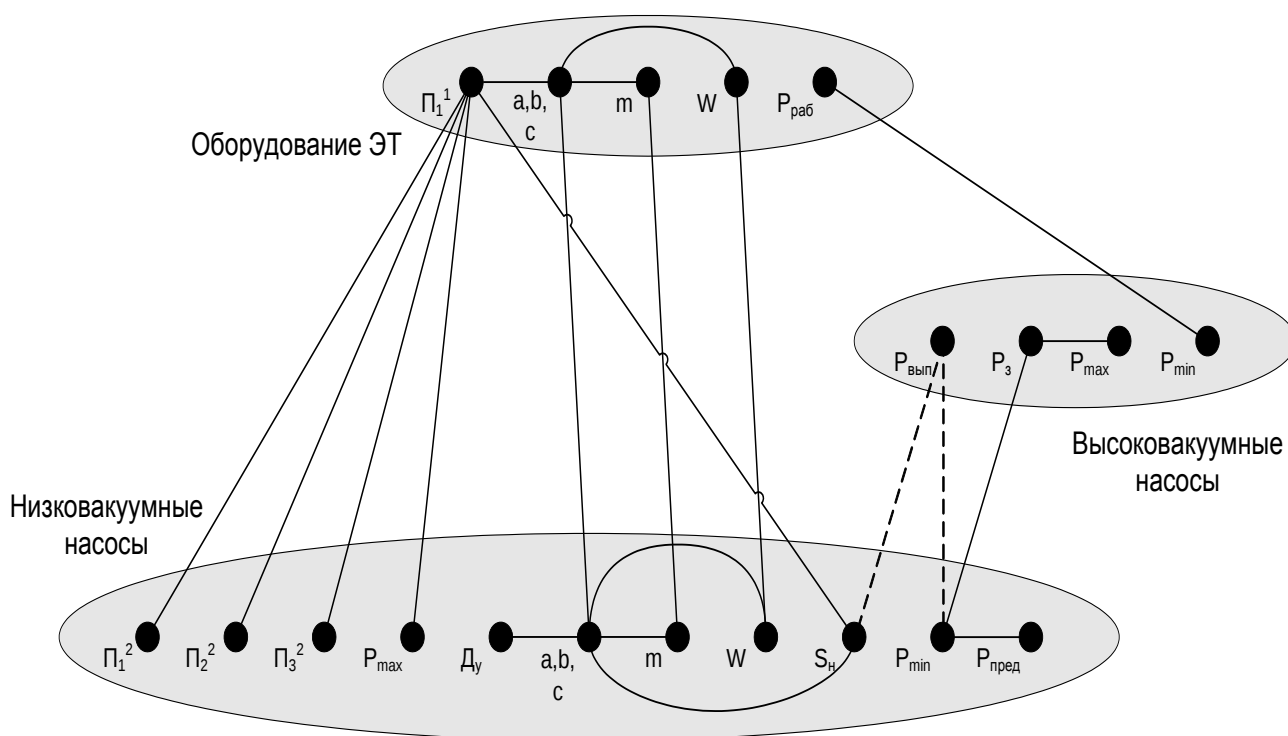


Рис. 1.9. Граф связей свойств оборудования ЭТ и вакуумных насосов:

Π_0 – область применения и условия эксплуатации; Π_1 – состав откачиваемой газовой среды; Π_2 – наличие углеводородных соединений; Π_3 – пространственная ориентация; a – длина; b – ширина; c – высота; m – масса; W – потребляемая мощность; D_y – диаметр условного прохода; S_n – номинальная быстрота действия; P_{max} – наибольшее рабочее давление; P_{min} – наименьшее рабочее давление; $P_{пред}$ – предельное остаточное давление; $P_{вып}$ – выпускное давление; $P_з$ – давления запуска

Исходными данными для решения поставленных задач являются значения показателей качества разрабатываемого миниатюрного оборудования ЭТ. Прогнозные значения габаритных размеров a , b , c от 100 до 500 мм, массы m от 5 до 20 кг, потребляемой мощности W от 50 до 300 Вт миниатюрного оборудования ЭТ определяют предельные значения длины a , ширины b , высоты c , массы m , диаметра условного прохода D_y , потребляемой мощности W , и номинальной быстроты действия S_n МНН.

Области применения и условия эксплуатации Π_0 определяет требуемые состав откачиваемой газовой среды Π_1 , возможность присутствия углеводородных соединений Π_2 , пространственную ориентацию Π_3 , номинальную быстроту действия насоса S_n и наибольшее рабочее давление $P_{\max}$ МНН. Здесь и далее принимается, что давление запуска P_z МНН совпадает с его наибольшим рабочим давлением $P_{\max}$.

При переходе к новому классу габаритных размеров технологии ЭТ не изменяются, что позволяет предъявлять такие же требования к остаточной газовой среде оборудования ЭТ, как и на традиционном уровне габаритных размеров: диапазон рабочих давлений $P_{\text{раб}}$ — от 10^{-2} (масс-спектрометр) до 10^{-7} Па (РЭМ).

Поскольку необходимый рабочий вакуум относится к классу высокого, то для его достижения необходимо применение миниатюрных высоковакуумных насосов (МВН), эксплуатационные показатели качества которых также будут накладывать требования на МНН, используемых в качестве насосов предварительного разрежения и форвакуумных насосов для них. Проведенный анализ МВН показал, что при масштабировании средств высоковакуумной откачки их функциональные и эксплуатационные показатели качества остаются на прежнем уровне: диапазон наименьшего рабочего давления $P_{\min}$ — от 10^{-10} (ВН с нераспыляемым геттером) до 10^{-6} (магнитные электроразрядные ВН), выпускного давления $P_{\text{вып}}$ (для газоперека-

чивающих насосов) и давления запуска P_3 – от 10^{-2} (ВН с нераспыляемым геттером) до 10^2 Па (турбомолекулярные ВН). Параметры МВН $P_{\text{вып}}$ и P_3 накладывают ограничения на наименьшее рабочее давление P_{min} МНН, с которым связано его предельное остаточное давление $P_{\text{пред}}$. При использовании МНН в качестве форвакуумного $P_{\text{вып}}$ МВН определяет S_n и P_{min} МНН (на рис. 1.9 отмечено пунктиром).

Исходя из потребностей разрабатываемого миниатюрного оборудования ЭТ исследовались и разрабатывались МНН со следующими основными техническими требованиями:

состав откачиваемой газовой среды Π_1	обычный атмосферный
номинальная быстрота действия по воздуху S_n , м ³ /с не менее $5 \cdot 10^{-6}$	
наименьшее рабочее давление P_{min} , Па	не более 100
наибольшее рабочее давление P_{max} , Па	не менее 10^5
предельное остаточное давление $P_{\text{пред}}$, Па	не более 10
диаметр условного прохода D_y , мм	от 1 до 10
длина a , мм	не более 100
ширина b , мм	не более 100
высота c , мм	не более 100
масса m , кг	не более 2
потребляемая мощность W , Вт	не более 10
наличие углеводородных соединений Π_2	недопустимо
пространственная ориентация Π_3	произвольная

Для достижения цели поставленная задача разбивается на ряд следующих подзадач, которые и были решены:

- поиск ФПД МНН;
- синтез рациональной структурно-конструктивной схемы МНН;
- разработка методики формирования математических моделей

функционирования МНН;

- разработка математической модели функционирования МНН;
- моделирование МНН и установление основных зависимостей между функциональными характеристиками МНН и конструктивными параметрами его структурных составляющих;
- проведение экспериментальных исследований МНН;
- разработка методики проектирования МНН;
- разработка конструкторской документации на МНН.

Миниатюризация представляет собой одну из тенденций развития оборудования ЭТ. Основными техническими направлениями ее реализации являются электронная и ионная литография, электронная микроскопия, газовая хроматография, масс-спектрометрия и нанотехнологии. Установлена необходимость миниатюризации элементной базы вакуумных систем, в том числе вакуумных насосов, с целью снижения массогабаритных характеристик оборудования ЭТ.

На сегодняшний день в качестве насосов предварительного разряжения и форвакуумных насосов используются традиционные низковакуумные насосы, что тормозит процессы миниатюризации.

Многие вопросы разработки миниатюрных спиральных, перистальтических, термомолекулярных и мембранных ВН остаются нерешенными. Установлено, что отсутствие МНН объясняется сложностью применения на миниатюрном уровне принципов действия традиционного оборудования вакуумной техники и трудностью масштабирования существующих конструкций насосов.

ГЛАВА 2. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ МИНИАТЮРНОГО НИЗКОВАКУУМНОГО НАСОСА

2.1. Поиск физического принципа действия миниатюрного низковакуумного насоса

Поиск ФПД технического объекта (ТО) при отсутствии аналога или прототипа представляет собой одну из главных задач в деятельности разработчика. Поскольку решение данной задачи относится к начальным этапам проектирования, она является ответственной и определяющей облик разрабатываемого ТО или технической системы, в которой он является подсистемой. Ошибочное принятие решения на этой стадии может перечеркнуть всю работу, сделанную на последующих. Возврат к этапу определения ФПД ведет к увеличению временных, финансовых и моральных затрат на проектирование.

Существует два класса задач поиска ФПД ТО: выбор из существующих ФПД и синтез нового. Поскольку в большинстве случаев каждому из используемых ФПД соответствуют существующие виды ТО, задачу выбора ФПД можно свести к задаче выбора вида ТО, которая основывается на сравнении видов, содержащих множество ТО. Виды ТО представляют собой классы ТО, описывающие его ФПД. В этом случае виды описываются диапазонами значений параметров или номинальными значениями признаков, поэтому классические методы выбора [44-50], основанные на сравнении значений критериев, в качестве которых выступают параметры и признаки, для решения этой задачи применены быть не могут.

Известны работы направленные на решение задачи выбора вида, ис-

пользующие таблицы соответствия в области проектирования ТО [51] и вакуумного технологического оборудования [52]. Основой решения задач выбора вида является установление эвристических логических зависимостей между видами ТО и диапазонами значений критериев. Для решения задач выбора вида ТО в проектировании вакуумного оборудования предложен логико-эвристический подход, основанный на обобщении и обработке эвристических знаний высококвалифицированных разработчиков и создании формализованного метода многокритериального выбора [53].

На первом этапе поиска ФПД ТО проводят выбор среди известных видов ТО в соответствии с техническими требованиями. В случае выбора наилучшего в некотором смысле вида задача считается решенной, и переходят к следующим этапам проектирования. Если в результате решения задачи выбора оказывается, что ни вид ТО не удовлетворяет техническим требованиям, необходима их корректировка или переход к задаче синтеза ФПД.

В такой ситуации, когда возникает потребность, не реализуемая существующими видами ТО, появляется необходимость разработки принципиально новых устройств путем осуществления синтеза новых ФПД. Методика синтеза ФПД общеизвестна [54-56]. Поиск новых ФПД используется при решении различных задач проектирования вакуумного оборудования, в частности, при поиске вспомогательных функций для улучшения основных функций вакуумных разъемных соединений, вакуумных вводов движения, вакуумных клапанов и других устройств [57].

2.1.1 Классификация вакуумных насосов

Исходными данными для решения задачи выбора ФПД МНН является множество существующих видов ВН. Однако полностью определить это

множество на основе существующих литературных источников затруднительно.

Основной документ, регламентирующий терминологию вакуумной техники ГОСТ 5197-85 "Вакуумная техника. Термины и определения" [58], устанавливает определения терминов большинства существующих классов ВН без указания признака, в результате деления по которому они получены. Использование терминов из ГОСТ 5197-85 в качестве наименований видов ВН для решения задачи выбора вида МНН приведет к тому, что к выбору будут допущены классы, относящиеся к разным классификациям (например, "ВН с масляным уплотнением" и "пластинчато-роторный ВН"), и классы разных уровней иерархии классификации (например, "ВН объемного действия" и "пластинчато-роторный ВН"). Таким образом, один и тот же ВН будет принадлежать сразу нескольким видам, являющимися альтернативами в задаче выбора, что недопустимо. Например, насос 2НВР-5ДМ принадлежит к трем вышеперечисленным видам ВН.

Решение задачи построения классификации ВН является актуальной в современной вакуумной науке. Создание классификаций вакуумного оборудования и его элементов (в частности, ВН) даст возможность представить вакуумное оборудование и его элементную базу в формализованном виде для использования в системах автоматизированного проектирования. Наличие классификаций сделает возможным систематизированное построение материала учебных курсов, учебников и пособий по специальностям вузов, связанным с изучением вакуумного оборудования, что повысит уровень подготовки специалистов. Упорядочение терминов позволит избежать синонимии и многозначности в литературе, сделает более эффективным общение специалистов вакуумной техники между собой и специалистами смежных областей.

Вопрос построения классификации ВН является сложным, поскольку

ВН обладают целым рядом существенных признаков, которые могут являться основаниями деления. В зависимости от целей проектирования, условий производства, реализации и использования разработчиков, изготовителей, продавцов и потребителей интересует та или иная совокупность существенных для них признаков. Выбор признаков является ответственным этапом ее построения – отсутствие в классификации существенных признаков ведет к ее неполноте, присутствие несущественных – к избыточности. Решение задачи построения классификации осложняется тем, что множество ВН труднообозримо из-за своего разнообразия. В работе [59] подробно описаны проблемы терминологии и классификации ВН в литературе.

В основе построения существующих классификаций ВН [59-63] лежат эвристические принципы, отражающие субъективный опыт их разработчиков. Для того чтобы избежать связанных с этим недостатков при построении классификации ВН предлагается использовать системную модель ТО:

$$CM\ TO = \langle I, F, S, \Pi, P, C \rangle, \quad (2.1)$$

где I – имя,

F – множество функций,

S – множество структур,

Π – множество признаков,

P – множество параметров,

C – множество связей с окружением.

Множество признаков, из которого следует выбирать признаки для построения классификации, представляет собой следующие подмножества:

$$\Pi = \langle {}_f\Pi, {}_s\Pi, {}_p\Pi, {}_c\Pi, {}_a\Pi \rangle, \quad (2.2)$$

где $f\Pi$ – множество функциональных признаков,
 $s\Pi$ – множество структурных признаков,
 $p\Pi$ – множество признаков параметров ТО,
 $c\Pi$ – множество признаков связей ТО с окружением,
 $a\Pi$ – множество абстрактных признаков.

Множество функциональных признаков $f\Pi$ состоит из подмножеств признаков действия $f\Pi_D$, операнда $f\Pi_O$, условий и ограничений действий $f\Pi_H$:

$$f\Pi = \langle f\Pi_D, f\Pi_O, f\Pi_H \rangle. \quad (2.3)$$

Опираясь на вышеописанный подход выбора признаков для классификации, в соответствии с правилами логического деления и обобщения [64] предлагается классификация ВН, созданная на основе фасетного и иерархического принципов построения. В основе фасетов верхнего иерархического уровня (табл. 2.1) лежат восемь существенных признаков:

$f\Pi_D = (\Phi_4 - \text{физический принцип удаления газа, } \Phi_3 - \text{количество ФПД используемых для откачки}),$
 $f\Pi_O = (\Phi_1 - \text{степень достигаемого вакуума}),$
 $s\Pi = (\Phi_5 - \text{количество ступеней откачки}),$
 $p\Pi = (\Phi_7 - \text{уровень габаритных размеров, } \Phi_6 - \text{присутствие тяжелых углеводородных соединений в рабочей камере, } \Phi_8 - \text{уровень температуры рабочего тела}),$
 $c\Pi = (\Phi_2 - \text{применение}).$

Рядом с классами указаны номера соответствующих терминов из ГОСТ 5197-85. Ряд классов в стандарте не описан.

Известные классификации ВН [59-63] представляют собой иерархические классификации, основания деления в которых отражают ФПД. Сохраняя предложенный в этих работах подход, учитывая замечания к ним,

Таблица 2.1.

Классификация ВН. Фасеты верхнего иерархического уровня

Φ_1^*	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7	Φ_8
Низковакуумный насос (23)	ВН предварительного разряжения (27)	Простой ВН	Газоперекачивающий ВН (28)	Одноступенчатый ВН	Масляный ВН	Сверхбольшой ВН	Криогенный ВН (65)
Высоковакуумный насос (24)	ВН окончательного разряжения	Комбинированный ВН (66)	Газоулавливающий ВН (56)	Двухступенчатый ВН	Безмасляный ВН	Большой ВН	Непрогреваемый ВН
	Форвакуумный насос (25)			N-ступенчатый ВН		Традиционный ВН	Прогреваемый ВН
	Бустерный ВН (26)					Миниатюрный ВН	
						Сверхминиатюрный ВН	

* Обозначения:

Φ_1 – степень достигаемого вакуума;

Φ_2 – применение;

Φ_3 – количество ФПД, используемых для откачки;

Φ_4 – физический принцип удаления газа;

Φ_5 – количество ступеней откачки;

Φ_6 – присутствие тяжелых углеводородных соединений в рабочей камере;

Φ_7 – уровень габаритных размеров;

Φ_8 – уровень температуры рабочего тела.

анализируя литературу по вакуумной технике [63, 65-76], и принимая во внимание появление новых ФПД [42, 77], фасет Φ_4 "физический принцип удаления газа" рассмотрен вглубь, в результате чего построена иерархическая классификация ВН по ФПД (рис. 2.1).

Созданная классификация по ФПД охватывает всю известную совокупность видов ВН – от не выпускаемых отечественной промышленностью (вихревой ВН) до находящихся на стадии НИР (термомолекулярный ВН). Ребрами представленной иерархической структуры являются признаки, выступающие в качестве оснований деления, а элементами – значения признаков (классы ВН).

В этой классификации в качестве признаков использованы те, которые являются наиболее существенными по отношению к ФПД. В общем случае классификация ВН по ФПД представляет собой фрагмент классификации ВН – насосы разных иерархических уровней могут быть классифицированы по другим признакам, образуя, таким образом, локальные фасеты. Например, ВН объемного действия по типу уплотнения классифицируется как ВН с масляным (32), жидкостным (32) и сухим уплотнением (34); струйные ВН по роду рабочего тела делятся на жидкостно-струйные ВН (47), газоструйные ВН (48) и пароструйные ВН (49). Основаниями деления могут служить тип привода рабочего тела, тип испарителя геттера,

вещество рабочего пара, специфика конструкции и эксплуатации и др.

Отличительной особенностью созданной классификации по ФПД является присутствие в ней комбинированных насосов (гибридный турбомолекулярный, диффузионно-эжекторный, конденсационно-адсорбционный, конденсационно-геттерный ВН).

Для соответствия современному языку специалистов вакуумной техники и наиболее полного отражения сущности классов ряд их терминов (ВН молекулярного действия, криогенный ВН, турбомолекулярный ВН, ионно-трансферный ВН, ионно-геттерный ВН) в предложенной классификации по сравнению с ГОСТ 5197-85 был изменен.

Разработанная классификация содержит классы, термины которых по разным причинам не присутствуют в ГОСТ 5197-85, тем не менее, известны в литературе, в том числе термины новых видов ВН (одно-, двух-, поступенчатый ВН, безмасляный ВН, мембранный ВН, сильфонный ВН, двухроторный ВН типа Рутс, трехлепестковый ВН, когтевой ВН, винтовой ВН, четырехроторный ВН, спиральный ВН, перистальтический ВН, термомолекулярный ВН, молекулярный ВН, ВН Геде, ВН Хольвека, ВН Зигбана, гибридный турбомолекулярный ВН, вихревой ВН, ВН с нераспыляемым геттером, ВН с распыляемым геттером, конденсационный ВН без использования криозахвата, конденсационный ВН с использованием криозахвата, различные виды комбинированных ВН). Предполагается, что в литературе эти термины определены.

Для соблюдения правил соразмерности и непрерывности деления [64] в классификации введены восемь терминов классов ВН, употребляемые впервые. Ниже приведены их вербальные определения [78].

ВН окончательного разряжения – ВН, используемый для достижения давления остаточного газа, при котором проводится технологический

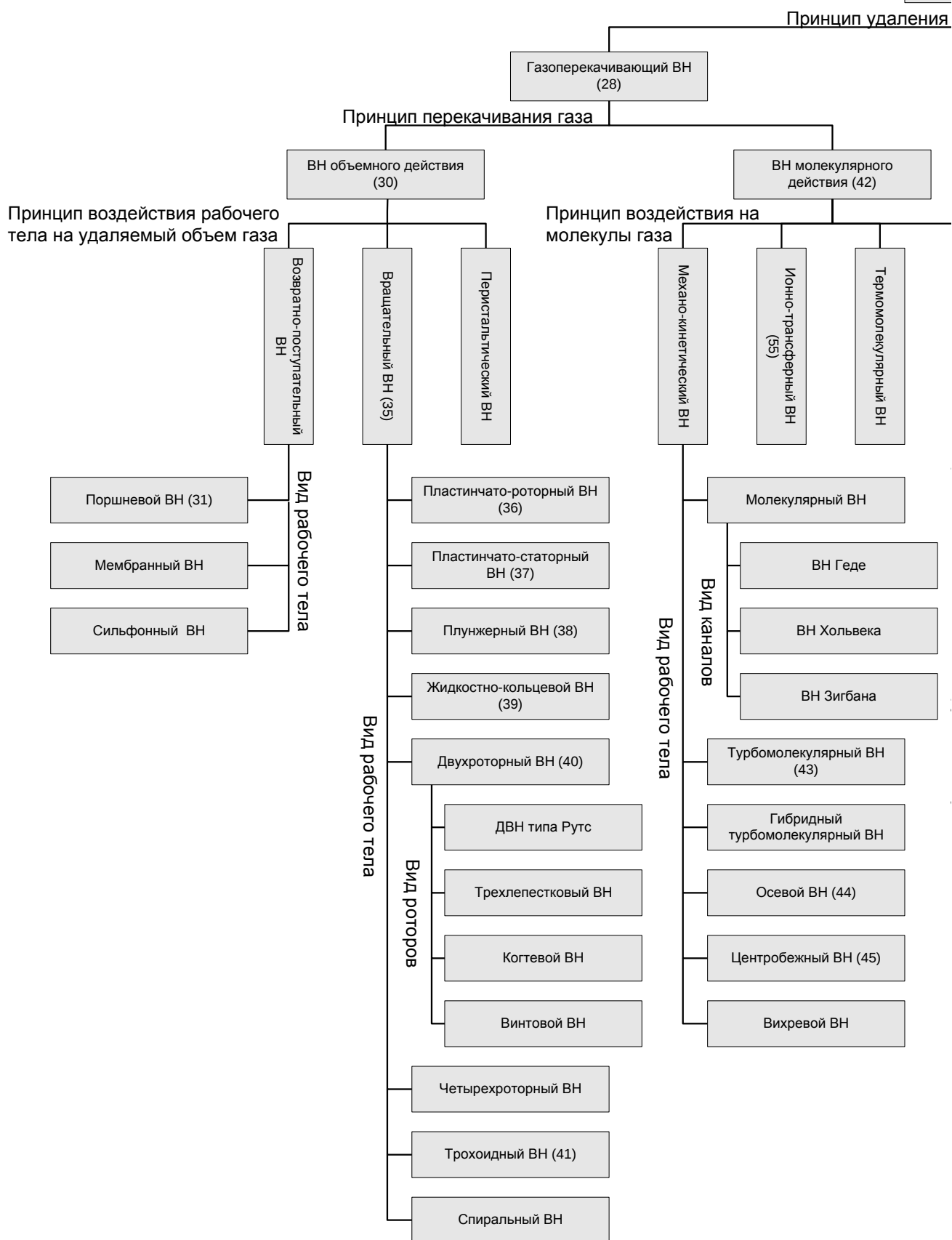
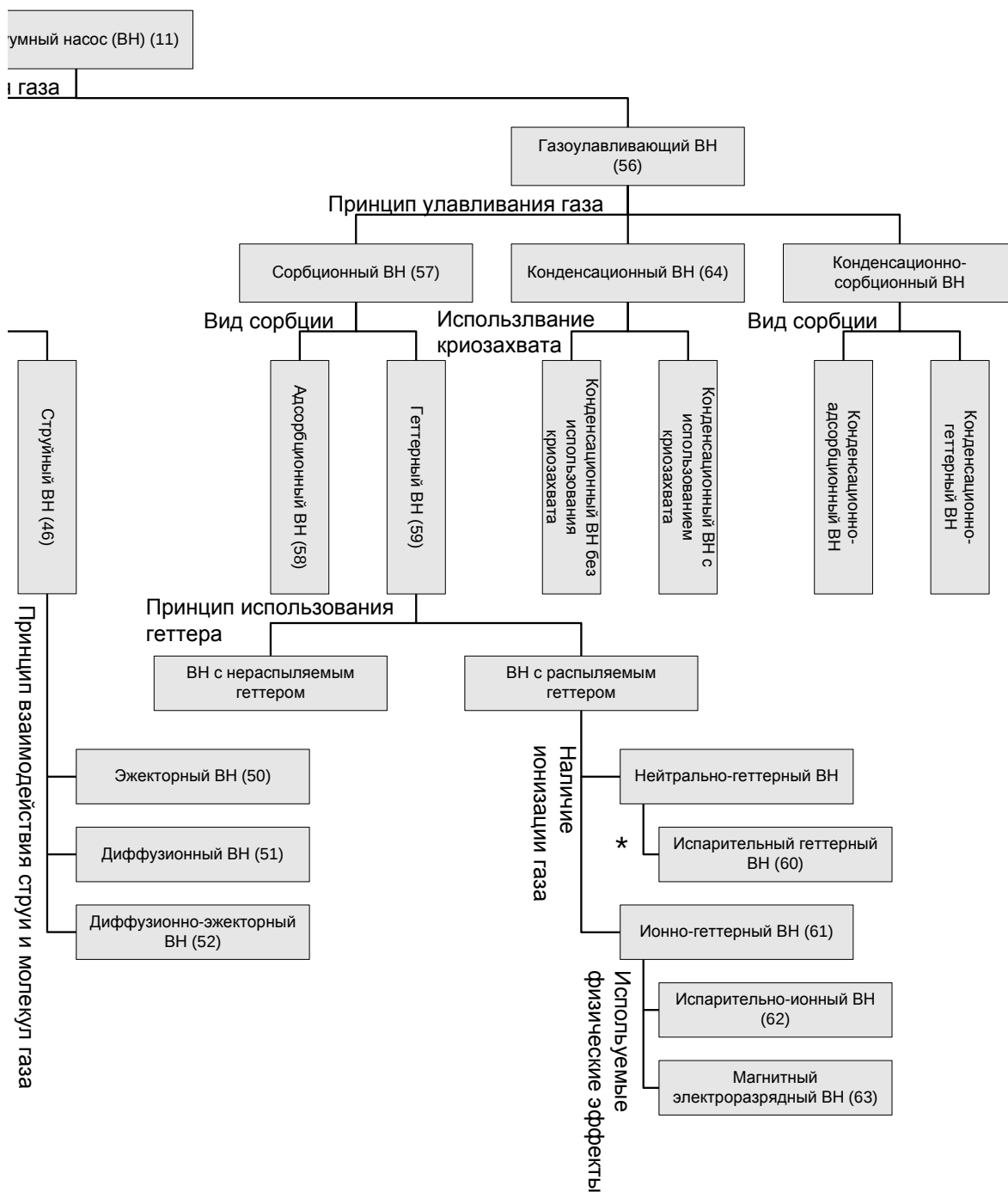


Рис. 2.1. Классификация ВН по ФПД



* - Способ распыления геттера

процесс.

Простой ВН – ВН, в котором используется один ФПД.

Масляный ВН – ВН, в рабочей камере которого присутствуют углеводородные соединения с массовыми числами более 44.

Непрогреваемый ВН – ВН, рабочее тело которого не требует нагрева или охлаждения для функционирования.

Прогреваемый ВН – ВН, рабочее тело которого требует нагрева для функционирования.

Возвратно-поступательный ВН – ВН объемного действия, рабочее тело которого воздействует на удаляемый объем газа, двигаясь возвратно-поступательно.

Механо-кинетический ВН – ВН молекулярного действия, в котором движущиеся механические тела передают кинетическую энергию молекулам откачиваемого газа.

Нейтрально-геттерный ВН – ВН с распыляемым геттером, в котором не происходит ионизации откачиваемого газа.

Определения терминов классов, составляющих фасет Φ_7 "уровень габаритных размеров", приведены в табл. 1.1.

Приведенная классификация не является исчерпывающей. Ее расширение может быть вызвано интересами разработчиков, изготовителей, продавцов и потребителей ВН. Она может быть дополнена, например, классификацией ВН по скорости действия, энергопотреблению, темпам продаж и т. д. Технический прогресс также способен внести свои коррективы – процессы миниатюризации привели к появлению фасета Φ_7 "уровень габаритных размеров". Более детальное построение классификации является задачей и прерогативой специалистов в области конкретных видов ВН.

2.1.2 Методика выбора вида технического объекта для проектирования нового класса

В решении задачи выбора вида ТО для проектирования его нового класса не могут быть использованы известные методики [51-53], успешно применяемые для решения задачи выбора ТО для определенных технологических и исследовательских процессов. Таким образом, встает необходимость разработки методики решения задачи выбора, постановка которой отличается от известных.

Нетривиальность данной задачи заключается в том, что требуется осуществить выбор вида ТО с показателем качества, требуемое значение которого не обеспечивается множеством существующих на данный момент альтернатив "по определению", т.е. результатом выбора с помощью известных методик будет пустое множество альтернатив. Например, в решаемой задаче существующие виды ВН (рисунок 2.1) за редким исключением (турбомолекулярный, геттерный ВН), которые уже удалось подвергнуть миниатюризации, не обеспечивают диапазон значений характерного габаритного размера, удовлетворяющий техническим требованиям. Для возможности проведения выбора вида ТО для проектирования его нового класса требуется развитие существующих методик.

Новый класс ТО появляется вследствие новых потребностей общества и техники в виде нового принципа действия, функции, особенности функционирования, области применения или диапазона значений параметра ТО. При этом возникают новые значения известного или вводимого признака ТО. Такой признак назовем *порождающим признаком*, а поставленный ему в соответствие параметр, если таковой существует, *порождающим параметром*.

В общем случае системная модель задачи принятия решений, к которой относится задача выбора вида ТО для проектирования его нового класса, описывается совокупностью семи множеств

$$\text{СМ ЗПР} = \langle E, T, K, A, F, G, \varphi \rangle, \quad (2.4)$$

где E – множество допустимых альтернативных;

T – множество видов постановки задачи;

K – множество критериев выбора;

A – множество методов измерения предпочтений;

F – множество отображений множества допустимых альтернатив в множество значений критериев;

G – множество систем предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР);

φ – множество решающих правил, отражающих систему предпочтений ЛПР.

Известна методика формально-эвристического выбора вида ТО для определенных технологических и исследовательских процессов [53], которая принимается в качестве исходной для разработки методики выбора вида ТО для проектирования его нового класса.

В соответствии с системной моделью исходная методика содержит следующие основные этапы:

- формирование вектора параметров и признаков ТО;
- формирование вектора критериев выбора;
- определение диапазонов и градаций значений критериев выбора;
- формирование множества альтернатив;
- формирование эвристической модели выбора вида ТО;
- формирование технических требований в виде значений критериев;
- выбор вида ТО;
- выбор среди множества видов ТО, удовлетворяющих техническим требованиям.

Множество параметров и признаков видов ТО P аналогично исходной методике формируется из его основных показателей качества:

$$P = P_f \cup P_e \cup P_k \cup P_p, \quad (2.5)$$

где P_f , P_e , P_k , P_p – множество соответственно функциональных, эксплуатационных, конструктивных и производственных показателей качества.

Множество P может быть представлено в виде вектора параметров и признаков ТО:

$$P = (P_j), j = \overline{1, m}, \quad (2.6)$$

где m – число параметров и признаков.

В исходной методике функция формирования вектора критериев выбора ω усекает вектор P в соответствии с множеством известных эвристических правил $\mathcal{E}$:

$$\omega : \mathcal{E} \times P \rightarrow K, K \subset P, \quad (2.7)$$

где K – вектор критериев выбора.

Развивая исходную методику и принимая во внимание, что параметры и признаки могут быть поставлены в соответствие нескольким параметрам, эвристические правила $\mathcal{E}$ должны быть дополнены следующими:

Правило 1. Из вектора параметров и признаков P должен быть удален вектор порождающих параметров и признаков P_{Π} , содержащий принадлежащие вектору P порождающий признак, порождающий параметр и описывающие их параметры.

Элементы вектора P_{Π} не могут рассматриваться в качестве критериев, поскольку их значения существующих видов ТО не попадают в диапазон, соответствующий новому классу, что приведет к тому, что результатом выбора будет также пустое множество альтернатив. Вышесказанное относится и к случаю, когда порождающий признак или параметр, описываются несколькими параметрами.

Правило 2. Из вектора свойств и признаков P должен быть удален вектор

связи с порождающими параметрами и признаками $P_{св}$, содержащий параметры и признаки, связанные с элементами вектора $P_{п}$.

Это правило является следствием правила 1. Поскольку элементы вектора $P_{п}$ не могут рассматриваться в качестве критериев, то связанные с ними элементы вектора $P_{св}$ также исключаются из вектора P .

Например, реализация требуемых значений порождающего параметра "номинальная быстрота действия" при разработке класса "сверхбыстродействующий ВН" приведет к неизбежному увеличению параметра "потребляемая мощность", значения которого не обеспечивает ни один вид ВН.

Определение диапазонов и градаций значений критериев выбора проводится в соответствии с исходной методикой. В результате каждый вид может иметь по критерию следующие состояния: интервалы численных значений, дискретные численные значения, качественные значения в номинальной шкале, качественные значения в порядковой шкале.

Для формирования множества альтернатив E используются различные источники информации – классификации, книги, периодические издания, каталоги, паспортные данные, знания экспертов, интернет и другие:

$$E = \{e_i\}, i = \overline{1, n}, \quad (2.8)$$

где n – число альтернатив.

Каждый вид содержит множество ТО, описываемых значениями параметров и признаков, используемых в качестве критериев. Значение критерия вида существует в виде диапазона, определенного значениями критерия всех ТО, принадлежащих виду. Таким образом, каждый вид способен обеспечить выполнение конкретного требования в определенном диапазоне его значений, представленных в метрической или в номинальной шкалах.

Основной подход в решении задачи выбора вида ТО заключается в установлении логических зависимостей между видами и значениями или интервалами значений критериев выбора. Совокупность установленных зависимостей представляет собой эвристическую модель выбора вида ТО, которую можно представить в виде таблицы соответствия, аналогично исходной методике.

Формирование таблицы соответствия основывается на экспертной оценке вида по каждому критерию с последующей ее обработкой согласно методам экспертных оценок [46, 79]. В случае, если вид обеспечивает существование значения критерия в определенном диапазоне, то на пересечении строки (столбца) вида и столбца (строки) диапазона ставится единица, в противном случае – ноль. Таблица соответствия является решающим правилом, позволяющим выбрать один вид или допустимое множество видов, отвечающих техническим требованиям.

Выбор вида ТО выполняется по конкретной эвристической модели на основе технических требований. Формирование технических требований в виде значений критериев проводится либо в соответствии с постановкой задачи, либо в результате проведения расчетов. Если вид имеет все единицы в ячейках таблицы соответствия, соответствующих значениям технических требований, то он им удовлетворяет. Если в таких ячейках расположен хотя бы один ноль, то вид техническим требованиям не удовлетворяет.

В результате выбора возможны ситуации, когда выбран один вид, выбраны несколько видов, ни один вид не выбран. В первой ситуации задача выбора решена.

Во второй ситуации решить задачу выбора возможно за счет расширения вектора критериев или выбора по интегральному критерию. Расширение вектора критериев производится до тех пор, пока не будет выбран

один вид. Если расширение множества критериев не дает результата или не имеет смысла, то проводится выбор по интегральному критерию [47].

В третьей ситуации, когда ни один вид не выбран, выявляются не-удовлетворенные требования по каждому виду и производится либо коррекция технических требований, либо комбинация различных видов ТО.

2.1.3 Выбор физического принципа действия миниатюрного низковакуумного насоса

Решение задачи поиска ФПД МНН сводится к решению задачи выбора вида ВН, которая формулируется следующим образом: требуется выбрать наилучший в некотором смысле вид ВН, удовлетворяющий техническим требованиям, для проектирования нового класса "миниатюрный ВН".

В качестве порождающего параметра выступает характерный габаритный размер d_0 , который в свою очередь описывается тремя параметрами (длина ВН a , ширина ВН b , высота ВН c).

При формировании вектора параметров и признаков выбираемого вида ВН используются показатели качества, определенные в постановке задачи работы (раздел 1.3):

$$P = (\Pi_1, S_n, P_{\min}, P_{\max}, P_{\text{пред}}, D_y, a, b, c, m, W, \Pi_2, \Pi_3) . \quad (2.9)$$

Вектор критериев выбора формируется путем усечения вектора параметров и признаков P в соответствии с существующими и введенными эвристическими правилами. Вектор порождающих параметров и признаков P_n и вектор связи с порождающими параметрами и признаками $P_{\text{св}}$ имеют следующий вид:

$$P_n = (d_0) = (a, b, c) , \quad (2.10)$$

$$P_{\text{св}} = (S_{\text{н}}, D_{\text{у}}, m, W) . \quad (2.11)$$

Вектор $P_{\text{св}}$ определен на основании анализа графа связей свойств оборудования ЭТ и вакуумных насосов (рис. 1.9):

Применяя введенные правила и известное эвристическое правило, устанавливающее, что выбор должен проводиться по показателям качества, наиболее полно характеризующих ТО в целом и влияющих на другие, вектор критериев выбора имеет вид

$$K = (P_1, P_{\text{min}}, P_{\text{max}}, P_2, P_3) . \quad (2.12)$$

Поскольку предельное остаточное давление $P_{\text{пред}}$ и наименьшее рабочее давление P_{min} тесно связаны (они отличаются не более, чем на два порядка), и последний параметр является более существенным показателем качества, параметр $P_{\text{пред}}$ в вектор критериев K выбора не включается.

Диапазоны значений параметров P_{max} и P_{min} , измеряемые по непрерывной численной шкале, определяются в соответствии с принятой в вакуумной науке практике (табл. 2.4). Градации значений признаков P_1, P_2, P_3 и характеристики шкал их измерения приведены в табл. 2.2.

При определении ФПД МНН рассматривается вся совокупность видов ВН. Множество альтернатив для проведения выбора вида ВН определено в виде классов классификации ВН по ФПД (рис. 2.1). Из него к выбору могут быть допущены классы, не находящиеся в иерархическом подчинении. Разработки трохоидного и ионно-трансферного ВН остались на уровне НИР и не получили дальнейшего развития. По этой причине в качестве альтернатив они не рассматриваются.

Таблица 2.2.

Градации значений признаков вектора критериев выбора вида ВН
для проектирования класса "миниатюрный ВН"

Признак, его обозначение, шкала измерения	Значение	Код значения
Состав откачиваемой газовой среды, П ₁ , номинальная шкала	обычная [*]	1
	селективная ^{**}	2
	произвольная	3
Наличие тяжелых углеводородных соединений, П ₂ , порядковая шкала	маслосодержащий	1
	безмасляный	2
Пространственная ориентация, П ₃ , порядковая шкала	определенная	1
	произвольная	2
Уровень разработок, П ₄ , порядковая шкала	поисковые исследования	1
	НИР	2
	ОКР	3
Потенциал миниатюризации, П ₅ , порядковая шкала	низкий	1
	средний	2
	высокий	3

^{*} среда не содержит агрессивные и взрывоопасные газы, влагу, механические примеси; воздух.

^{**} среда состоит преимущественно из одного газа.

Формирование множества альтернатив из классов верхних иерархических уровней приведет к тому, что выбор будет проводиться среди альтернатив, каждая из которых охватывает широкий круг подклассов, значительно друг от друга отличающихся. Такой подход в задачах выбора, как правило, приводит к тому, что круг альтернатив, удовлетворяющих заданию на выбор, бывает очень широк, что снижает эффективность решения задачи выбора.

С другой стороны, формирование множества альтернатив из классов нижних иерархических уровней нецелесообразно, поскольку конструктивные особенности и способы, по которым на них идет классификация, для определения ФПД имеют уточняющее значение.

Исходя из этого, формируется множество альтернатив видов ВН, каждому из которых соответствует ФПД (табл. 2.3),

$$E = \{e_i\}, i = \overline{1,27}. \quad (2.13)$$

На основе экспертных оценок альтернатив формируется эвристическая модель выбора вида ВН (табл. 2.4).

Технические требования в виде значений критериев определены постановкой задачи: $P_1 = 1$, $P_{\min}$ не более 100 Па, $P_{\max}$ не менее 10^5 Па, P_2 не менее 2, P_3 не менее 2. Столбцы эвристической модели выбора вида ВН, соответствующие значениям технических требований, выделены темным цветом.

Таблица 2.3.

Множество альтернатив выбора вида ВН для проектирования класса "миниатюрный ВН".

Соответствие видов ВН и их физических принципов действия

Обозначение	Вид ВН	Физический принцип действия
e₁	Поршневой ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов поршнем, движущимся возвратно-поступательно в корпусе.
e₂	Мембранный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов мембраной, движущейся возвратно-поступательно в корпусе
e₃	Сильфонный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов движущимся возвратно-поступательно сильфоном.
e₄	Пластинчатый роторный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов эксцентрично установленным ротором, вращающимся относительно неподвижной поверхности статора, и расположенными в прорезях ротора пластинами, прижимаемыми к статору.
e₅	Пластинчатый статорный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов эксцентрично установленным ротором, вращающимся относительно неподвижной поверхности статора, и расположенной в прорези статора пластиной, прижимаемой к ротору.
e₆	Плунжерный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов эксцентрично установленным ротором, вращающимся относительно неподвижной поверхности статора, и жестко закрепленной на роторе пластиной, скользящей в золотнике, колеблющемся в гнезде статора.

Жидкостно-кольцевой ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов эксцентрично установленным ротором, вращающимся относительно неподвижной поверхности статора, с закрепленным на роторе лопатками, отбрасывающих жидкость к стенке статора, принимающей форму концентрического кольца относительно него.
Двухроторный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов двумя синхронно вращающимися в противоположных направлениях профильными роторами, расположенными в корпусе.
Четырех-роторный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов четырьмя синхронно вращающимися профильными роторами, расположенными в корпусе.
Спиральный ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов расположенными в корпусе спиралями Архимеда, вращающимися эксцентрично относительно друг друга.
Перистальтический ВН	Удаление газа путем перекачки его объемов, создаваемых волнообразно сокращающимися стенками полых трубок.
Молекулярный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам кинетической энергии от поверхности ротора, вращающегося внутри или вокруг статора с выполненными каналами.
Турбомолекулярный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам кинетической энергии от поверхностей вращающихся между дисками статора лопаток ротора.

Таблица 2.3. Продолжение

Вид ВН	Физический принцип действия	е₇
Гибридный турбомолекулярный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам кинетической энергии от поверхностей вращающихся между дисками статора лопаток ротора и от поверхностей ротора, вращающегося внутри или вокруг другого статора с выполненными внутри каналами.	е₈
Центробежный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам в радиальном направлении кинетической энергии от поверхности вращающегося рабочего колеса.	е₉
Осевой ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам вдоль оси вращения кинетической энергии от поверхности вращающегося рабочего колеса.	е₁₀
Вихревой ВН	Удаление газа путем перекачки за счет передачи его молекулам кинетической энергии от поверхностей лопаток ротора, вращающегося внутри статора с отсеченными друг от друга впускным и выпускным патрубками.	е₁₁
Термомолекулярный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет термической транспирации его молекул.	е₁₂
Эжекторный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет турбулентно-вязкостного захвата его молекул струей газа, жидкости или пара.	е₁₃
Диффузионный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет диффузии его молекул в струю пара.	

Диффузионно-эжекторный ВН	Удаление газа путем перекачки за счет диффузии его молекул в струю пара на первых ступенях и турбулентно-вязкостного захвата его молекул струей пара на последней.	
Адсорбционный ВН	Удаление газа путем улавливания вследствие физической сорбции его молекул пористым сорбентом.	Обозначение
ВН с нераспыляемым геттером	Удаление газа путем улавливания вследствие хемосорбции его молекул нераспыляемым сорбентом.	Е ₁₄
Нейтрально-геттерный ВН	Удаление газа путем улавливания вследствие хемосорбции его молекул постоянно возобновляемым слоем сорбента.	Е ₁₅
Ионно-геттерный ВН	Удаление газа путем улавливания вследствие внедрения его ускоренных ионов в поверхность сорбента и хемосорбции его молекул постоянно возобновляемым слоем распыляемого сорбента.	Е ₁₆
Конденсационный ВН	Удаление газа путем улавливания вследствие конденсации его молекул на охлаждаемых поверхностях.	Е ₁₇
Конденсационно-сорбционный ВН	Удаление газа путем улавливания вследствие конденсации его молекул на охлаждаемых поверхностях и одного или нескольких физических эффектов – физической сорбции молекул газа пористым сорбентом, хемосорбции его молекул постоянно возобновляемым слоем распыляемого сорбента, внедрения его ускоренных ионов в поверхность сорбента.	Е ₁₈
		Е ₁₉
		Е ₂₀

$\mathbf{e}_{21}$	$\mathbf{e}_{22}$	$\mathbf{e}_{23}$	$\mathbf{e}_{24}$	$\mathbf{e}_{25}$	$\mathbf{e}_{26}$	$\mathbf{e}_{27}$
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Таблица 2.4.
Эвристическая модель выбора вида ВН для проектирования класса "миниатюрный ВН"

	Π_1			$P_{min} \text{ Па}$															
	1	2	3	$\leq 10^{-10}$	$\leq 10^{-9}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-5}$	$\leq 10^{-4}$	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-1}$	$\leq 10^0$	$\leq 10^1$	$\leq 10^2$	$\leq 10^3$	$\leq 10^4$	$\leq 10^5$
e1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
e2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
e3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
e4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
e5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
e6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
e7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
e8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
e9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
e10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
e11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
e12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e13	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e14	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
e16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
e17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
e18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
e19	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
e20	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e21	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e22	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e23	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e24	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e25	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e26	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e27	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

	P _{max} , Πa										Π ₂		Π ₃		Π ₄			Π ₅		
	≥10 ⁻⁴	≥10 ⁻³	≥10 ⁻²	≥10 ⁻¹	≥10 ⁰	≥10 ¹	≥10 ²	≥10 ³	≥10 ⁴	≥10 ⁵	1	2	1	2	1	2	1	2	3	
e ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
e ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₇	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₈	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₉	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₃	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₄	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₇	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₈	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₁₉	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₀	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2
e ₂₁	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2
e ₂₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₃	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₄	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₅	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
e ₂₇	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

В результате выбора по эвристической модели множество E усекается до $E^* = \{e_1, e_2, e_3, e_8, e_{10}, e_{11}, e_{18}, e_{22}, e_{26}, e_{27}\}$, $E^* \subset E$, элементы которого, выделенные в таблице соответствия темным цветом, удовлетворяют техническим требованиям.

Для окончательного решения задачи выбора в соответствии с методикой выбора вида (п. 2.1.2) вектор критериев выбора последовательно дополняется двумя критериями Π_4 и Π_5 (таблица 2.2), по которым ведется выбор среди множества E^* .

Технические требования в виде значений критериев определены требованиями новизны решаемой задачи и высокой вероятности ее решения: Π_4 не более 2, Π_5 не менее 3.

В результате выбора по дополненному вектору критериев единственным выбранным видом является мембранный ВН (e_2). Таким образом, в соответствии с классификацией ВН по ФПД (рисунок 2.1), определенный рациональный ФПД разрабатываемого МНН заключается в удалении газа путем перекачки его объемов мембраной, движущейся возвратно-поступательно в корпусе.

2.2 Эволюционный синтез структурно-конструктивных схем миниатюрных низковакуумных насосов

Проектирование нового ТО ведется, как правило, путем усовершенствования известных аналогов и прототипов за исключением редких случаев, когда предлагаются кардинально новые решения [80]. Поскольку предпочтение отдается проработанным серийным объектам, освоенным в производстве, новый ТО в значительной степени состоит из аналогичных подсистем, характеризуется показателями качества прототипа и выполняет присущие ему функции. Таким образом, при разработке нового ТО имеет

место эволюционный синтез – последовательная модернизация исходного варианта [80].

Модернизация обусловлена развивающимися потребностями человека и общества, связанными с улучшением показателей качества ТО и направленными на улучшение комфортности существования, развитие физических и интеллектуальных способностей, удовлетворение духовных интересов. Эволюция ТО происходит в соответствии с логистической кривой, описывающей изменение во времени некоторого показателя качества (или их агрегации) – критерия развития [81, 82]. В соответствии с этой кривой, начиная с некоторого момента времени, усовершенствование ТО на основе конкретной структурной схемы не приводит к увеличению критерия развития, несмотря на любые затраты и ресурсы, что связано с обострением технических противоречий в ТО, которые могут быть устранены лишь на основе изменения структурной схемы или ФПД.

В основе эволюционного синтеза лежит устранение рассогласования между требуемым функционированием и имеющейся структурной схемой ТО. Формы устранения этого рассогласования связаны с разрешением технических противоречий [83], которые заключаются в одновременном улучшении и ухудшении различных показателей качества ТО, обусловленными изменением некоторого параметра ТО.

На базе эвристических методов выявления технических противоречий [83, 84] в работе [85] предложен подход, отличие которого заключается в формировании математической модели ТО, на основе которой выявляются физические противоречия. Согласно этому подходу физическое противоречие – это взаимоисключающие требования, предъявляемые к элементу системы, состоящие в том, что один из характеризующих его параметров должен иметь два различных значения. Такой параметр называют "узловым", а характеризуемый им элемент – "узловым элементом".

Поскольку техническое противоречие связано с физическим, для его устранения необходимо изменить узловой элемент таким образом, чтобы он имел два значения узлового параметра. Для этого вводится множество объектов с парными значениями свойств (ОПС), которое классифицировано по трем видам несовместимых между собой отношений: временных, пространственных и отношения часть-целое. Заменяя выявленный узловой объект на объект из множества ОПС, осуществляют устранение физического противоречия, разрешая тем самым техническое противоречие. Однако при этом существует проблема выбора ОПС и эвристического приема, осуществляющего замену узлового объекта на объект ОПС.

Параметрический метод [85] можно рекомендовать для хорошо изученных ТО, имеющих проверенные, всесторонне описывающие его количественные зависимости между параметрами.

Вместе с тем, как показывает опыт работ [83, 86] разрешение технических противоречий возможно без формального математического описания ТО, используя интуитивно-эмпирический опыт разработчика. Для разрешения технических противоречий в сложных слабоструктурированных ТО, к которым относится разрабатываемый МНН, необходим логико-эвристический подход. Этот подход формализует выявленные при разрешении противоречий закономерности мышления разработчика, преобразуя тем самым декларативный характер известных эвристических методов в процедурных вид.

В основе эвристического разрешения технических противоречий лежат три группы эвристик [80]: выявление недостатков и физических противоречий в ТО, устранение недостатков и разрешение физических противоречий, состыковка модифицированного элемента с немодифицированными элементами.

Существенным недостатком методов выявления и разрешения тех-

нических противоречий [80] является отсутствие в них связей проводимых конструктивных и структурных изменений с целями проектирования и структурой ТО в целом. Это обстоятельство, не учитывающее возникновение новых противоречий в других подсистемах ТО, может приводить к невыполнению целей проектирования. Таким образом, все изменения в структурной модели необходимо согласовывать с достижением поставленных целей. Для акцентирования направленности эволюционного синтеза при модернизации необходимо построение дерева целей проектирования, связанных со структурой и функцией ТО.

Методические основы логико-эвристического выявления и разрешения технических противоречий при синтезе вакуумного оборудования ЭТ и его элементов [87] позволяют избавиться от выше обозначенных недостатков и проблем и провести синтез рациональной структуры МНН.

Для проведения эволюционного синтеза МНН необходимо выбрать прототип, который будет исходным вариантом для проведения последовательной структурной модернизации. В соответствии с результатами, полученными в разделе 2.1, область прототипов ограничена мембранными ВН. Выбирать прототип следует из тех мембранных ВН, которые на сегодняшний день наиболее полно удовлетворяют потребителей вакуумной техники.

При существующем многообразии структурно-конструктивных схем мембранных вакуумных насосов [88-91] широкое распространение получила одна (рис. 2.2), на основе которой фирмы Oerlikon Leybold Vacuum (Германия) и Alcatel Vacuum Technology (Франция) [92, 93] осуществляют серийный выпуск насосов. Эта схема была принята в качестве прототипа для проведения последовательной структурной модернизации.

Рабочим телом прототипа является круглая мембрана 2, периферия которой закреплена между нижним 1 и верхним 5 корпусами. Центр мембраны 2 жестко связан со штоком 6. На верхнем корпусе 5 расположены

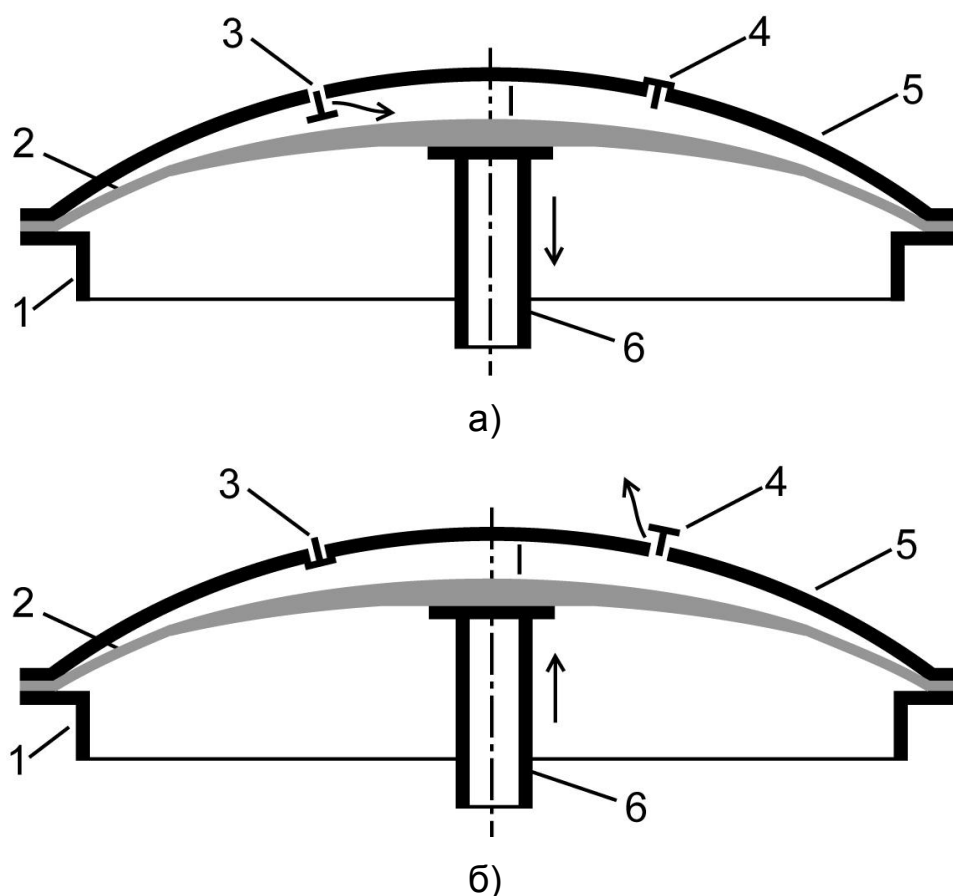


Рис. 2.2. Структурно-конструктивная схема 1 мембранного ВН – прототипа МНН (откачная ступень):

1 – нижний корпус; 2 – мембрана; 3 – впускной клапан;
 4 – выхлопной клапан; 5 – верхний корпус; 6 – шток;
 I – откачная ступень; а – такт расширения объема
 откачной ступени; б – такт сжатия объема откачной
 ступени

впускной 3 и выхлопной 4 клапаны. Единственная откачная ступень I находится в рабочей камере, образованной поверхностями мембраны 2 и верхнего корпуса 5. Ряд подсистем насоса (привод, системы питания и управления и др.) на рисунке 2.2 и далее не показаны.

Цикл работы насоса состоит из двух тактов. На первом такте (рис. 2.2, а) шток 6 вместе с мембраной 2 опускается вниз, что ведет к расшире-

нию объема откачной ступени I. При этом впускной клапан 3 открыт и через него происходит всасывание газа из откачиваемого объема. Выхлопной клапан 4 находится в закрытом положении. По достижении штоком 6 крайнего нижнего положения начинается второй такт (рис. 2.2, б), на котором шток 6 вместе с мембраной 2 движется вверх, что ведет к сжатию объема откачной ступени I. При этом выхлопной клапан 4 открыт и через него происходит удаление газа в атмосферу. Впускной клапан 3 находится в закрытом положении. Второй такт заканчивается по достижении штоком 6 крайнего верхнего положения. На рис. 2.2 и последующих структурно-конструктивных схемах прямыми стрелками показано движение структурных элементов, изогнутыми – потоков газа.

Методика логико-эвристического выявления технических противоречий в ТО содержит следующие этапы:

- построение иерархической структуры ТО;
- построение графа связей свойств элементов ТО;
- построение одного или нескольких деревьев целей проектирования ТО;
- определение на основе деревьев целей и графа связей свойств физических противоречий в виде узловых элементов и параметров.

Граф связей свойств строится на основе иерархической структуры ТО и описывает взаимосвязи параметров ТО, как целого, и его структурных элементов различного иерархического уровня между собой. Для удобочитаемости графа в качестве параметров ТО допускается указывать только его основные показатели качества. Конкретной иерархической структуре ТО соответствует конкретный граф связей свойств.

В качестве параметров ТО в графе связей свойств структурной схемы прототипа МНН (рис. 2.3) присутствуют актуальные для данного этапа исследования независимые параметры, заданные в ТЗ. Штрихпунктирные

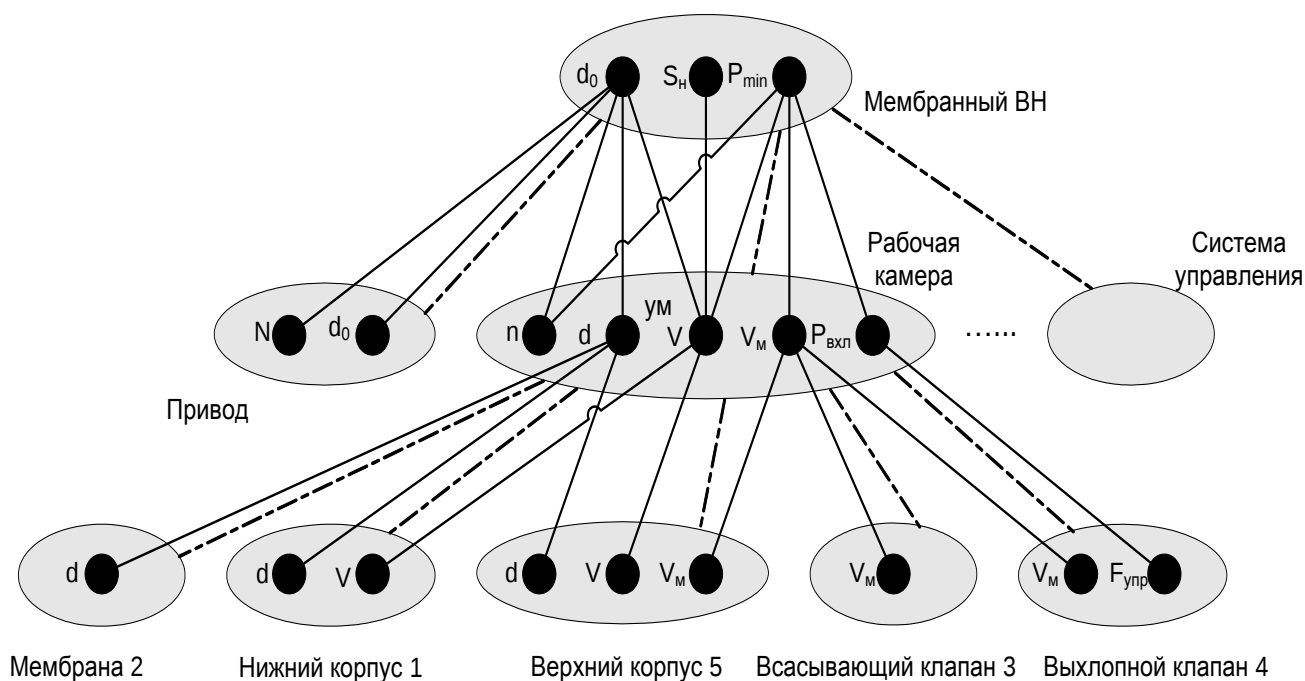


Рис. 2.3. Граф связей свойств структурно-конструктивной схемы 1 мембранного ВН:

d_0 – характерный габаритный размер; S_H – номинальная быстрота действия; P_{min} – наименьшее рабочее давление; N – мощность; n – количество рабочих камер; d – диаметр; V – объем; V_M – "мертвый" объем; $P_{вхл}$ – давление выхлопа; $F_{упр}$ – сила упругости в закрытом положении

линии соответствуют иерархическим связям ВН и его структурных элементов, сплошные линии – связям параметров. Ряд подсистем мембранного ВН, не относящихся к функциональным, не рассматривается.

Цели проектирования являются важной системной характеристикой процесса разработки ТО, обеспечивающей направленность поиска и синтеза конструкций. Для ТО потребности человека и общества, которые необходимо достичь в процессе его эволюции, выражаются в виде некоторых желаемых значений параметров ТЗ, определяющих целевое состояние ТО. При совершенствовании или разработке новых ТО, цели выражается в

улучшении значений одного или нескольких параметров известного изделия, при этом другие значения параметров должны быть не хуже, чем у аналога:

$$Ц = \langle P, И \rangle, \quad (2.14)$$

где P – множество параметров, $И$ – множество отношений типа "изменить" ("увеличить", "уменьшить").

Поскольку иерархической структуре ТО соответствует иерархия связей свойств, то достижение исходных целей возможно изменением подлежащих параметров структурных элементов, которые становятся подцелями. Для определения подцелей в двухуровневой иерархической структуре выявляют параметры подсистем, связанные отношениями влияния с исходной целью. В свою очередь для производных целей тоже выявляют связанные с ними параметры подсистем нижнего уровня и так до тех пор, пока не будут выявлены цели нижнего уровня иерархии.

Такая иерархия целей [94] представляет собой дерево целей проектирования, которое в отличие от деревьев целей [51, 64, 95] построено с учетом структуры ТО. При разработке ТО исходная цель достигается путем реализации иерархии подцелей за счет изменения свойств соответствующих структурных элементов вплоть до элементарных свойств деталей.

Для формирования дерева целей целесообразно использовать граф связей свойств, который содержит множество деревьев целей проектирования данной структуры ТО. Каждой исходной цели соответствует свое дерево целей. Изменение структуры влечет за собой изменение дерева целей, что наряду со сложностью структуры и взаимосвязей свойств ТО и свойств подсистем, затрудняет построение обобщенного дерева целей. Деревья целей формируют для каждой конкретной ситуации проектирования с учетом потребностей разработчиков и уровня совершенства научно-технической базы.

Исходными данными для построения дерева целей являются ТЗ на ТО и выбранный аналог или прототип, подлежащий модернизации. Если исходных целей несколько, тогда для каждой цели формируется свое дерево целей.

Формирование дерева целей состоит из следующих последовательно выполняемых процедур:

- построение в случае необходимости графа связей свойств;
- формирование исходных целей;
- выявление противоречивых исходных целей;
- ранжирование целей по важности;
- выявление связей исходной цели с параметрами подсистем нижележащих уровней на основе графа связей свойств;
- присвоение конкретных значений отношения типа "изменить" выявленным связям.

Одна из исходных целей сформулирована в постановке задачи (раздел 1.3) и на данном этапе исследования состоит в уменьшении характерного габаритного размера мембранного ВН d_0 до $5 \div 100$ мм.

Для выявления возможных технических противоречий граф связей свойств исследуется на влияние поставленной цели на существенные показатели качества ТО. Для этого в нем выделены деревья целей, исходные цели которых определены характером улучшаемости его основных показателей качества и состоят в увеличении номинальной быстроты действия S_n и снижении минимального рабочего давления P_{min} . Характер улучшаемости есть предпочтительность изменения значений существенных показателей качества ТО в ту или иную сторону. В различных ситуациях проектирования один и тот же показатель качества по характеру улучшаемости может быть максимизируемым (предпочтительно его увеличение) или минимизируемым (предпочтительно его уменьшение). Деревья целей выде-

лены в графе связей свойств стрелками (рис. 2.4).

Проведенный анализ показывает, что рассматриваемая структурно-конструктивная схема при поставленных исходных целях содержит два физических противоречия, на рисунке 2.4 показанные вершинами белого цвета, узловыми параметрами которых являются количество рабочих камер n и объем V рабочей камеры. Разрешение физического противоречия заключается в устранении противоречивости требований, предъявляемых к узловому параметру, за счет изменения этих требований, целей более

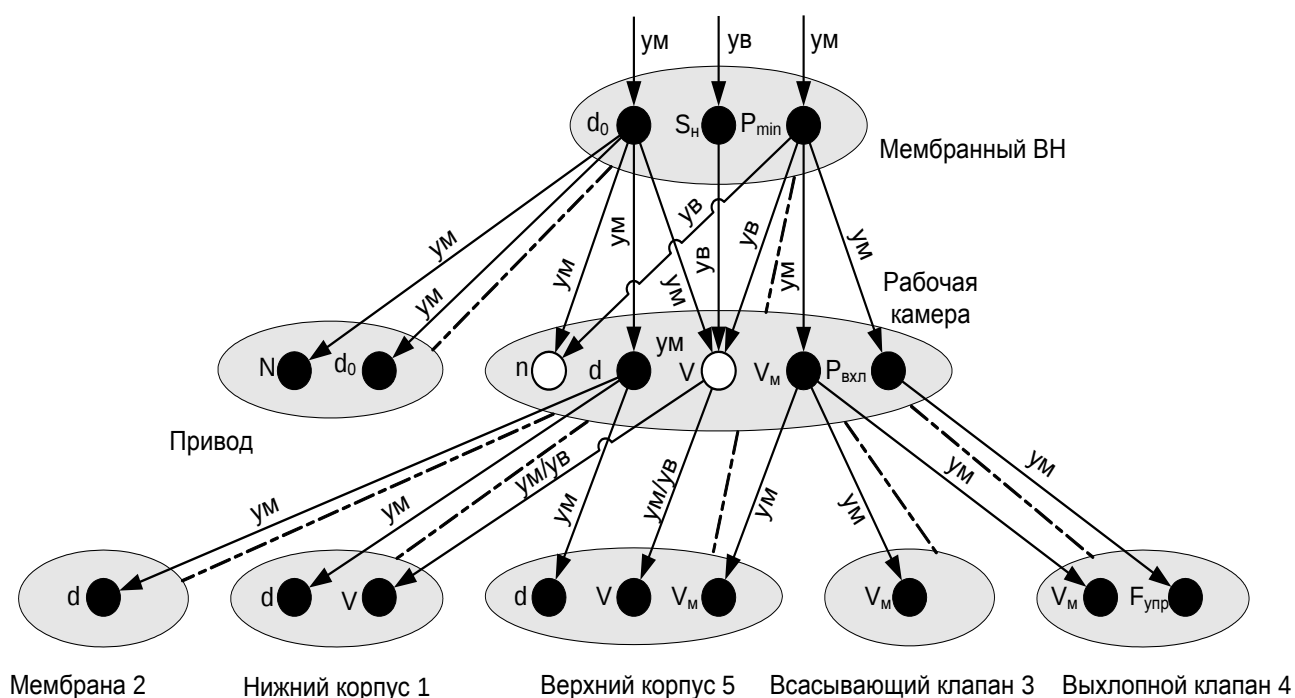


Рис. 2.4. Деревья целей структурно-конструктивной схемы 1 мембранного ВН:

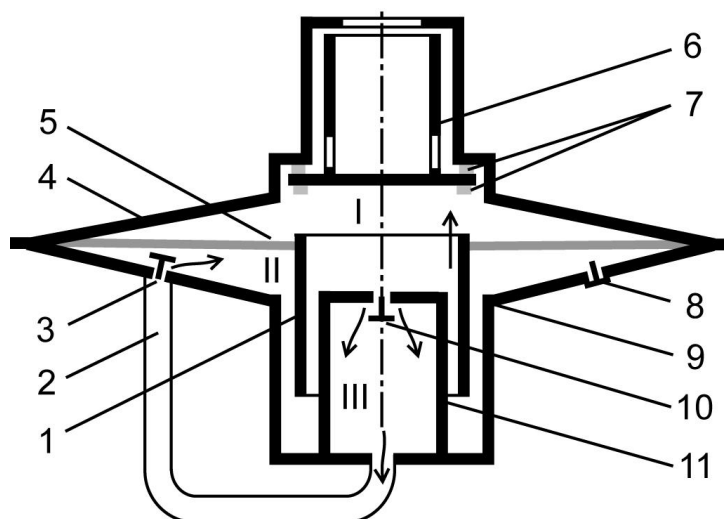
d_0 – характерный габаритный размер; S_n – номинальная быстрота действия; P_{min} – наименьшее рабочее давление; N – мощность; n – количество рабочих камер; d – диаметр; V – объем; V_m – "мертвый" объем; $P_{вхл}$ – давление выхлопа; $F_{упр}$ – сила упругости в закрытом положении

высокого иерархического уровня, следствием которых они являются, или структуры ТО.

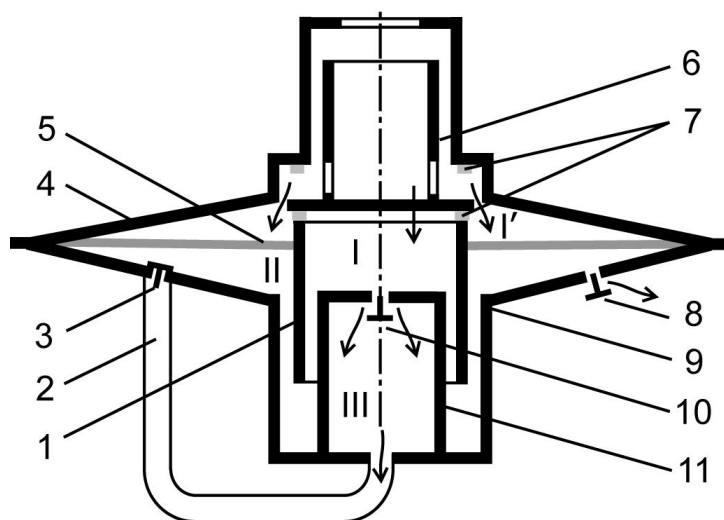
Одним из основных способов разрешения физических противоречий является разделение требуемых несовместимых значений узловых параметров в пространстве и времени. В первом случае в узловом элементе выделяются две части, каждая из которых имеет свое значение узлового параметра, во втором – выделяются разные моменты времени, в которые узловой параметр принимает разные значения [83, 85, 86]. Если противоречивые требования к узловому параметру должны реализовываться в одном месте пространства и в один момент времени, то противоречия разрешают анализом отношений "часть-целое" и отношений узлового элемента к объектам, предъявляющим несовместимые требования. При этом конкретные закономерности разрешения технических противоречий либо не приводятся [83], либо предлагаются ориентированные на опыт и интуицию разработчика декларативные эвристические приемы без указания их использования применительно к ситуации проектирования [83].

Выявленный узловой элемент, рабочая камера, относится к классу технических систем и, являясь одной из основных подсистем, заменен быть не может. При этом количество рабочих камер n в одном и том же месте пространства должно принимать разные значения. Это физическое противоречие может быть разрешено в пространстве, если в рабочей камере сделать две откачных ступени. Таким образом, исходная цель "уменьшить характерный габаритный размер" может быть достигнута за счет уменьшения количества рабочих камер мембранного ВН.

Разрешая техническое противоречие узлового параметра n , предлагается структурно-конструктивная схема 2 мембранного ВН (рис. 2.5). Рабочим телом в ней является круглая мембрана 5, периферия которой закреплена между верхним 4 и нижним 9 корпусами. Центр мембраны 5

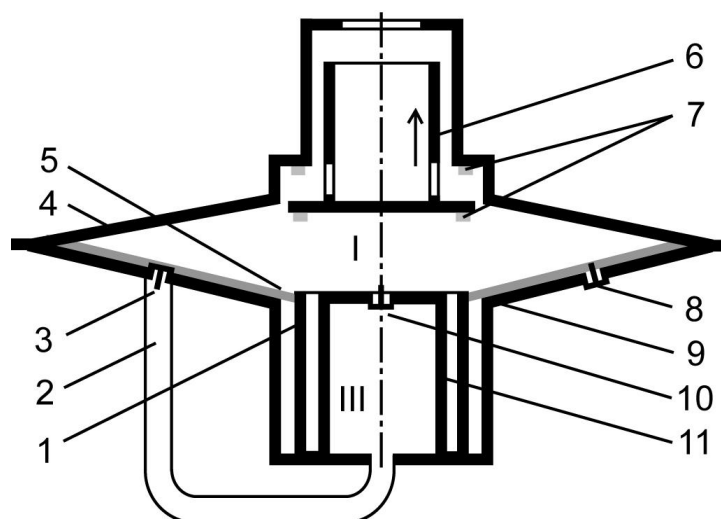


а)



б)

Рис. 2.5.а,б. Структурно-конструктивная схема 2 мембранного ВН:
 1 – шток; 2 – коммуникация; 3 – перепускной клапан; 4 – верхний корпус; 5 – мембрана; 6 – верхний стакан; 7 – уплотнительный элемент; 8 – выхлопной клапан; 9 – нижний корпус; 10 – перепускной клапан; 11 – нижний стакан; I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно; III – промежуточная полость;
 а – такт сжатия конической части объема первой откачной ступени;
 б – такт сжатия цилиндрической части объема первой откачной ступени



в)

Рис. 2.5.в. Структурно-конструктивная схема 2 мембранного ВН:
в – такт возвращения верхнего стакана в исходное положение

жестко связан со штоком 1. Первая откачная ступень I образована поверхностями мембраны 5, верхнего корпуса 4, подвижного штока 1, нижнего 11 и верхнего 6 стакана. Герметизация контакта верхнего корпуса 4 и верхнего стакана 6, верхнего стакана 6 и штока 1 осуществляется за счет уплотнительных элементов 7. Вторая откачная ступень II образована поверхностями мембраны 5, нижнего корпуса 9 и штока 1. Внутренняя поверхность нижнего стакана 11, закрепленного на нижнем корпусе 9, ограничивает промежуточную полость III. Роль впускного клапана выполняет подвижный верхний стакан 6, расположенный в верхнем корпусе 4. Нижний стакан 11 содержит перепускной клапан 10, на нижнем корпусе 9 расположены перепускной 3 и выхлопной 8 клапаны. Промежуточная полость III и вторая откачная ступень II соединены коммуникацией 2.

Цикл работы насоса состоит из трех тактов. На первом такте (рис. 2.5, а) шток 1 вместе с мембраной 5 поднимается вверх, что ведет к сжатию первой откачной ступени I и расширению второй откачной ступени II. При этом открыты перепускные клапаны 3 и 10, и через них происходит пере-

качка газа из первой откачной ступени I во вторую II транзитом через промежуточную полость III и коммуникацию 2. Верхний стакан 6 отсекает первую откачную ступень I от откачиваемого объема, выхлопной клапан 8 находится в закрытом положении. По достижении штоком 1 уплотнительного элемента 7 начинается второй такт (рис. 2.5, б), на котором верхний стакан 6 опускает вниз шток 1 вместе с мембраной 5, что ведет к сжатию первой I и второй II откачных ступеней. При этом через перепускной клапан 10 осуществляется перекачка газа из первой откачной ступени I в промежуточную полость III, выхлопной клапан 8 открыт, и через него происходит удаление газа в атмосферу, зарождается новая первая откачная ступень I'. Перепускной клапан 3 находится в закрытом положении. По достижении верхним стаканом 6 нижнего 11 начинается третий такт (рис. 2.5, в), на котором шток 1 вместе с мембраной 5 находятся в крайнем нижнем положении, верхний стакан 6 поднимается в исходное положение, клапаны 3, 8, 10 находятся в закрытом положении, потоков газа нет. Третий такт заканчивается по достижении верхним стаканом 6 уплотнительного элемента 7.

В предложенной структурной схеме для разделения откачных ступеней используется щелевое уплотнение. При этом, поскольку необходимо минимизировать "мертвые" объемы структурных элементов, площадь контакта уплотнения делается максимально возможной, что ведет к снижению ресурса. Для устранения этого недостатка сформированы деревья целей (рис. 2.6), исходными целями которых являются "увеличить ресурс", "увеличить номинальную быстроту действия", "уменьшить минимальное рабочее давление". Поскольку недостаток насоса определяется свойствами рабочей камеры, структурные элементы, не имеющие с ней связей свойств, в деревьях целей не представлены. Граф связей свойств, необходимый для построения деревьев целей, здесь и далее не приводится.

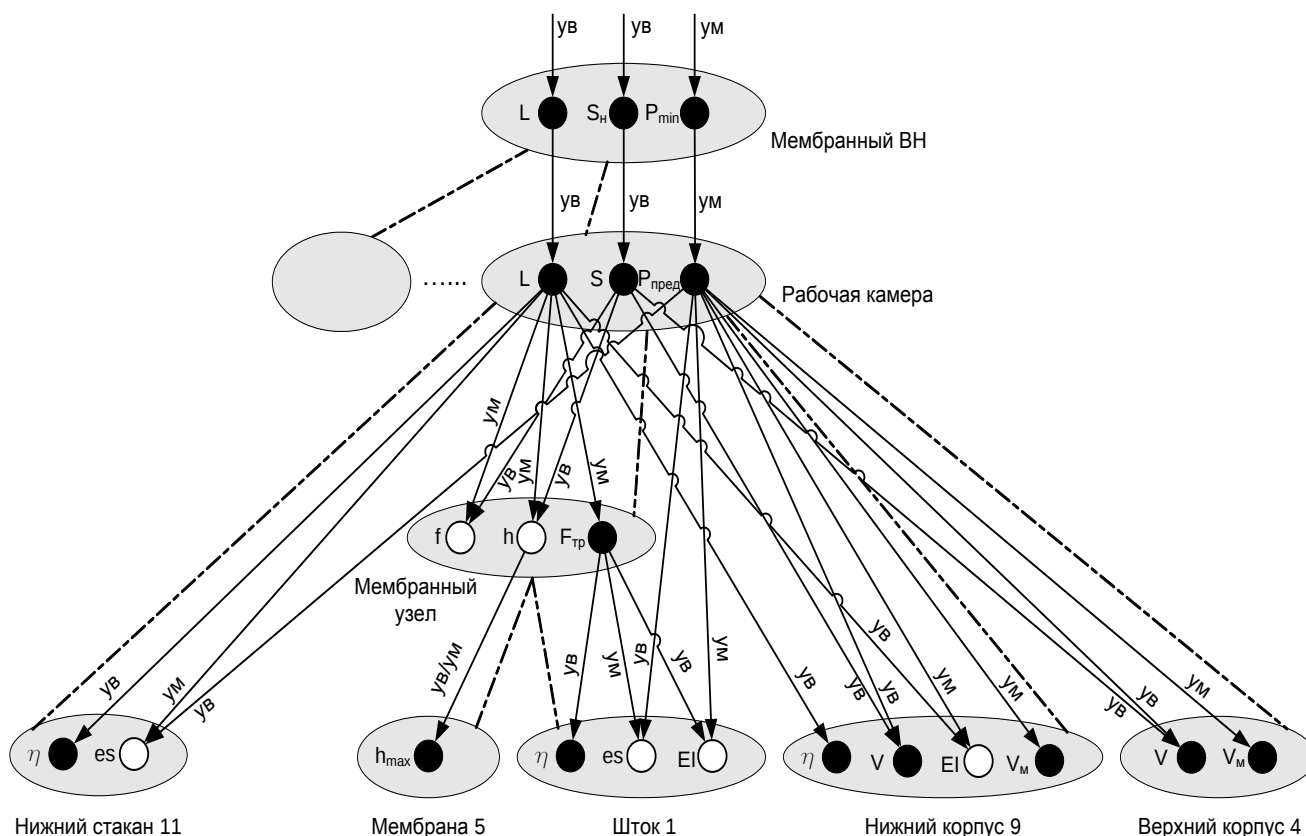


Рис. 2.6. Деревья целей структурно-конструктивной схемы 2 мембранного ВН:

L – ресурс; S_n , S – номинальная быстрота действия;
 $P_{\min}$ – наименьшее рабочее давление; $P_{\text{пред}}$ – предельное
остаточное давление; f – частота перемещения; h – ход; $F_{\text{тр}}$ – сила
трения; η – коэффициент трения; e_s – верхнее отклонение внешней
поверхности; E_i – нижнее отклонение внутренней поверхности;
 $h_{\max}$ – максимально допустимый прогиб мембраны; V – объем;
 V_m – "мертвый" объем

В результате анализа деревьев целей определены шесть физических противоречий, узловыми параметрами которых являются частота перемещения f и ход h мембранного узла, максимально допустимый прогиб $h_{\max}$ мембраны, верхнее отклонение внешней поверхности e_s нижнего стакана, верхнее отклонение внешней поверхности e_s и нижнее отклонение внут-

ренной поверхности E_I штока, нижнее отклонение внутренней поверхности E_I нижнего корпуса.

Узловые элементы шток 1, нижний стакан 11 и нижний корпус 9 образуют узел трения, обуславливающий четыре из шести выявленных физических противоречий, разрешить которые возможно заменой этих элементов и связей между ними. Удалив нижний стакан 11 и изменив отношение между штоком 1 и нижним корпусом 9, предлагается структурно-конструктивная схема 3 мембранного ВН (рис. 2.7, а), которая позволяет уменьшить силу трения мембранного узла, не ухудшая предельного остаточного давления ВН. Таким образом, исходная цель увеличения ресурса может быть достигнута за счет уменьшения силы трения мембранного узла.

Рабочим телом в структурно-конструктивной схеме 3 является круглая мембрана 7, периферия которой закреплена между нижним 8 и верхним 6 корпусами. Центр мембраны 7 жестко связан со штоком 1. Первая откачная ступень I образована поверхностями мембраны 7 и верхнего корпуса 6, вторая откачная ступень II – поверхностями мембраны 7, нижнего корпуса 8 и штока 1. На верхнем корпусе 6 расположены впускной 5 и перепускной 4 клапаны, на нижнем 8 – перепускной 2 и выхлопной 9 клапаны. Герметизация контакта нижнего корпуса 8 и штока 1 осуществляется за счет уплотнительного элемента 10. Первая откачная ступень I соединена со второй II коммуникацией 3.

Цикл работы насоса состоит из двух тактов. На первом такте (рис. 2.7, а) шток 1 вместе с мембраной 7 опускается вниз, что ведет к расширению первой откачной ступени I и сжатию второй откачной ступени II. При этом открыты впускной клапан 5, через который газ из откачиваемого объема поступает в первую откачную ступень I, и выхлопной клапан 9, через который газ из второй откачной ступени II удаляется в атмосферу. Пе-

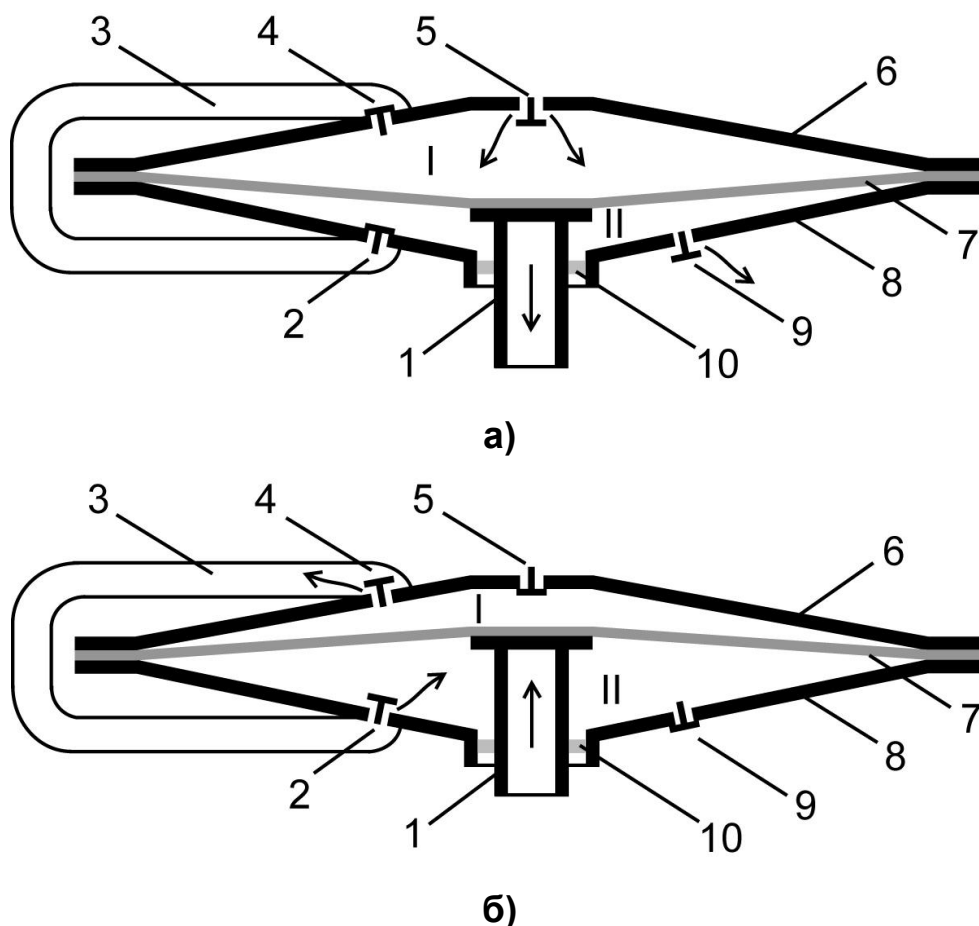


Рис. 2.7. Структурно-конструктивная схема 3 мембранного ВН:

1 – шток; 2, 4 – перепускные клапаны; 3 – коммуникация;
 5 – впускной клапан; 6 – верхний корпус; 7 – мембрана; 8 – нижний корпус; 9 – выхлопной клапан; 10 – уплотнительный элемент;
 I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно;
 а – такт расширения объема первой откачной ступени;
 б – такт сжатия объема первой откачной ступени

репускные клапаны 2 и 4 находятся в закрытом положении. По достижении штоком 1 крайнего нижнего положения начинается второй такт (рис. 2.7, б), на котором шток 1 вместе с мембраной 7 поднимается вверх, что ведет к сжатию первой откачной ступени I и расширению второй откачной ступени II. При этом открыты перепускные клапаны 2 и 4, через которые и коммуникацию 3 газ перекачивается из первой откачной ступени I во вто-

рую II. Клапаны 5 и 9 находятся в закрытом положении. Второй такт заканчивается по достижении штоком 1 крайнего верхнего положения.

Следующим шагом эволюционного синтеза является снижение наименьшего рабочего давления – одного из существенных показателей качества ВН. Для достижения этой цели сформированы деревья целей, исходными целями которых являются "уменьшить минимальное рабочее давление", "уменьшить характерный габаритный размер ", "увеличить номинальную быстроту действия" (рис. 2.8). Анализ деревьев целей позволяет определить три физических противоречия, узловыми параметрами которых являются проводимость U коммуникации, объем V нижнего и верхнего корпусов.

Разрешая физическое противоречие, узловым параметром которого является проводимость U , за счет удаления узлового элемента, предлагается структурно-конструктивная схема 4 мембранного ВН (рис. 2.9, а), которая позволяет увеличить проводимость между двумя откачными ступенями мембранного ВН, не увеличивая диаметра рабочей камеры. Вместе с этим удаляется один из перепускных клапанов, а второй переносится на мембрану или узел ее крепления к штоку. Таким образом, исходная цель снижения наименьшего рабочего давления может быть достигнута за счет увеличения проводимости коммуникации.

Рабочим телом в структурно-конструктивной схеме 4 является круглая мембрана 2, периферия которой закреплена между нижним 1 и верхним 3 корпусами. Центр мембраны 2 жестко связан со штоком 7. Первая откачная ступень I образована поверхностями мембраны 2 и верхнего корпуса 3, вторая откачная ступень II – поверхностями мембраны 2, нижнего корпуса 1 и штока 7. На верхнем корпусе 3 расположен впускной клапан 4, на нижнем 1 – выхлопной клапан 8, на мембране 2 – перепускной клапан 5. Герметизация контакта нижнего корпуса 1 и штока 7 осуществляется за счет уплотнительного элемента 6.

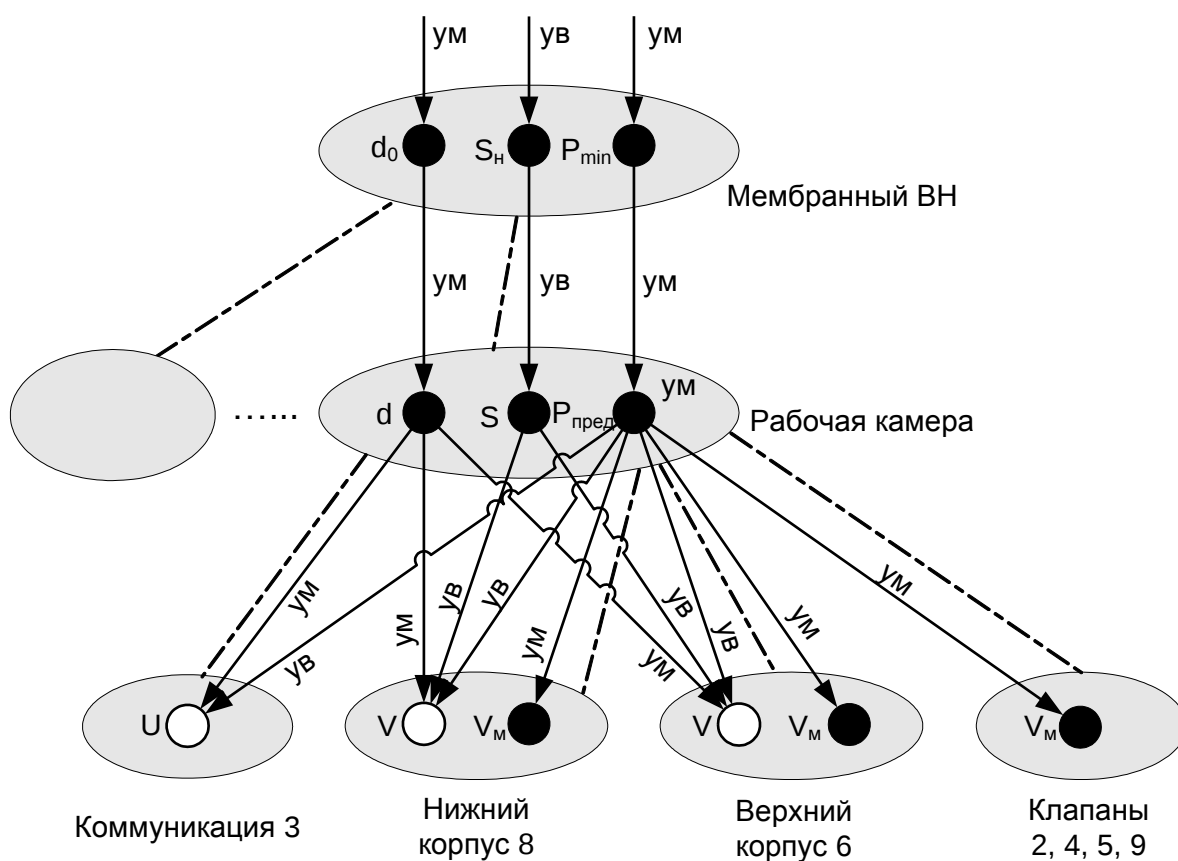


Рис. 2.8. Деревья целей структурно-конструктивной схемы 3 мембранного ВН:

d_0 – характерный габаритный размер; S_n , S – номинальная быстрота действия; P_{min} – наименьшее рабочее давление; d – диаметр; $P_{пред}$ – предельное остаточное давление; P_{min} – наименьшее рабочее давление; U – проводимость; V – объем; V_m – "мертвый" объем

Описание принципа действия не приводится, поскольку функционирование предлагаемой структурно-конструктивной схемы отличается от предыдущей только тем, что перепуск газа из первой откачной ступени I во вторую II осуществляется не через два перепускных клапана и коммуникацию, а напрямую через перепускной клапан.

Попытки дальнейшего эволюционного синтеза, направленные на улучшение существенных показателей качества мембранного ВН, показали,

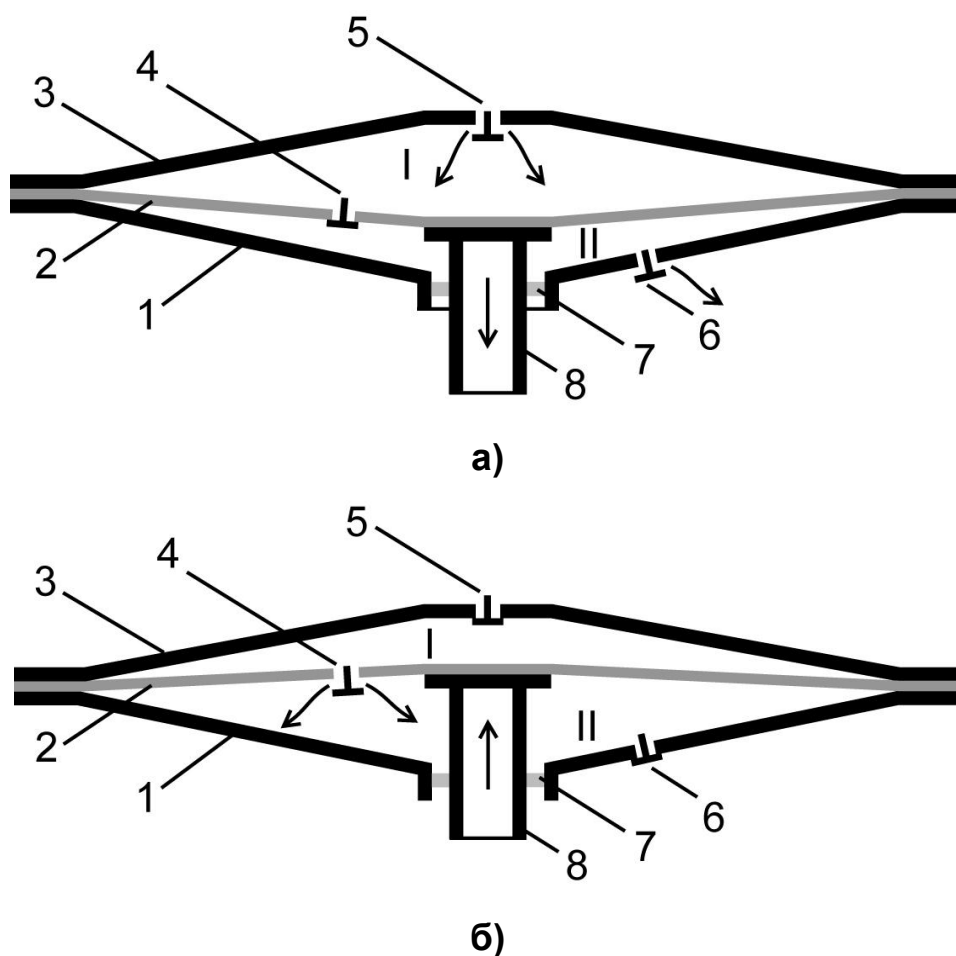


Рис. 2.9. Структурно-конструктивная схема 4 мембранного ВН:

- 1 – нижний корпус; 2 – мембрана; 3 – верхний корпус;
 4 – перепускной клапан; 5 – впускной клапан; 6 – выхлопной клапан;
 7 – уплотнительный элемент; 8 – шток;
 I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно;
 а – такт расширения объема первой откачной ступени;
 б – такт сжатия объема первой откачной ступени

что оно сопряжено с увеличением его характерного габаритного размера, а разрешение возникающих при этом технических противоречий затруднительно.

Разработанная в результате эволюционного синтеза структурно-конструктивная схема (рис. 2.9, а) позволяет провести теоретические исследования функционирования МНН, направленные на определение зави-

симостей функциональных параметров от внутренних, разработать конструкцию МНН и провести ее экспериментальные исследования.

2.3 Выбор вида и структурно-конструктивной схемы регулирующего клапана

Синтезированная структурно-конструктивная схема МНН (рис. 2.9, а) содержит три регулирующих клапана (РК), обеспечивающих всасывание, выхлоп и перепуск газа. От работы РК во многом зависят основные показатели качества любого ВН объемного действия – номинальная быстрота действия и предельное остаточное давление.

В современных исследуемых и серийно выпускаемых ВН [77, 92, 93, 96] применяются неуправляемые РК, срабатывающие за счет градиента давления по разные стороны уплотнительного элемента. Среди них наиболее распространены РК шарикового и мембранного типа (рис. 2.10).

Преимущества неуправляемых РК заключаются в отсутствии приводов, систем управления и энергообеспечения. Однако они не всегда могут

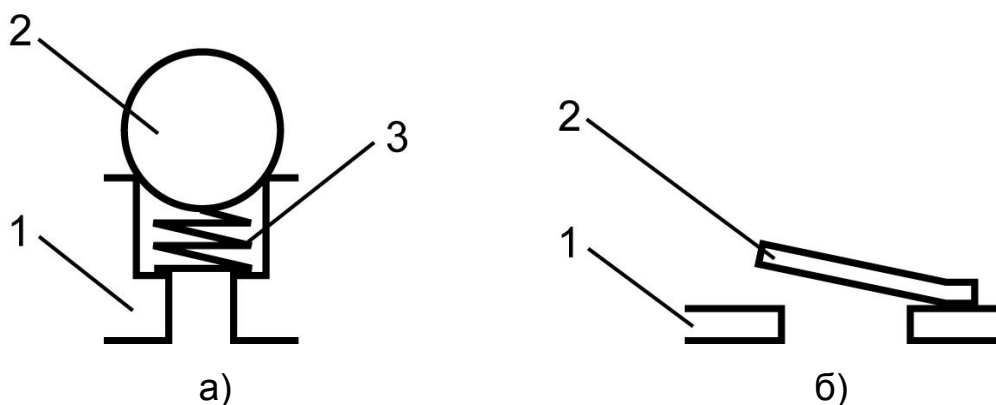


Рис. 2.10. Структурно-конструктивные схемы регулирующих клапанов, используемых в ВН:

1 – седло; 2 – уплотнительный элемент; 3 – пружина
а – шарикового типа; б – мембранного типа

обеспечивать работу в соответствии с требуемым алгоритмом, поскольку задать их законы движения не представляется возможным вследствие следующих причин.

Во-первых, РК обладают динамикой срабатывания. Время срабатывания клапана должно быть, по крайней мере, на порядок меньше, чем длительность такта функционирования ВН, наличие или отсутствие потока газа во время которого он обеспечивает. В противном случае на протяжении некоторого времени, соизмеримого с длительностью такта, проводимость клапана будет меньше номинальной или отлична от нулевой соответственно, что приведет к ухудшению характеристик ВН.

Время срабатывания неуправляемых РК соизмеримо с длительностью тактов разрабатываемого МНН и составляет порядка десятых долей секунды. Использование в МНН неуправляемых РК приведет тому, что переходные процессы, которыми пренебрегается в расчете и моделировании, будут играть существенную роль и окажутся неучтенными.

Во-вторых, уплотнительные элементы неуправляемых РК обладают инерционными, ударными и деформационными характеристиками, учет которых в математической модели клапана затруднителен, а проведение экспериментальных исследований требует материальных и временных затрат. Таким образом, определение законов движения уплотнительных элементов неуправляемых РК представляет собой сложную задачу и на практике не реализуется.

Избежать вышеуказанных недостатков позволит разработка управляемого РК, срабатывающего от управляющего устройства в соответствии с заданным алгоритмом.

Основным критерием при выборе вида управляемого РК является возможность обеспечения необходимой проводимости клапана, определяемой согласно основному уравнению вакуумной техники быстротой

действия соответствующей откачной ступени.

Номинальная быстрота действия МНН S_n , как и любого ВН объемного действия, определяется быстротой действия первой откачной ступени S_I . В силу того, что в синтезированной структурно-конструктивной схеме (рис. 2.9, а) откачные ступени располагаются в одной рабочей камере, частота их сокращений одинакова и максимальные объемы практически равны, быстрота действия обеих ступеней на данном этапе проектирования принимается одинаковой. Пренебрегая проводимостью входного патрубка насоса,

$$S_{II} \approx S_I = S_n . \quad (2.15)$$

Поскольку каждый из трех РК обеспечивает поступление или истечение газа в откачные полости I и II, их проводимости $U_{кл}$ в соответствии с основным уравнением вакуумной техники должны быть как минимум на порядок больше быстроты действия откачных ступеней:

$$U_{кл} \geq 10 \cdot S_n . \quad (2.16)$$

В соответствии с (2.16) и постановкой задачи (раздел 1.3)

$$U_{кл} \geq 100 \text{ см}^3/\text{с} . \quad (2.17)$$

Исходя из условия (2.17) можно оценить требуемую величину зазора клапана в открытом положении, т.е. требуемую величину перемещения уплотнительного элемента. В соответствии с характером зависимости проводимости любой коммуникации от давления проводимость является минимальной в стационарном режиме работы насоса [66]. Согласно этому оценку нужно проводить в стационарном режиме, давление в котором принимается равным минимальному рабочему давлению, принятому в постановке задачи (раздел 1.3).

Для проведения оценки необходимо задаться расчетной схемой кла-

пана (рис. 2.11), в которой предполагается, что седло и уплотнительный элемент клапана имеют цилиндрическую форму.

Оценивая требуемую величину рабочего зазора в полностью открытом положении клапана, воспользуемся выражением для определения проводимости кольцевой щели:

$$\delta_{\max} \geq \sqrt[3]{\frac{U_{\text{кл}}}{2,89 \cdot 10^4 \cdot P_{\min}} \ln \left(\frac{d_{\text{уз}}}{d_c} \right)} \geq 0,35 \text{ мм} , \quad (2.18)$$

где $d_c \approx 2$ мм – оценочное значение внутреннего диаметра седла,

$d_{\text{уз}} \approx 8$ мм – оценочное значение диаметра уплотнительного элемента,

$P_{\min} = 100$ Па – минимальное рабочее давление.

Значения всех переменных взяты в единицах СИ.

Таким образом, клапан должен обеспечивать перемещение уплотнительного элемента порядка десятых долей миллиметра.

С использованием известной методики [51-53] создана эвристическая модель выбора вида привода РК ВН (табл. 2.5). В качестве множества альтернатив приняты наиболее широко применяемые в приборостроении виды приводов (табл. 2.6)

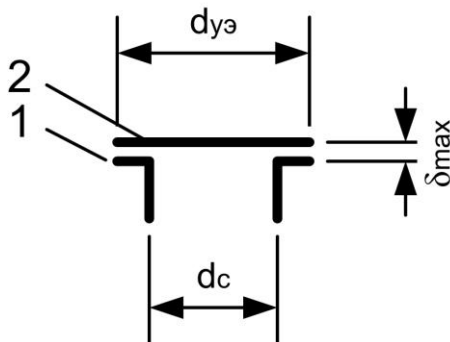


Рис. 2.11. Расчетная схема для оценки требуемой величины зазора регулирующего клапана в открытом положении:

1 – седло; 2 – уплотнительный элемент

Таблица 2.5.

Эвристическая модель выбора вида привода РК ВН

	$h_{\max}, \text{М}$					$V_{\varepsilon}^{\text{М}}, \%$				
	$\geq 10^{-5}$	$\geq 10^{-4}$	$\geq 10^{-3}$	$\geq 10^{-2}$	$\geq 10^{-1}$	≤ 10	≤ 30	≤ 50	≤ 70	≤ 90
e_1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
e_2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
e_3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

	Π_1		$t_{\text{ср}}, \text{с}$			
	1	2	$\leq 10^{-4}$	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-1}$
e_1	1	0	0	1	1	1
e_2	1	1	0	1	1	1
e_3	1	1	0	1	1	1

$$E = \{e_i\}, i = \overline{1,3}. \quad (2.19)$$

Для формирования вектора критериев используются показатели качества РК, связанные с его функционированием в ВН:

Таблица 2.6.

Множество альтернатив выбора вида привода РК ВН

Обозначение	Альтернатива
e_1	Электромеханический привод
e_2	Пьезопровод
e_3	Электромагнитный привод

Таблица 2.7.

Градации значений признаков вектора критериев выбора вида привода РК ВН

Признак, его обозначение, шкала измерения	Значение	Код значения
Наличие узлов трения, Π_1 , порядковая шкала	да	1
	нет	2

$$K = (h_{\max}, V_{\varepsilon}^M, t_{\text{ср}}, \Pi_1), \quad (2.20)$$

где $h_{\max} = \delta_{\max}$ – максимально достижимое перемещение;

V_{ε}^M – относительный "мертвый" объем;

$t_{\text{ср}}$ – время срабатывания;

Π_1 – наличие узлов трения (табл. 2.7).

Под относительным "мертвым" объемом понимается отношение

"мертвого" объема привода к занимаемому.

Технические требования в виде значений критериев определены общей постановкой задачи и оценочными значениями параметров РК:

$$h_{\max} \geq 0,35 \text{ мм}, \quad V_{\varepsilon}^M \leq 10 \%, \quad t_{\text{ср}} \leq 10^{-2} \text{ с}, \quad \Pi_1 \geq 2.$$

Применение РК с электромеханическими приводами влечет за собой увеличение "мертвых" объемов, а, следовательно, рост предельного остаточного давления. Помимо этого одна из тенденций развития вакуумной техники заключается в исключении из вакуумных полостей механических узлов, что ведет к увеличению ресурса работы и возможности получения вакуума без тяжелых углеводородных соединений и частиц износа. Исходя из этого применение РК с электромеханическими приводами нецелесообразно.

Известны работы, направленные на разработку управляемых РК на основе пьезопроводов для сверхминиатюрных вакуумных и жидкостных насосов, используемых в микросистемной технике [88, 89]. Применение в клапанах пьезопроводов позволяет получать перемещение уплотнительного элемента до 0,1 мм, что не соответствует условию (2.18).

Широкое распространение в технике, в том числе и вакуумной, получили электромагнитные приводы, что обусловлено широким их диапазоном возможных создаваемых перемещений (от десятых долей миллиметра до десятков сантиметров), высоким быстродействием (до единиц миллисекунд) и их технологичностью. В результате выбора по эвристической модели (табл. 2.7) единственным выбранным видом является электромагнитный привод (e_3). Столбцы эвристической модели, соответствующие значениям технических требований, выделены темным цветом.

В приборных устройствах, к которым относится разрабатываемый РК, как правило, применяются нейтральные электромагниты (ЭМ) постоянного тока. Действие такого ЭМ зависит только от величины постоянного

тока и не зависит от его направления.

С учетом малых габаритных размеров разрабатываемого клапана включение его обмотки принимается параллельным, что позволяет делать большое число витков обмотки, работающей при заданном напряжении, с использованием провода малого сечения.

ЭМ постоянного тока по возможным структурно-конструктивным схемам делятся на три класса: ЭМ с втягивающимся якорем (соленоидного типа), ЭМ с внешним притягивающимся якорем (клапанного типа) и ЭМ с поперечно движущимся якорем (рис. 2.12).

ЭМ с втягивающимся якорем (рис. 2.12, а) проектируются для обеспечения больших ходов якоря (от единиц миллиметров до десятков сантиметров), ЭМ с внешним притягивающимся якорем (рис. 2.12, б) предназначены для развития больших тяговых усилий при малых ходах якоря (от десятых долей до единиц миллиметра), ЭМ с поперечно движущимся якорем (рис. 2.12, в) менее экономичны, однако позволяют получить тяговую

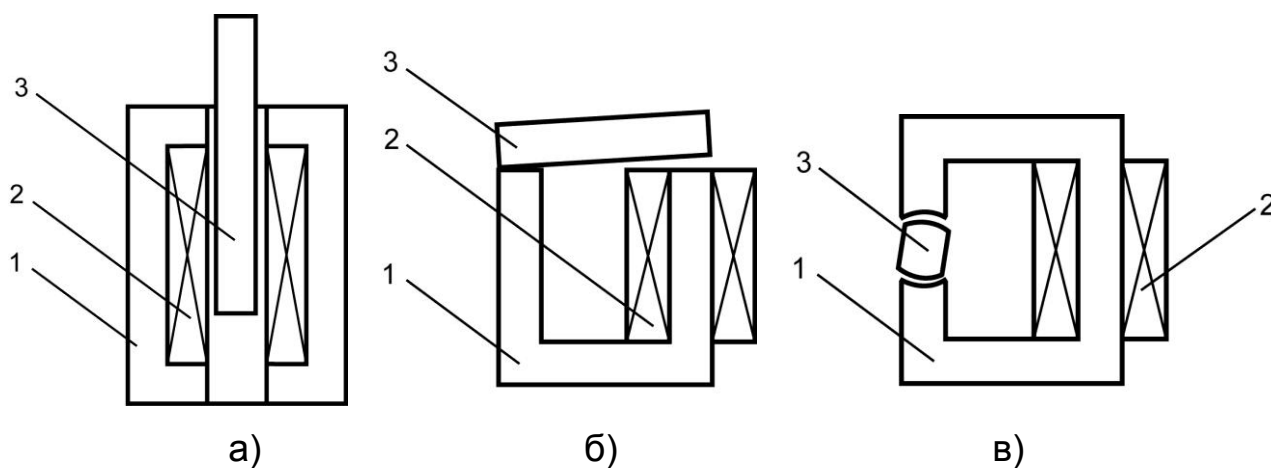


Рис. 2.12. Структурно-конструктивные схемы ЭМ:

1 – неподвижная часть магнитопровода; 2 – обмотка; 3 – якорь;

а – ЭМ с втягивающимся якорем; б – ЭМ с внешним

притягивающимся якорем; в – ЭМ с поперечно движущимся якорем

характеристику любой формы. В каждом из классов ЭМ имеется ряд

структурных и конструктивных разновидностей, связанных с назначением и необходимостью обеспечения заданных характеристик ЭМ [97].

Исходя из требования (2.18) в качестве привода РК выбирается ЭМ с внешним притягивающимся якорем (рис. 2.12, б). Из множества существующих структурно-конструктивных схем ЭМ этого класса [98] только ЭМ с цилиндрическим магнитопроводом (рис. 2.13) делает возможным разделение пространства под якорем и над ним, что позволяет, сделав полым сердечник неподвижной части магнитопровода 1 (рис. 2.13, б), использовать якорь в качестве уплотнительного элемента клапана. Таким образом, используя принцип совмещения функций, в качестве структурно-

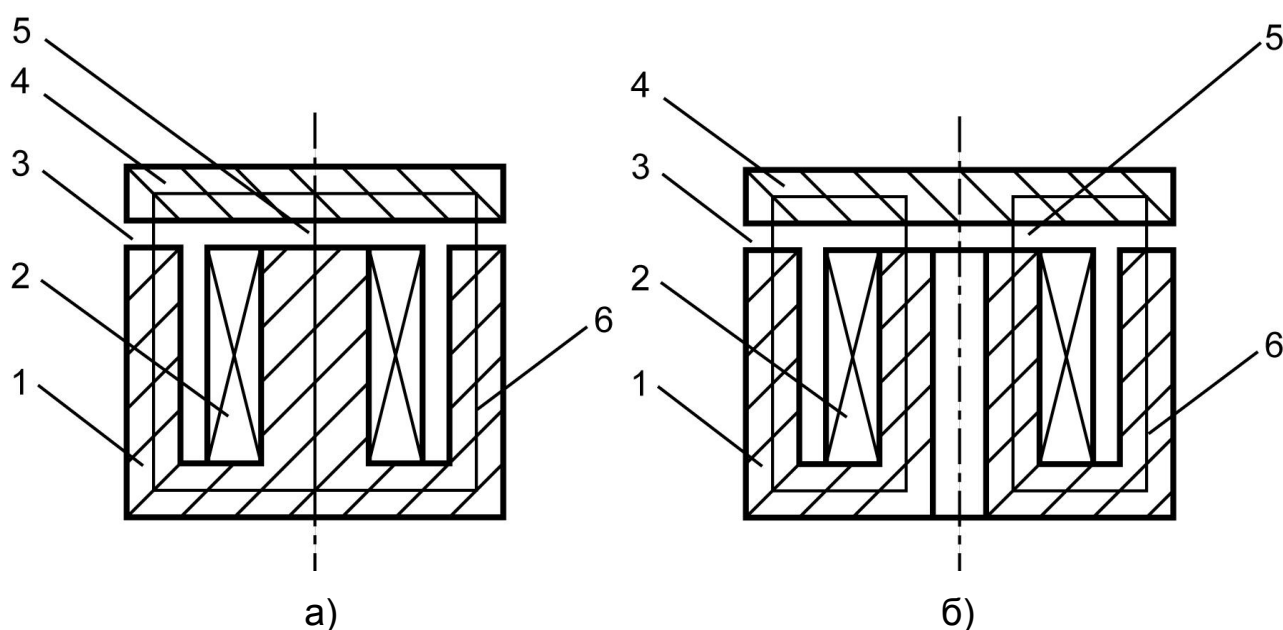


Рис. 2.13. Структурно-конструктивная схема ЭМ с цилиндрическим магнитопроводом:

- 1 – неподвижная часть магнитопровода; 2 – обмотка;
- 3 – большой рабочий зазор; 4 – якорь; 5 – малый рабочий зазор;
- 6 – линии магнитного контура;
- а – со сплошным сердечником; б – с полым сердечником

конструктивной схемы РК МНН принимается схема ЭМ с цилиндрическим магнитопроводом с полым сердечником.

Разработанная структурно-конструктивная схема РК (рис. 2.13, б) состоит из неподвижной части магнитопровода 1 с полым сердечником, поступательно движущегося якоря цилиндрической формы 4 и обмотки 2. Два рабочих зазора (большой 3 и малый 5) образованы торцевыми поверхностями якоря 4 и неподвижной части магнитопровода 1 и представляют собой цилиндры. В магнитном отношении зазоры соединены последовательно, а в механическом действуют параллельно. Созданная структурно-конструктивная схема позволяет провести расчет клапана и разработать конструкцию.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНИАТЮРНОГО НИЗКОВАКУУМНОГО НАСОСА

3.1 Методика формирования математических моделей функционирования многокамерных вакуумных систем

При традиционном проектировании работоспособность и функциональные характеристики вакуумного оборудования, вакуумных систем (ВС) и их элементов, как правило, определяются на стадии испытаний макетных образцов. Выявленные при этом дефекты и влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на функционирование и показатели качества в дальнейшем учитываются при корректировке рабочей документации.

Следует отметить, что на начальных стадиях проектирования, когда имеет место неопределенность исходных данных и проведение реальных экспериментов требует больших материальных и временных затрат, целесообразным является применение методов математического моделирования, позволяющих установить работоспособность предлагаемых функциональных и принципиальных схем и определить требования к их структурным составляющим без изготовления узлов и проведения экспериментов. Из разработанных моделей функционирования технических объектов вытекает большинство проектировочных расчетов.

Известные системы имитационного моделирования [99-101], ориентированные на анализ функционирования дискретных, дискретно-непрерывных и непрерывных систем, могут лишь частично использоваться для моделирования ВС, поскольку не позволяют учесть ряд существенных

особенностей, присущих реальным вакуумным процессам, таких как газо-выделение, газопоглощение, напуск газов, локальный нагрев и охлаждение, неоднородность газового состава по объему системы и т.п.

Разработке моделей функционирования ВС посвящен ряд работ. В этих трудах исследуется течение разреженных газов [102, 103], анализируются молекулярные потоки в неравновесных системах и процессы газо-выделения в вакууме [104], изучаются системы со шлюзовыми камерами [105] и другие процессы.

Моделирование многокамерных ВС, в состав которых входят несколько вакуумных камер или секционированная вакуумная камера, требует разработки моделей, описывающих функционирование при произвольном варьировании структуры ВС, что не предусматривают вышеуказанные подходы. Такими ВС обладают создаваемые в настоящее время миниатюрные технологические и физико-аналитические оборудование и приборы [106-108].

Для разработки моделей функционирования многокамерных ВС наиболее подходит метод элементарно-узловых структур [109]. Используя этот метод, предлагается рассматривать ВС как совокупность конечного числа вакуумных модулей (ВМ). ВМ представляет собой неделимое целое с сосредоточенными параметрами, имеющее конечное число узлов, через которые проходит газовый поток. В качестве узлов выступают средства откачки эффективной быстроты действия, источники газа или коммуникации с другими ВМ. Соблюдаются принципы неразрывности потока газа и сохранения количества движения.

Модель функционирования многокамерных ВС представляет собой систему уравнений, описывающих динамические связи между внутренними (давление, объем, поток газа со стороны ВМ) и внешними параметрами ВМ (проводимость коммуникаций, потоки напускаемых газов, быстрота

действия средств откачки). Обобщенная схема ВМ представлена на **рис. 3.1, а**. Поток газа со стороны ВМ в общем случае представляет собой сумму потоков газовыделения, сорбции, газопроницания, натекания через дефекты и соединения и др.

При моделировании многокамерных ВС варьируют как параметры их ВМ, так и связи между ВМ и их параметры, поэтому необходимо создать методику формирования математических моделей функционирования, обеспечивающую описание ВС при произвольном изменении ее структуры и позволяющую автоматизировать процесс построения ее модели.

Модель функционирования ВМ формируется в виде компонентного уравнения

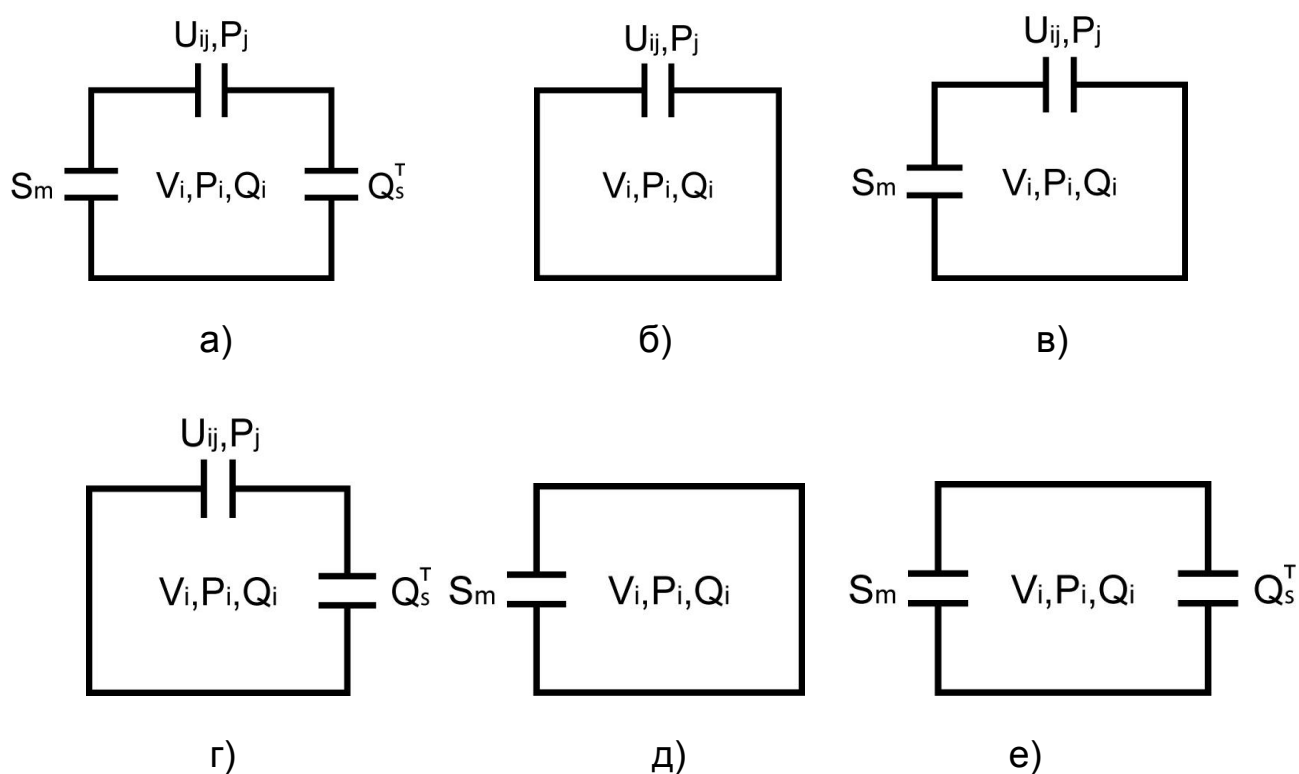


Рис. 3.1. Обобщенная и типовые схемы ВМ

$$f\left(\frac{dP_i}{dt}, \frac{dV_i}{dt}, P_i, V_i, t\right) = 0, \quad (3.1)$$

где P_i – давление в ВМ;

V_i – объем ВМ;

t – время, на основе уравнений баланса газовых потоков

$$\sum_{k=1}^n Q_k = 0 , \quad (3.2)$$

где Q_k – потоки через узлы ВМ;

n – число узлов в ВМ.

Модель функционирования многокамерной ВС представляет собой систему уравнений, сформированную на основе моделей каждого ВМ,

$$\left\{ \sum_{k=1}^n Q_k = 0 \right\}^i, \quad i=1, m , \quad (3.3)$$

где m – число ВМ.

Обобщенная схема ВМ (рис. 3.1, а) описывается следующим уравнением баланса газовых потоков:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i , \quad (3.4)$$

где U_{ij} – проводимости узлов ВМ, связывающих его со смежными ВМ;

S_m – эффективная быстрота действия средств откачки;

Q_s^m – потоки напускаемых газов;

Q_i – поток газа со стороны ВМ;

N – число смежных ВМ;

M – число средств откачки;

S – число источников напускаемых газов.

Обобщенная схема ВМ определяет шесть практически реализуемых типовых ВМ, включая себя, которые представлены на рис. 3.1.

Типовые ВМ описывается следующими математическими моделями функционирования. ВМ на **рис. 3.1, б**:

$$\frac{d(P_i, V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) + Q_i . \quad (3.5)$$

ВМ на **рис. 1, в**:

$$\frac{d(P_i, V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + Q_i . \quad (3.6)$$

ВМ на **рис. 1, г**:

$$\frac{d(P_i, V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i . \quad (3.7)$$

ВМ на **рис. 1, д**:

$$\frac{d(P_i, V_i)}{dt} = - P_i \sum_{m=1}^M S_m + Q_i . \quad (3.8)$$

ВМ на **рис. 1, е**:

$$\frac{d(PV_i)}{dt} = - P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i . \quad (3.9)$$

Функционирование многокамерной ВС определяется количеством и связями выделенных типовых ВМ и описывается совокупностью их моделей функционирования. Необходимая структура ВС и соответствующая ей модель функционирования получается добавлением или удалением типовых ВМ. При этом графическое изображение ВС представляется в виде расчетной вакуумной схемы, составляемой из схем типовых модулей (**рис. 3.1**).

Задав для полученной системы дифференциальных уравнений крае-

вые условия, одним из существующих методов проводят моделирование изменения давления в вакуумной системе при произвольном изменении ее структуры, результатом которого становятся значения давления P_i во всех ВМ ВС в каждый дискретный шаг решения системы момент времени.

Предложенная методика была успешно апробирована при создании математических моделей функционирования и моделировании различных вакуумных систем электронно-оптической колонны миниатюрного растрового электронного микроскопа [110, 111].

3.2 Математическая модель функционирования миниатюрного низковакуумного насоса

Синтезированная структурно-конструктивная схема МНН (рис. 3.2) может быть представлена в виде двухкамерной ВС, что позволяет создать математическую модель ее функционирования, используя предложенную в разделе 3.1 методику. Согласно ей расчетная вакуумная схема МНН с тестовой откачиваемой камерой, присоединенной к входному патрубку насоса, состоит из трех ВМ (рис. 3.3).

Наличие тестовой откачиваемой камеры обусловлено необходимостью учета сопротивления входного патрубка и впускного клапана насоса, что невозможно в модели для режима работы насоса "на себя". Пренебрежение этими параметрами приведет к ошибочному определению предельного остаточного давления МНН.

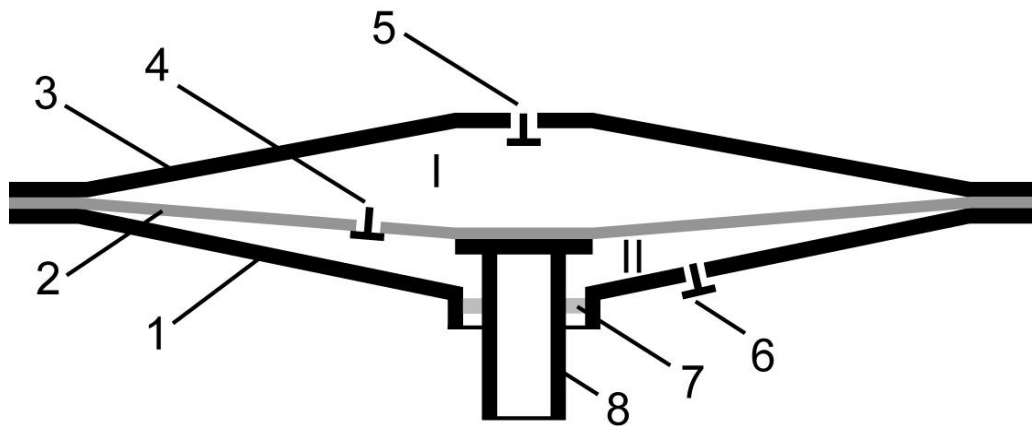


Рис. 3.2. Структурно-конструктивная схема МНН:

1 – нижний корпус; 2 – мембрана; 3 – верхний корпус;
 4 – перепускной клапан; 5 – всасывающий клапан;
 6 – выхлопной клапан; 7 – уплотнительный элемент; 8 – шток;
 I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно

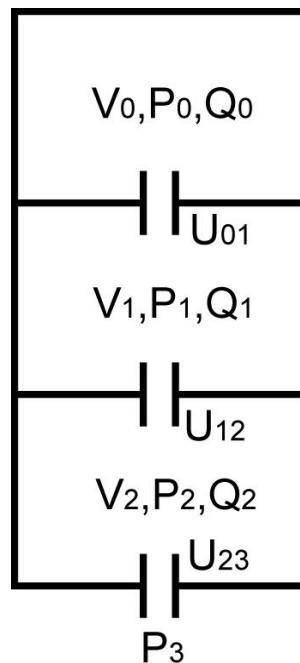


Рис. 3.3. Расчетная вакуумная схема МНН

В соответствии с предложенной методикой модель функционирования МНН формируется в виде системы трех уравнений, состоящей из ма-

тематических моделей ВМ, представляющих собой уравнения баланса газовых потоков:

$$\begin{cases} V_0 \frac{dP_0}{dt} = U_{01}(P_1 - P_0) + Q_0; \\ \frac{d(P_1 V_1)}{dt} = U_{01}(P_0 - P_1) + U_{12}(P_2 - P_1) + Q_1; \\ \frac{d(P_2 V_2)}{dt} = U_{12}(P_1 - P_2) + U_{23}(P_3 - P_2) + Q_2, \end{cases} \quad (3.10)$$

где V_0, V_1, V_2 – соответственно объемы тестовой откачиваемой камеры, первой и второй откачных ступеней;
 P_0, P_1, P_2, P_3 – соответственно давления в тестовой откачиваемой камере, первой и второй откачных ступенях, атмосфере;
 Q_0, Q_1, Q_2 – соответственно потоки газа со стороны тестовой откачиваемой камеры, первой и второй откачных ступеней;
 U_{01}, U_{12}, U_{23} – соответственно проводимости клапана 5 и входного патрубка, клапанов 4, 6 (рис. 3.2).

В общем случае потоки газа Q_0, Q_1 и Q_2 представляют собой функции времени, однако, с допустимой для проектных расчетов точностью принимаются постоянными. Так как предполагаемый диапазон функционирования насоса ограничен вакуумом низкой и средней степени, вносимая этим погрешность пренебрежимо мала.

Цикл работы МНН состоит из двух тактов (рис. 2.9) – расширения и сжатия объема первой откачной ступени. Время начала первого такта (рис. 2.9, а) обозначим $t = 0$ с, время его окончания — $t = t_1$.

Представляя откачные ступени в виде двух усеченных конусов с обращенными друг к другу большими основаниями и изменяющимися во времени высотами (рис. 3.4), объемы откачных ступеней представляют со-

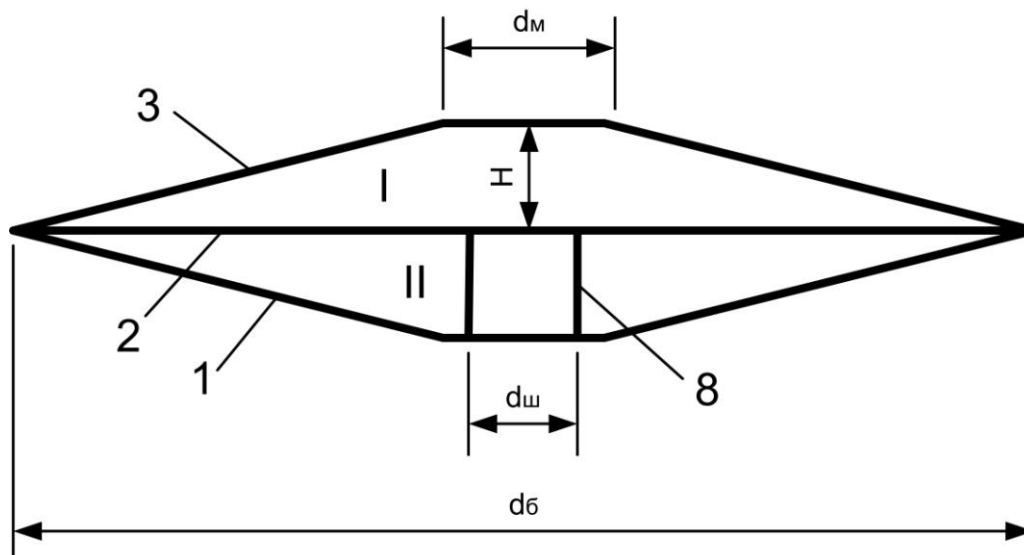


Рис. 3.4. К расчету изменения объемов откачных ступеней МНН в процессе функционирования:

1 – нижний корпус; 2 – мембрана; 3 – верхний корпус; 8 – шток;
 I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно
 (позиции согласованы с позициями [рис. 3.2](#))

бой сумму постоянных "мертвых" объемов и изменяющихся в процессе функционирования объемов конических частей:

$$V_1(t) = V_1^M + V_1^{yk}(t) ,$$

$$V_2(t) = V_2^M + V_2^{yk}(t) - V_{ш}(t) , \quad (3.11)$$

где V_1^M , V_2^M – соответственно "мертвые" объемы первой и второй откачных ступеней;

V_1^{yk} , V_2^{yk} – соответственно объемы конических частей первой и второй откачных ступеней;

$V_{ш}$ – объем, занимаемый штоком.

Объем тестовой откачиваемой камеры постоянен:

$$V_0 = \text{const} . \quad (3.12)$$

"Мертвые" объемы откачных ступеней включают в себя все несжимаемые объемы, в том числе объемы клапанов.

Пренебрегая толщиной мембраны и полагая движение штока равномерным и прямолинейным, изменение объемов конических частей первой и второй откачных ступеней на первом такте откачки (рис. 3.4):

$$V_1^{\text{ук}}(t) = \frac{\pi}{12} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \left(H + S_{\text{ш1}} \left(t - \frac{t_1}{2} \right) \right) ,$$

$$V_2^{\text{ук}}(t) = \frac{\pi}{12} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \left(H + S_{\text{ш1}} \left(\frac{t_1}{2} - t \right) \right) , \quad (3.13)$$

где d_6, d_m – соответственно больший и меньший внутренние диаметры корпусов;

H – прогиб мембраны;

$S_{\text{ш1}}$ – скорость движения штока на первом такте, которая определяется уравнением

$$S_{\text{ш1}} = \frac{2H}{t_1} . \quad (3.14)$$

Объем, занимаемый штоком, вследствие его выдвижения во вторую откачную ступень является функцией времени:

$$V_{\text{ш}}(t) = \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{4} S_{\text{ш1}} (t_1 - t) , \quad (3.15)$$

где $d_{\text{ш}}$ – внешний диаметр штока.

Подставляя уравнения (3.13 - 3.15) в (3.11), получаем зависимости изменения объемов первой и второй откачных ступеней на первом такте:

$$V_1(t) = V_1^M + \frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) \frac{t}{t_1},$$

$$V_2(t) = V_2^M + \frac{\pi H}{6} \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M - 3d_{ш}^2). \quad (3.16)$$

Подставляя уравнение (3.16) в модель функционирования МНН (3.10) получаем систему уравнений баланса газовых потоков на первом такте:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 \frac{dP_0}{dt} = U_{01} (P_1 - P_0) + Q_0; \\ \frac{dP_1}{dt} \left(V_1^M + \frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) \frac{t}{t_1} \right) = \\ = -P_1 \frac{\pi H}{6t_1} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) + U_{01} (P_0 - P_1) + U_{12} (P_2 - P_1) + Q_1; \\ \frac{dP_2}{dt} \left(V_2^M + \frac{\pi H}{6} \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M - 3d_{ш}^2) \right) = \\ = P_2 \frac{\pi H}{6t_1} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M - 3d_{ш}^2) + U_{12} (P_1 - P_2) + U_{23} (P_3 - P_2) + Q_2. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

В общем случае U_{01} учитывает проводимости входного патрубка и впускного клапана 5, U_{12} – проводимости всех коммуникаций, разделяющих первую и вторую откачные ступени, U_{23} – вторую откачную ступень и атмосферу.

Для оценки проводимостей коммуникаций принимается, что их условные проходы представляют собой цилиндрические отверстия малой длины, проводимость которых определяется по формулам для коротких

трубопроводов поперечным сечением круглой формы [67]. Обозначив в рамках данной модели клапаны 5, 4 и 6 как КЛ₀₁, КЛ₁₂ и КЛ₂₃ соответственно, для воздуха при температуре газа 293 К их проводимость равна:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{i,i+1} = 0, P_i < P_{i \text{ ВХЛ}}(P_{i+1}) ; \\ U_{i,i+1} = 1360 \frac{d_{yi}^4}{l_{yi} K_{\text{вр}}^i} \frac{(P_i + P_{i+1})}{2}, P_i d_{yi} \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}, P_i \geq P_{i \text{ ВХЛ}}(P_{i+1}) ; \\ U_{i,i+1} = 1360 \frac{d_{yi}^4}{l_{yi} K_{\text{вр}}^i} \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} + \\ + K_{\text{ср}}^i \cdot 116 \cdot K_{\text{мр}}^i \frac{\pi d_{yi}^2}{4}, 0,02 < P_i d_{yi} < 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}, P_i \geq P_{i \text{ ВХЛ}}(P_{i+1}) ; \\ U_{i,i+1} = 116 \cdot K_{\text{мр}}^i \frac{\pi d_{yi}^2}{4}, P_i d_{yi} \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}, P_i \geq P_{i \text{ ВХЛ}}(P_{i+1}) , \end{array} \right. \quad (3.18)$$

где d_{yi} – диаметр условного прохода клапана КЛ_{*i,i+1*};

l_{yi} – длина условного прохода клапана КЛ_{*i,i+1*};

$K_{\text{вр}}^i$ – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение d_{yi} и l_{yi} в вязкостном режиме;

$K_{\text{мр}}^i$ – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение d_{yi} и l_{yi} в молекулярном режиме;

$K_{\text{ср}}^i$ – коэффициент, учитывающий среднее давление в клапане КЛ_{*i,i+1*};

P_i – давление в откачной ступени *i*;

$P_{i \text{ ВХЛ}}$ – давление выхлопа клапана КЛ_{*i,i+1*}.

Если давление в соответствующей откачной ступени или тестовой откачиваемой камере меньше, чем давление, необходимое для открытия клапана (давление выхлопа), то клапан закрыт и его проводимость равна нулю. В случае если оно превосходит давление выхлопа, расчет проводимости проводится по одной из формул, соответствующих одному из режи-

мов течения газа.

Пренебрегая инерционными, ударными и деформационными характеристиками давление выхлопа каждого из клапанов определяется давлением с обратной стороны клапана и его силой сопротивления:

$$P_{i \text{ вхл}}(P_{i+1}) = P_{i+1} + \frac{F_i}{A_i}, \quad (3.19)$$

где F_i – проекция силы сопротивления клапана $КЛ_{i,i+1}$ на ось его симметрии; A_i – площадь поперечного сечения условного прохода клапана $КЛ_{i,i+1}$.

В качестве силы сопротивления могут выступать сила упругости пружины, сила тяжести, действующая на уплотнительный элемент, и другие силы, препятствующие открыванию клапана.

Поправочный коэффициент $K_{\text{вр}}^i$ с достаточной для проектных расчетов точностью может быть принят равным 1,5, поправочный коэффициент $K_{\text{мр}}^i$ определяется по соответствующей таблице [67]. Коэффициент, учитывающий среднее давление в клапане, в безразмерной форме может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$K_{\text{ср}}^i = \frac{2 + 1,9 \cdot 10^4 d_{yi} (P_i + P_{i+1})}{2 + 2,35 \cdot 10^4 d_{yi} (P_i + P_{i+1})}, \quad (3.20)$$

где P_i и P_{i+1} – в Па.

Обозначим время начала второго такта (рис. 2.9, б) $t = t_1$, а время его окончания — $t = t_2$. Принимая те же допущения, что и на первом такте, изменение объемов конических частей первой и второй откачных ступеней на втором такте (рис. 3.4):

$$V_1^{\text{ук}}(t) = \frac{\pi}{12} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \left(H + S_{\text{ш2}} \left(\frac{t_2 - t_1}{2} - t + t_1 \right) \right),$$

$$V_2^{yk}(t) = \frac{\pi}{12} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \left(H + S_{ш2} \left(t - t_1 - \frac{t_2 - t_1}{2} \right) \right), \quad (3.21)$$

где $S_{ш}^2$ – скорость движения штока на втором такте, которая определяется уравнением

$$S_{ш2} = \frac{2H}{t_2 - t_1}. \quad (3.22)$$

Объем, занимаемый штоком, вследствие его выдвижения во вторую откачную ступень является функцией времени:

$$V_{ш}(t) = \frac{\pi d_{ш}^2}{4} S_{ш2} (t - t_1), \quad (3.23)$$

где $d_{ш}$ – внешний диаметр штока.

Подставляя уравнения (3.21 - 3.23) в (3.11), получаем зависимости изменения объемов первой и второй откачных ступеней на втором такте:

$$V_1(t) = V_1^M + \frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \left(1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right),$$

$$V_2(t) = V_2^M + \frac{\pi H}{6} \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right) (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m - 3d_{ш}^2). \quad (3.24)$$

Подставляя уравнение (3.24) в модель функционирования МНН (3.10) получаем систему уравнений баланса газовых потоков на втором такте:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 \frac{dP_0}{dt} = U_{01}(P_1 - P_0) + Q_0 ; \\ \\ \frac{dP_1}{dt} \left(V_1^M + \frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) \left(1 - \frac{t-t_1}{t_2-t_1} \right) \right) = \\ = P_1 \frac{\pi H}{6(t_2-t_1)} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) + U_{01}(P_0 - P_1) + U_{12}(P_2 - P_1) + Q_1 ; \quad (3.25) \\ \\ \frac{dP_2}{dt} \left(V_2^M + \frac{\pi H}{6} \left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1} \right) (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M - 3d_{ш}^2) \right) = \\ = -P_2 \frac{\pi H}{6(t_2-t_1)} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M - 3d_{ш}^2) + U_{12}(P_1 - P_2) + U_{23}(P_3 - P_2) + Q_2 ; \end{array} \right.$$

Проводимости клапанов U_{01} , U_{12} и U_{23} на втором такте определяется в соответствии с уравнением (3.18).

Давление тестовой откачиваемой камере и в обеих откачных полос-
тах в начале нового цикла совпадает с давлением в них в конце предыду-
щего.

Для перехода от предыдущего цикла $(j-1)$ к последующему (j) при
расчете математическая модель дополняется уравнениями связи циклов
откачки, представляющие собой начальные условия для системы уравне-
ний (3.17):

$$\begin{aligned} P_0^j(0) &= P_0^{j-1}(t_2) , \\ P_1^j(0) &= P_1^{j-1}(t_2) , \\ P_2^j(0) &= P_2^{j-1}(t_2) . \end{aligned} \quad (3.26)$$

Начальные условия для уравнений (3.26):

$$P_0^0(0) = P_1^0(0) = P_2^0(0) = P_3 . \quad (3.27)$$

Решение систем уравнений газовых потоков (3.17), (3.25) с использованием уравнений определения проводимости клапанов (3.18), уравнений связи циклов откачки (3.26) и начальных условий (3.27) позволяет определить значение давления в обеих откачных полостях МНН в каждый момент времени в процессе его работы.

Исходя из определения производительности МНН как разности прямого и обратного потока газа в первую откачную ступень, быстрота действия насоса на каждом цикле откачки определяется из уравнения

$$S_n^j = n \left(\left(V_1^M + \frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_M^2 + d_6 d_M) \right) - \frac{V_1^M \cdot P_1^j(t_2)}{P_1^j(t_1)} \right) - \frac{Q_1}{P_1^j(t_1)} , \quad (3.28)$$

где S_n^j – быстрота действия насоса на цикле j ; n – частота работы мембраны:

$$n = \frac{1}{t_2} . \quad (3.29)$$

Варьируя различные конструктивные (размеры откачных ступеней, силу сопротивления и размеры клапанов) и эксплуатационные (t_1 , t_2) параметры насоса в процессе моделирования в соответствии с разработанной математической моделью, можно установить зависимости основных функциональных параметров МНН – предельного остаточного давления и номинальной быстроты действия – от них.

Построенная математическая модель описывает функционирование МНН, содержащего неуправляемые РК. Математическая модель функционирования МНН с управляемыми РК, структурно-конструктивная схема которых предложена в главе 2, является частным случаем построенной модели и в работе не приводится.

3.3 Моделирование работы

Для моделирования работы МНН в соответствии с предложенной методикой его проектирования (раздел 5.1) и расчетом РК (раздел 5.2) были заданы базовые конструктивные (рис. 3.4) и эксплуатационные параметры МНН:

частота движения мембраны n , с^{-1}	1
большой внутренний диаметр корпуса $d_{\text{б}}$, м	0,07
меньший внутренний диаметр корпуса $d_{\text{м}}$, м.....	0,014
прогиб мембраны H , м.....	0,003
внешний диаметр штока $d_{\text{ш}}$, м	0,002
"мертвый" объем первой откачной ступени $V_1^{\text{м}}$, м^3	$3 \cdot 10^{-8}$
"мертвый" объем второй откачной ступени $V_2^{\text{м}}$, м^3	$3 \cdot 10^{-8}$
диаметр условного прохода входного патрубка и впускного РК $d_{\text{у0}}$, м.....	0,0025
диаметр условного прохода перепускного РК $d_{\text{у1}}$, м.....	0,0014
диаметр условного прохода выхлопного РК $d_{\text{у2}}$, м	0,001
длина условного прохода входного патрубка с впускным РК $l_{\text{у0}}$, м.....	0,011
длина условного прохода перепускного РК $l_{\text{у1}}$, м	0,003
длина условного прохода выхлопного РК $l_{\text{у2}}$, м	0,0015
количество перепускных РК $T_{\text{кл2}}$	2
количество выхлопных РК $T_{\text{кл3}}$	24
проекция силы сопротивления впускного РК на ось симметрии F_0 , Н.....	0
проекция силы сопротивления перепускного РК на ось симметрии F_1 , Н	0
проекция силы сопротивления выхлопного РК на ось симметрии F_2 , Н.....	$1 \cdot 10^{-5}$
поток газа со стороны первой откачной ступени Q_1 , $\text{м}^3\text{Па/с}$	$2 \cdot 10^{-5}$
поток газа со стороны второй откачной ступени Q_2 , $\text{м}^3\text{Па/с}$	$2 \cdot 10^{-5}$
начальное давление в первой откачной ступени $P_1^0(0)$, Па.....	10^5
начальное давление во второй откачной ступени $P_2^0(0)$, Па.....	10^5
атмосферное давление P_3 , Па	10^5

объем тестовой откачиваемой камеры V_0 , м³ 10^{-4} - 10^{-3}

Значения частоты движения мембраны n , прогиба мембраны H , большего d_6 и меньшего d_m внутренних диаметров корпуса приняты, исходя из условий (5.4), (5.6), (5.7). Использованные при этом значения диаметра d_{y0} и длины l_{y0} условного прохода впускного клапана выбраны из условий (5.23), (5.29), (5.37).

Значения диаметра d_{y1} и длины l_{y1} перепускного клапана заданы согласно условиям (5.51), (5.29), (5.37). Количество перепускных $T_{кл2}$ и выхлопных $T_{кл3}$ РК, значения диаметра d_{y2} и длины l_{y2} выхлопных клапанов, внешний диаметр штока $d_{ш}$ заданы исходя из конструктивных соображений в соответствии с эскизом сборочного чертежа рабочей камеры МНН (рис. 5.3).

Значения "мертвых" объемов откачных ступеней $V_1^м$ и $V_2^м$ определены в соответствии с рис. 5.3. При этом предполагается, что прилегание мембраны к нижнему и верхнему корпусам настолько плотное, что "мертвыми" объемами, образованными при этом за счет микронеровностей можно пренебречь.

Поскольку ведется разработка насоса с управляемыми РК, проекции сил сопротивления впускного F_0 и перепускного F_1 РК на свои оси симметрии приняты равными нулю. Сила сопротивления выхлопного РК определена исходя из массогабаритных характеристик его уплотнительного элемента.

Потоки газа со стороны откачных ступеней Q_1 и Q_2 определяются газовыделением мембраны, в качестве материала которой выбрана вакуумная резина.

Значение объема тестовой откачиваемой камеры V_0 на основные параметры насоса не влияет. Для каждой иллюстрируемой зависимости оно подобрано таким образом, чтобы при приемлемом времени машинного просчета результаты обладали наглядностью.

Подставляя базовые параметры в созданную математическую модель и решая получающиеся при этом системы дифференциальных уравнений численным методом Рунге-Кутты, получена зависимость давлений в тестовой откачиваемой камере P_0 и откачных ступенях насоса P_1 и P_2 от времени t в процессе откачки, представленная на **рис. 3.5**.

Для анализа характеристик процесса откачки в рамках одного цикла, в **рис. 3.5** выделен фрагмент для двух последовательных циклов откачки в нестационарном режиме ($t = [2...4]$ с), представленный на **рис. 3.6**.

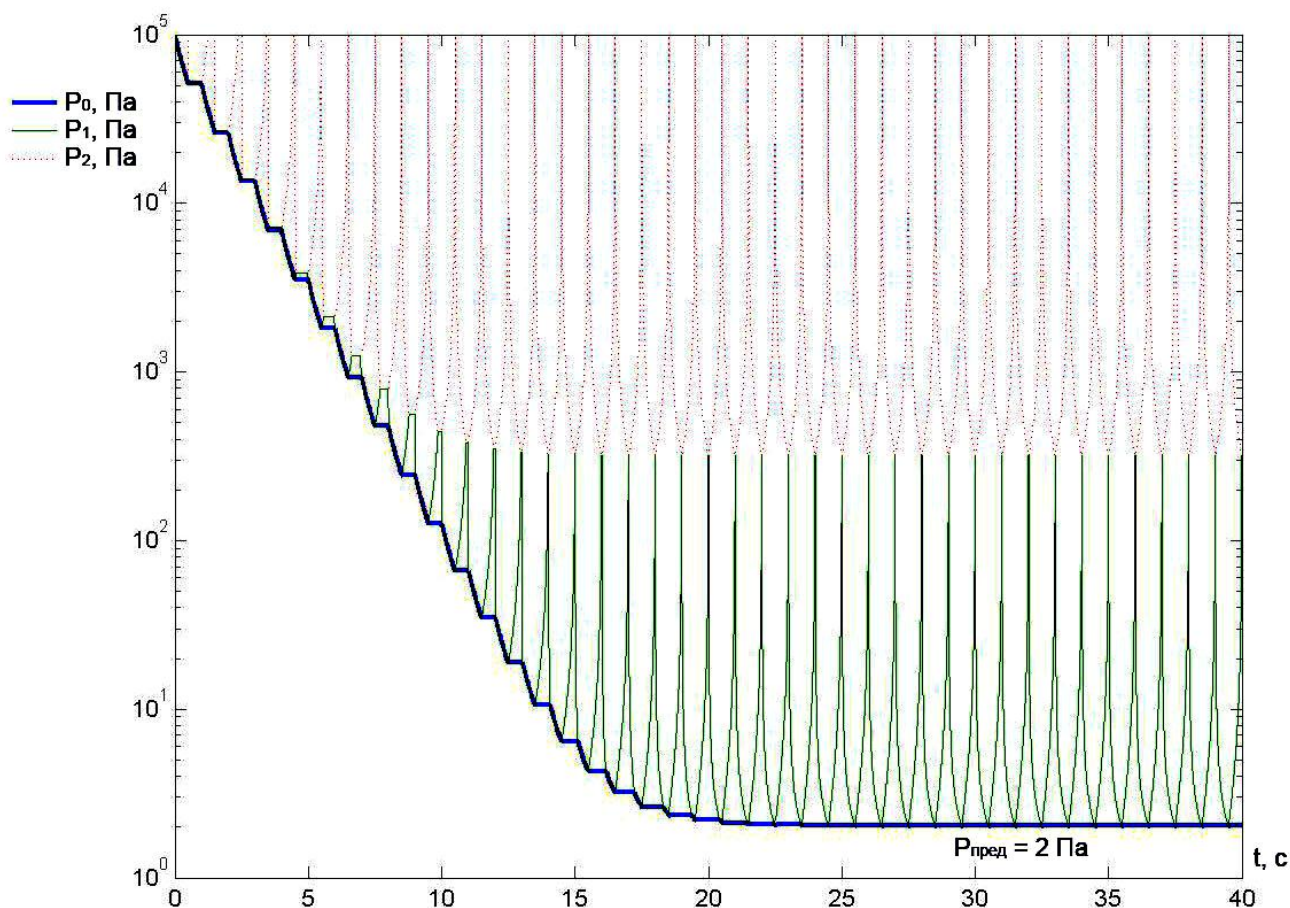


Рис. 3.5. Зависимость давления в тестовой откачиваемой камере P_0 , первой P_1 и второй P_2 откачных ступенях МНН от времени откачки t (базовые параметры, $V_0 = 10^{-5} \text{ м}^3$)

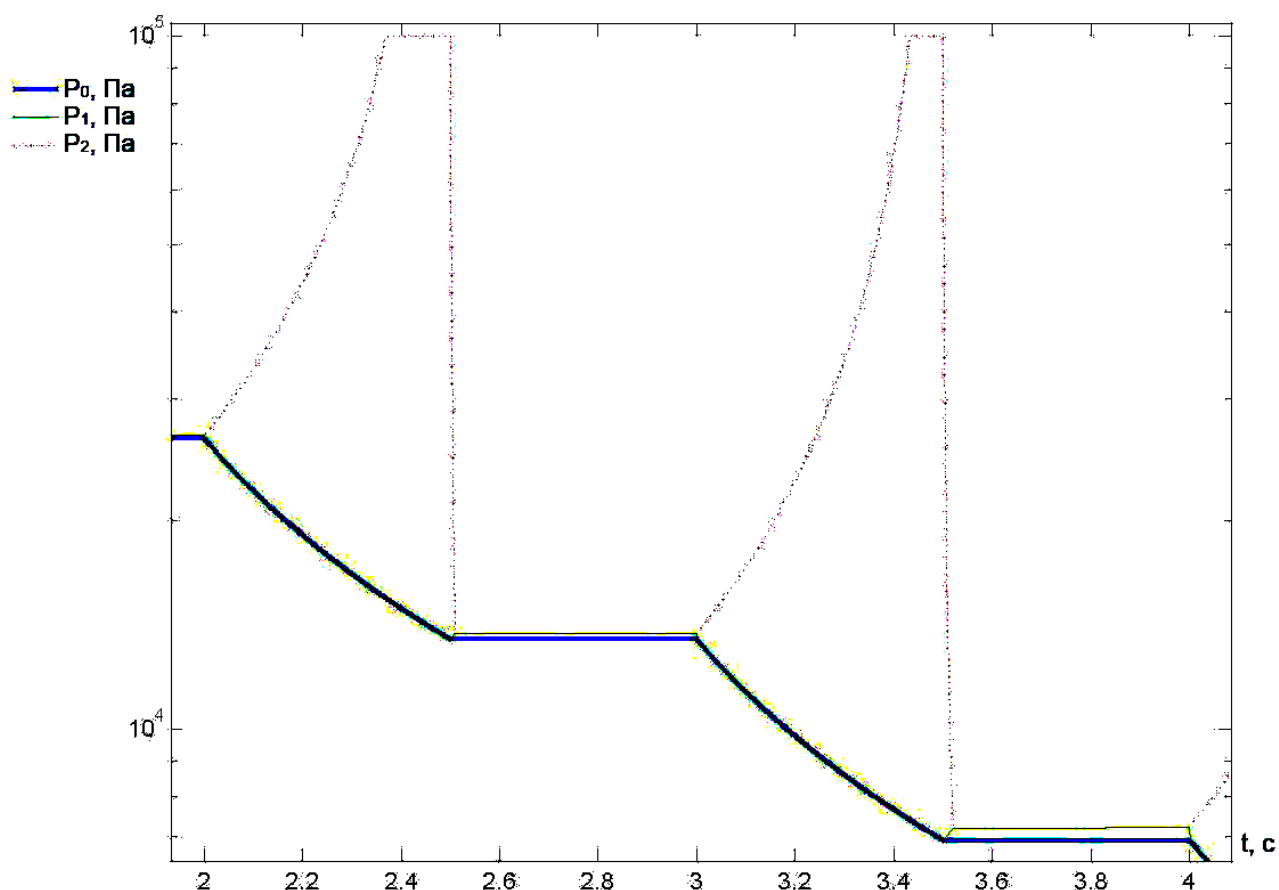


Рис. 3.6. Зависимость давления в тестовой откачиваемой камере P_0 , первой P_1 и второй P_2 откачных ступенях МНН от времени откачки t : фрагмент в нестационарном режиме (базовые параметры, $V_0 = 10^{-5} \text{ м}^3$)

Описание принципа действия МНН приведено в разделе 2.2. На первом такте ($t = [2 \dots 2,5] \text{ с}$) давление в первой откачной ступени P_1 уменьшается, что обусловлено ее расширением. При этом из-за высокой проводимости входного клапана в данном диапазоне давлений с кривой P_1 совпадает кривая давления в тестовой откачиваемой камере P_0 . Давление во второй откачной ступени P_2 увеличивается вследствие ее расширения. По достижении P_2 значения давления выхлопа выхлопной клапан открывается, после чего до конца первого такта P_2 остается постоянным и равным дав-

лению выхлопа. Согласно уравнению (3.19) давление выхлопа из второй откачной ступени постоянно $P_{2 \text{ вхл}} = 100013 \text{ Па}$.

В силу того, что в течение второго такта ($t = [2,5...4] \text{ с}$) впускной клапан закрыт, P_0 остается постоянным. В начале такта давление в первой откачной ступени P_1 начинает увеличиваться, что обусловлено ее сжатием, а P_2 – уменьшаться из-за расширения второй откачной ступени. Эти процессы продолжаются до момента установления в обеих откачных ступенях, сообщающихся друг с другом посредством открытого перепускного клапана, равного давления, после которого кривые P_1 и P_2 совпадают до окончания такта. Небольшой рост совпадающих на этом участке кривых P_1 и P_2 обусловлен вводом в рабочую камеру штока при неизменном суммарном количестве газа в них. Как видно из **рис. 3.5 и 3.6** на каждом последующим цикле этот момент времени сдвигается к окончанию такта, в стационарном режиме работы насоса совпадая с ним.

Предельное остаточное давление МНН представляет собой значение, к которому асимптотически стремится давление в тестовой откачиваемой камере в процессе откачки:

$$P_{\text{пред}} = \lim_{j \rightarrow \infty} P_0^j(t_2), \quad (3.30)$$

где j – номер цикла работы МНН, t_2 – время окончания цикла.

На практике при моделировании полагается, что насос выйдет на стационарный режим работы в момент времени $t_{\text{пред}}$, когда давление в тестовой откачиваемой камере в конце цикла начнет изменяться от цикла к циклу на фиксированную малую величину:

$$\frac{P_0^j(t_2) - P_0^{j+1}(t_2)}{P_0^j(t_2)} \leq 0,001. \quad (3.31)$$

Рис. 3.5 описывает функционирование МНН на протяжении 40 цик-

лов. Неравенство (3.31) начинает выполняться при $j = 26$. Таким образом, МНН с базовыми параметрами достигает предельного остаточного давления $P_{\text{пред}} = 2$ Па за время работы $t_{\text{пред}} = 26$ с.

Кривая давления выхлопа первой откачной ступени $P_{\text{I вхл}}$ представляет собой огибающую максимальных значений давления первой откачной ступени P_1 (рис. 3.7) и в стационарном режиме работы насоса $P_{\text{I вхл}} (P_{\text{пред}}) = 317$ Па. Таким образом, предложенная двухступенчатая структурно-конструктивная схема насоса с принятыми базовыми параметрами позволяет снизить давление выхлопа первой откачной ступени более чем на два порядка.

Поскольку выхлоп из первой откачной ступени через управляемый

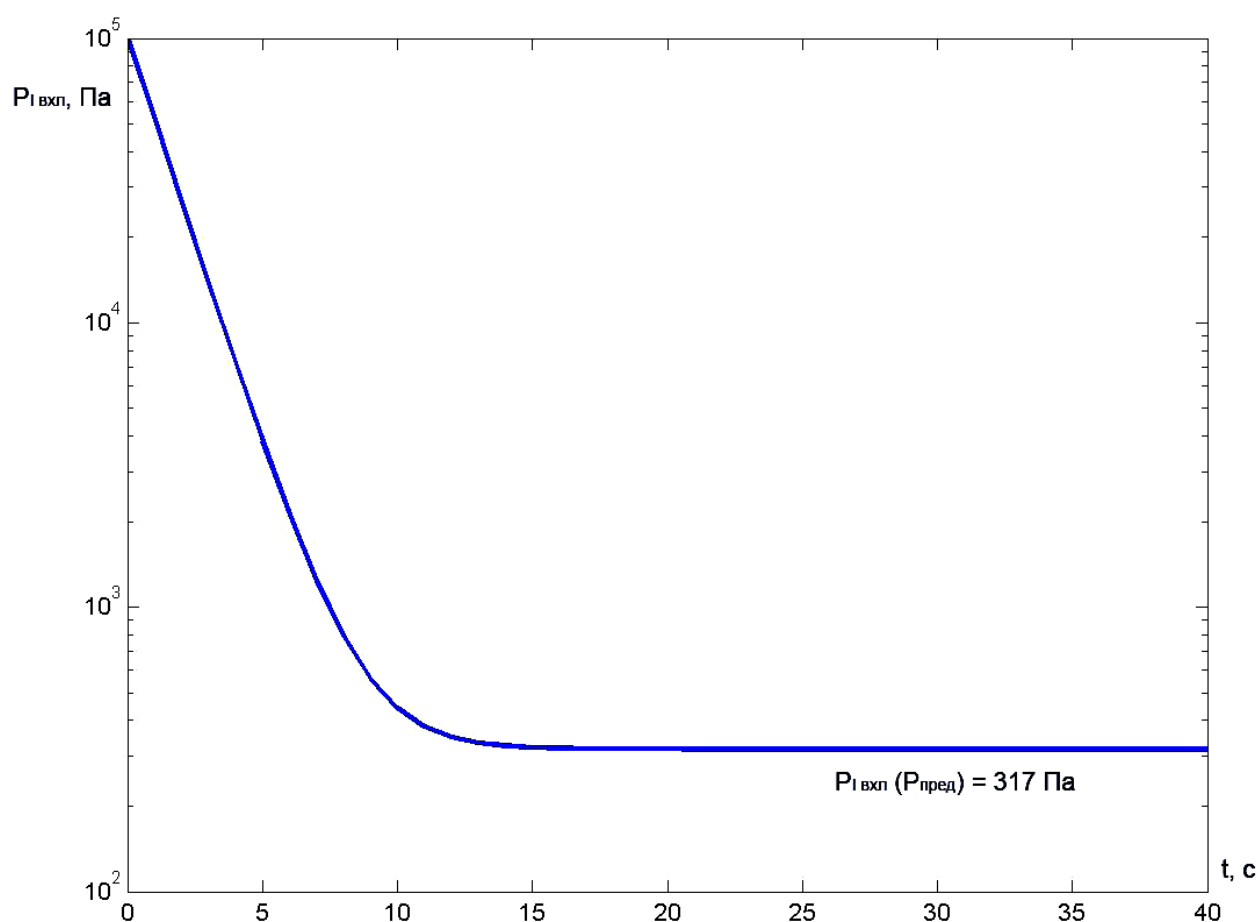


Рис. 3.7. Зависимость давления выхлопа первой откачной ступени $P_{\text{I вхл}}$ от времени откачки t (базовые параметры, $V_0 = 10^{-5} \text{ м}^3$)

РК осуществляется не за счет градиента давлений, а в силу управляющего воздействия, $P_{I\text{вхл}}$ теряет смысл давления выхлопа. В этом случае $P_{I\text{вхл}}$ имеет смысл исключительно давления газа, содержащегося в "мертвом" объеме первой откачной ступени в момент ее полного сжатия.

Для наглядной демонстрации преимущества управляемых РК по сравнению с неуправляемыми проведено моделирование насоса со значениями сил сопротивления впускного и перепускного клапана $F_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Н, $F_1 = 10^{-4}$ Н (рис. 3.8). В отличие от рис. 3.5 кривая давления в тестовой откачиваемой камере P_0 проходит выше огибающей минимальных значений

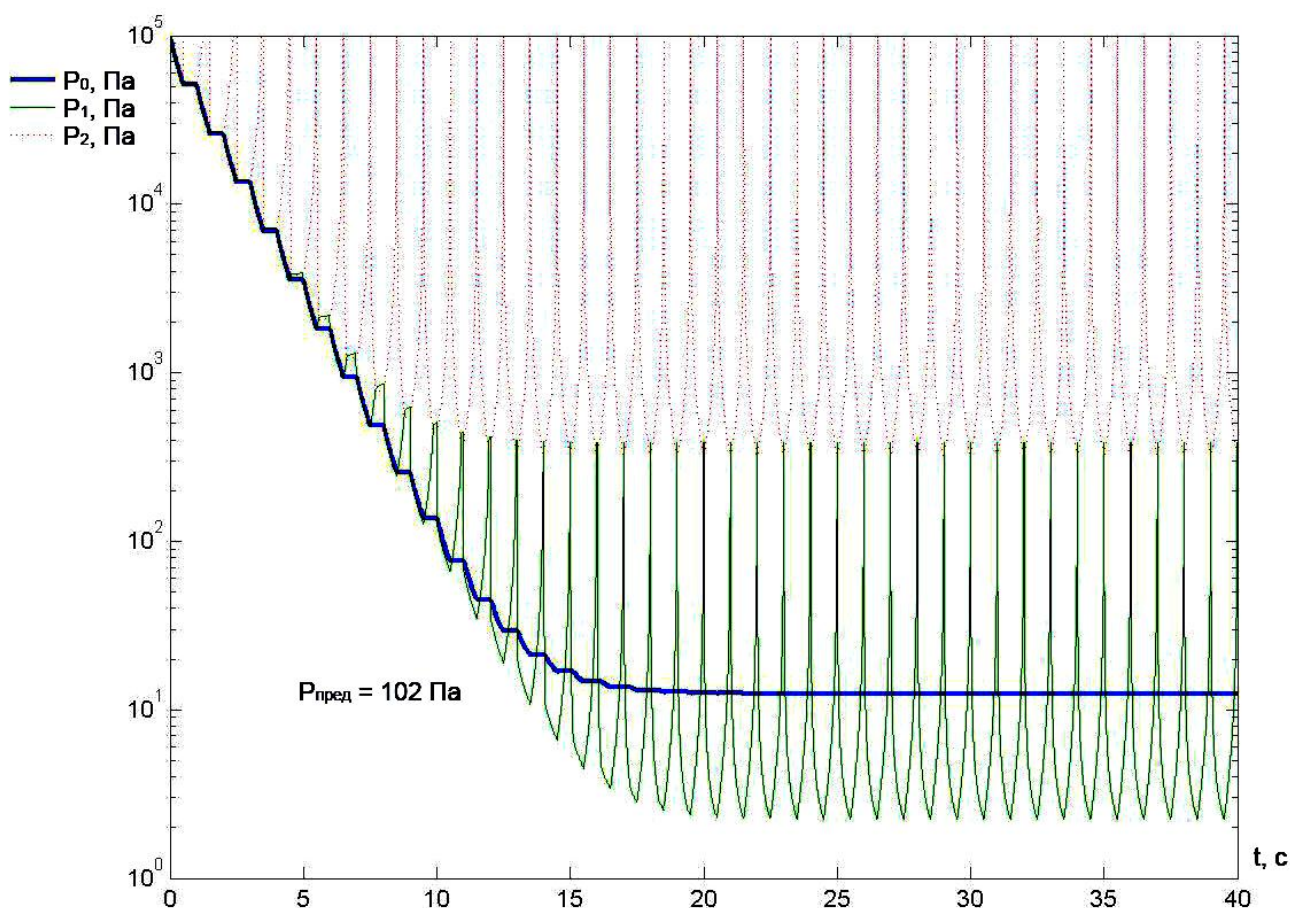


Рис. 3.8. Зависимость давления в тестовой откачиваемой камере P_0 , первой P_1 и второй P_2 откачных ступенях МНН от времени откачки t (базовые параметры, $F_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Н, $F_1 = 10^{-4}$ Н, $V_0 = 10^{-5}$ м³)

кривой P_1 , так как для открытия впускного клапана требуется преодоление силы его сопротивления. По аналогичной причине, связанной с открытием перепускных клапанов, кривая давления выхлопа первой откачной ступени $P_{I\text{ выхл}}$ будет превосходить минимальные значения P_2 . Значение предельного остаточного давления насоса с неуправляемым РК на два порядка выше, чем с управляемым, и составляет 102 Па.

На **рис. 3.9** представлена откачная характеристика МНН – зависимость быстроты действия S_n от давления в тестовой откачиваемой камере P_0 согласно уравнению (3.28). Зависимость носит классический для вакуумных насосов объемного действия характер – на графике ярко выражен

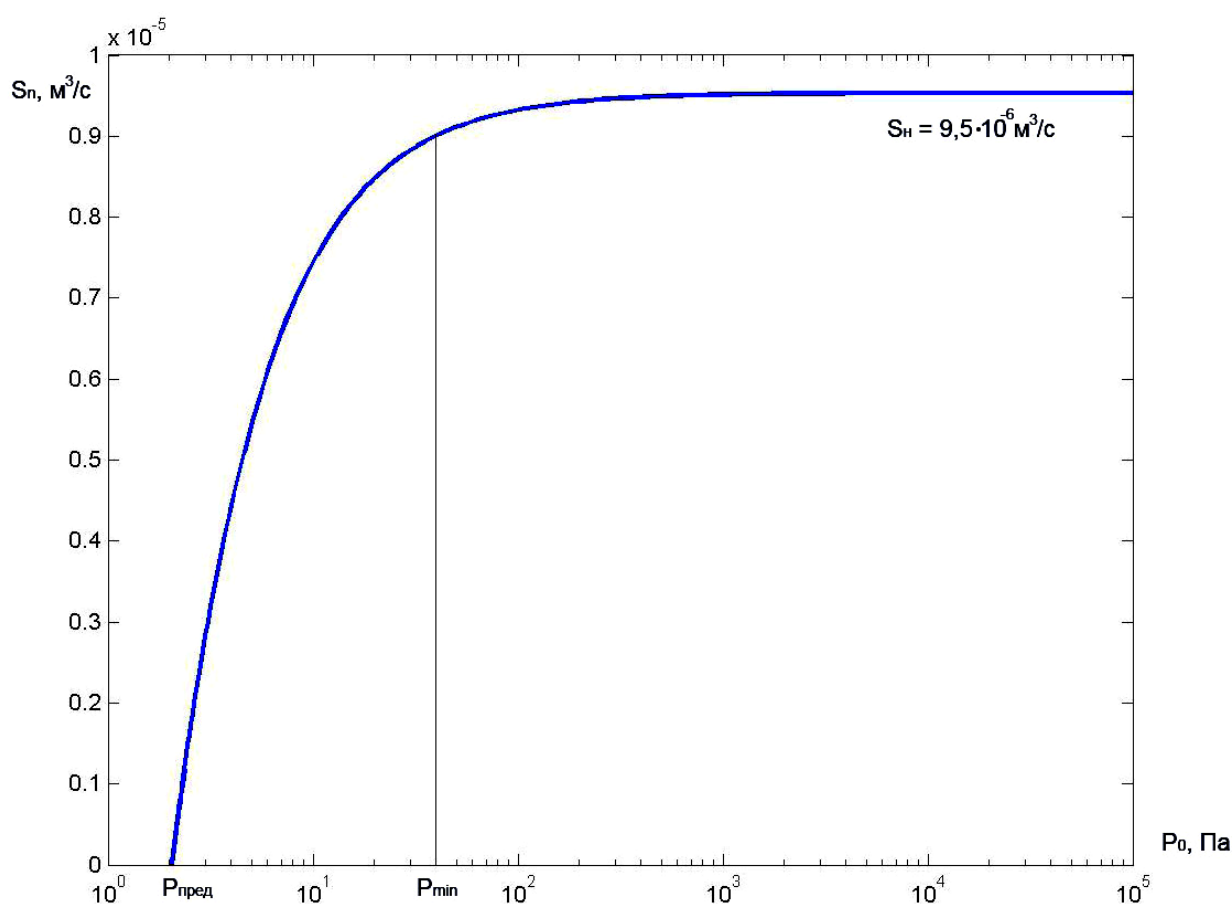


Рис. 3.9. Откачная характеристика МНН: зависимость быстроты действия S_n от давления в тестовой откачиваемой камере P_0 (базовые параметры, $V_0=10^{-4} \text{ м}^3$)

плоский участок кривой, соответствующий номинальной быстроте действия насоса, которая составляет $S_n = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, падающей в области давлений, близких к $P_{\text{пред}}$.

В качестве наименьшего рабочего давления P_{min} принимается давление в тестовой откачиваемой камере P_0 , начиная с которого быстрота действия насоса $S_n(P_0)$ снижается более чем на 5 % по сравнению с номинальным значением S_n :

$$\frac{S_n - S_n(P_0)}{S_n} \leq 0,05 . \quad (3.32)$$

Согласно критерию (3.32) наименьшее рабочее давление МНН оценивается $P_{\text{min}} = 40 \text{ Па}$.

Определяющее влияние на основные показатели качества и характеристики МНН оказывают геометрические параметры его рабочей камеры. На **рис. 3.10-3.13** представлены семейства кривых давления выхлопа первой откачной ступени в стационарном режиме работы $P_{\text{I вхл}}$ ($P_{\text{пред}}$), предельного остаточного давления $P_{\text{пред}}$, номинальной быстроты действия S_n , наименьшего рабочего давления МНН P_{min} в зависимости от большего внутреннего диаметра корпуса d_6 при различных значениях прогиба мембраны H . Приведенные характеристики представляют собой графические проектировочные зависимости и являются основой для расчета и конструирования мембранных МНН различных типоразмеров.

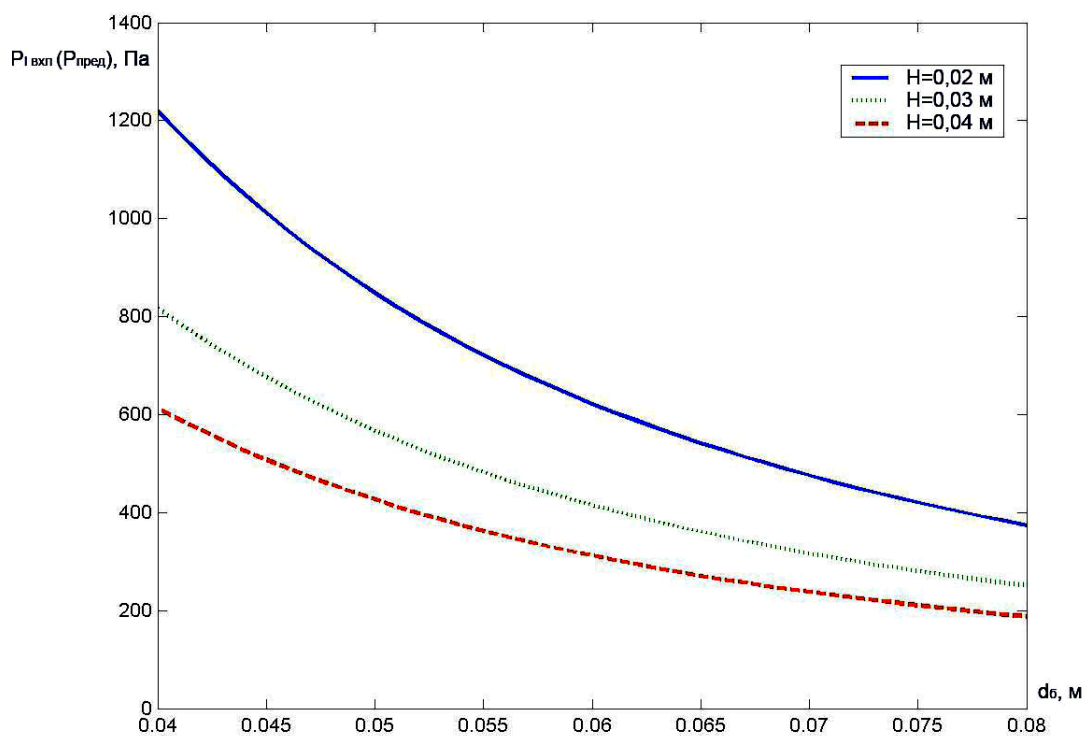


Рис. 3.10. Зависимость давления выхлопа первой откачной ступени в стационарном режиме работы МНН $P_{1\text{вхл}} (P_{\text{пред}})$ от большего внутреннего диаметра корпуса d_6 при различных значениях прогиба мембраны H

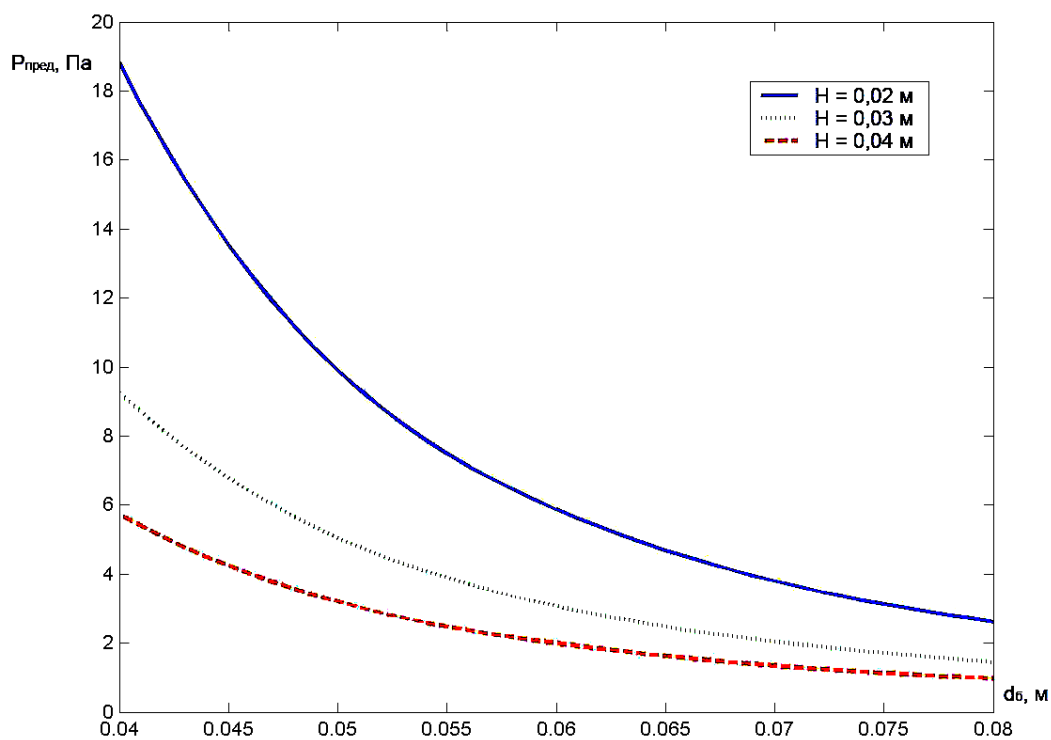


Рис. 3.11. Зависимость предельного остаточного давления МНН $P_{\text{пред}}$ от большего внутреннего диаметра корпуса d_6 при различных значениях прогиба мембраны H

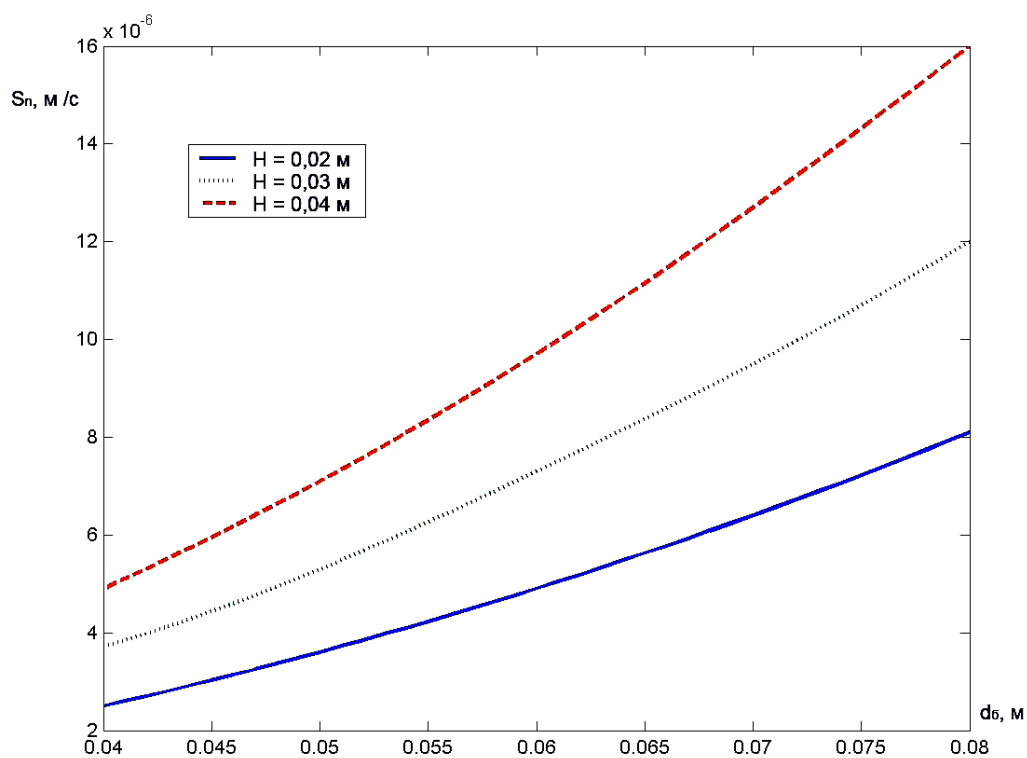


Рис. 3.12. Зависимость номинальной скорости действия МНН S_n от большего внутреннего диаметра корпуса d_6 при различных значениях прогиба мембраны H

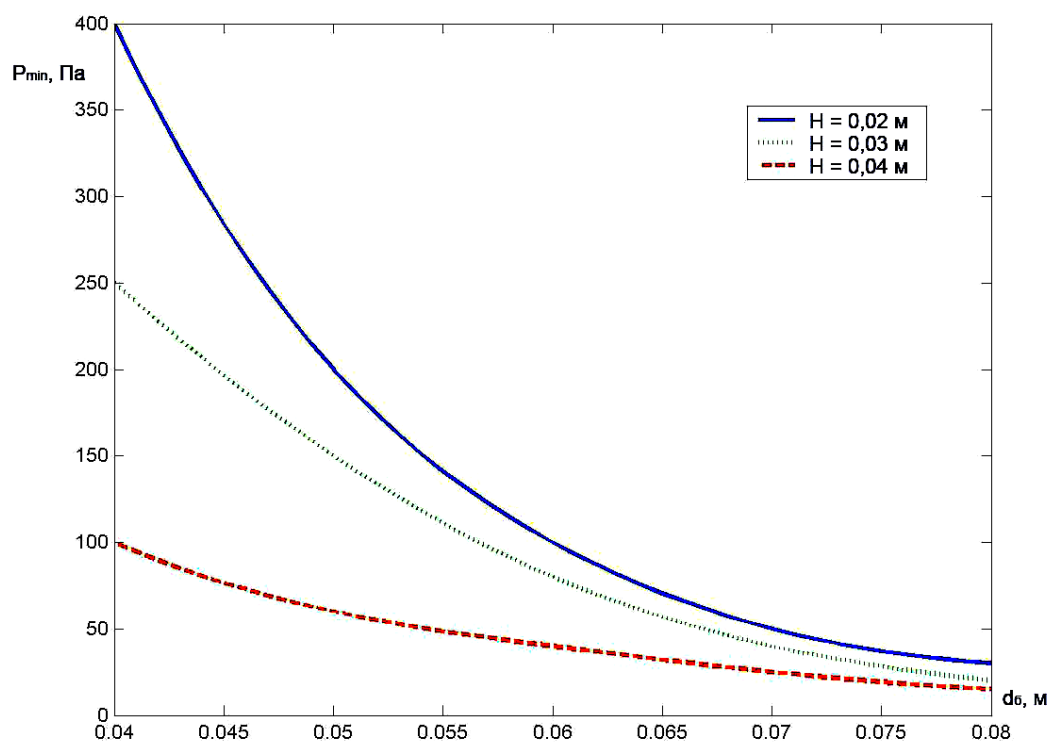


Рис. 3.13. Зависимость минимального рабочего давления МНН $P_{\min}$ от большего внутреннего диаметра корпуса d_6 при различных значениях прогиба мембраны H

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНИАТЮРНОГО НИЗКОВАКУУМНОГО НАСОСА

4.1. Методика экспериментальных исследований и испытательная установка

Экспериментальные исследования проводились для определения предельного остаточного давления МНН, построения его откачной характеристики и определения на ее основе номинальной быстроты действия и наименьшего рабочего давления.

Они соответствуют с ГОСТ 25663-83 "Оборудование вакуумное. Насосы вакуумные механические. Методы испытаний" [112], который распространяется на механические вакуумные насосы объемного действия, применяемые в вакуумных системах технологического оборудования для производства изделий электронной техники, работающие при выпускном давлении, равном атмосферному, и создающие на входе давление менее 1000 Па, и устанавливает метод измерения предельного остаточного давления.

Методика измерения предельного остаточного давления основана на откачке газа из измерительной камеры испытуемым насосом с одновременным измерением давления в камере через промежутки времени при постоянной температуре. Принципиальная вакуумная схема испытательной установки приведена на **рис. 4.1.**

Согласно стандарту для построения плавной откачной характеристики объем измерительной камеры V_0 должен удовлетворять условию

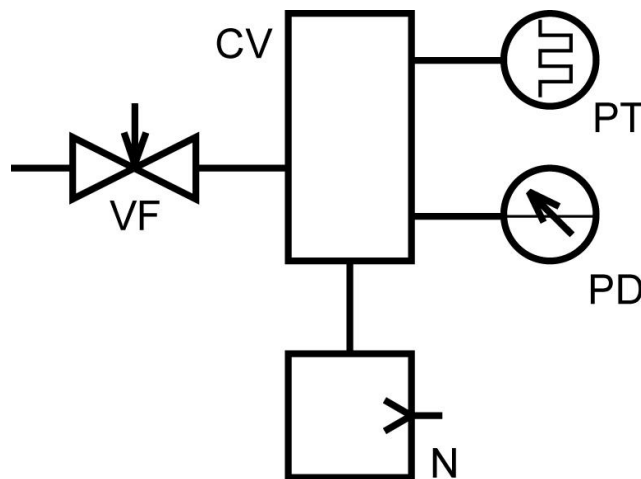


Рис. 4.1. Принципиальная вакуумная схема испытательной установки:

N – испытуемый МНН; CV – измерительная камера;
PD – деформационный манометр; PT – тепловой
манометрический преобразователь; VF – натекатель

$$V_0 \geq \frac{5 \cdot S_n}{n}, \quad (4.1)$$

где S_n – ожидаемая номинальная быстрота действия, n – частота движения рабочего тела.

Подставляя в условие (4.1) принятое значения $n = 1 \text{ с}^{-1}$ и полученное в результате моделирования $S_n = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, определяем минимально допустимое значение объема измерительной камеры $V_0 \geq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$.

Фотография испытательной установки представлена на **рис. 4.2**. В качестве измерительной камеры 1 использованы два скрепленных болтовым соединением цилиндра, общим объемом $V_0 = 10^{-2} \text{ м}^3$. Ось симметрии камеры перпендикулярна оси входного патрубка испытуемого МНН 5. Соединение измерительной камеры 1 с испытуемым насосом 5 осуществляется резиновой трубкой, расположенной внутри присоединительного патрубка камеры. Измерительная камера снабжена тремя вакуумметрами 2, 3,

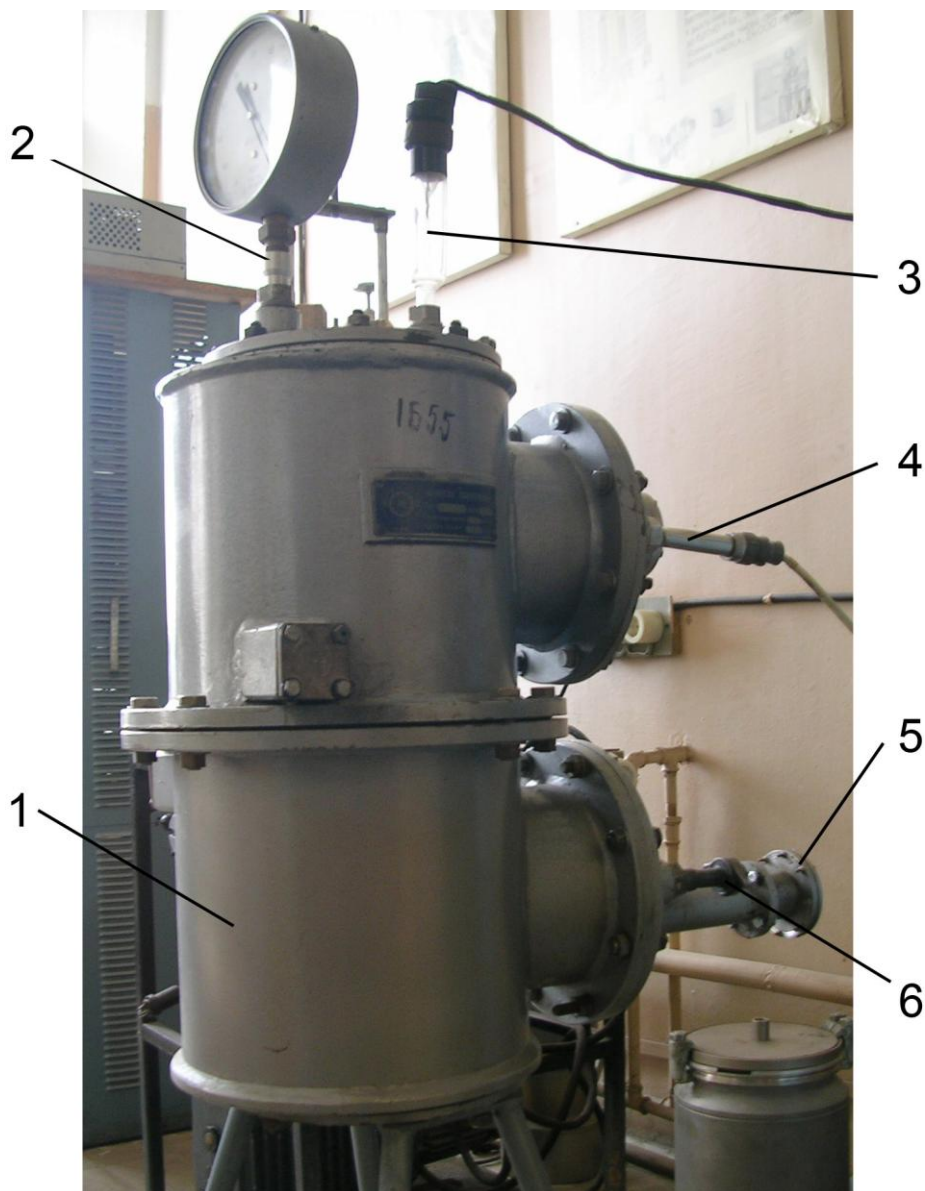


Рис. 4.2. Испытательная установка:

- 1 – измерительная камера; 2 – деформационный манометр;
- 3 – тепловой термопарный манометрический преобразователь;
- 4 – тепловой манометрический преобразователь сопротивления;
- 5 – испытуемый МНН; 6 – натекатель

4, характеристики которых представлены в **табл. 4.1**. Согласно стандарту вакуумметры расположены на расстоянии более половины диаметра измерительной камеры 1 от ее впускного фланца. Для напуска газа измерительная камера 1 снабжена натекателем 6.

Таблица 4.1.

Характеристики вакуумметров, используемых в
испытательной установке

Марка	Тип	Диапазон измерений, Па	Относительная погрешность, %
ВТИ 1218	деформационный манометр	$10^5 \div 3,6 \cdot 10^3$	$\pm 0,6$
PBT-2M	тепловой манометрический преобразователь сопротивления	$3,9 \cdot 10^3 \div 10^1$	$-40 \div +60$
ПМТ-2	тепловой термопарный манометрический преобразователь	$7 \cdot 10^2 \div 10^{-1}$	± 20

В соответствии с формулой (5.17) потребляемая мощность привода испытуемого макетного образца насоса $W \geq 2,3$ Вт, а развиваемое штоком усилие $F_{шт} \geq 385$ Н. Для реализации этих значений в соответствии с [98] обмоткой создается магнитодвижущая сила $\theta = 700$ А.

Установленный в стандарте для определения откачной характеристики и номинальной быстроты действия стационарный метод постоянного давления в данном исследовании применен быть не может. Данный метод требует установления известного потока в измерительную камеру, что может быть сделано только при молекулярном течении газа, при котором проводимость калиброванной коммуникации постоянна и не зависит от давлений по обе ее стороны. Приняв диаметр калиброванного отверстия $d_{калибр} = 0,001$ м, согласно [67] давление перехода течения газа в молеку-

лярный режим оценивается $P_{\text{мол}} = 20$ Па. Диапазон давлений испытуемого МНН ($10^5 \div 10$ Па) соответствует области низкого вакуума, а, следовательно, течение газа в измерительную камеру из любой другой камеры в подавляющем диапазоне давлений будет происходить в вязкостном и вязкостно-молекулярном режимах.

Для определения откачной характеристики и номинальной быстроты действия применен квазистационарный метод постоянного объёма, реализованный в процессе определения предельного остаточного давления на той же испытательной установке (рис. 4.2).

В качестве газа для испытаний использован обычный атмосферный воздух. Эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха $18 \div 23$ °С. Перед сборкой испытательной установки внутренние поверхности измерительной камеры были очищены и обезжирены.

Методика проведения эксперимента при определении предельного остаточного давления, откачной характеристики и номинальной быстроты действия состоит в последовательности действий, приведенной ниже:

- выбор значений давления в измерительной камере, для которых требуется измерить время их достижения в процессе откачки (не менее трех измерений в каждом десятичном диапазоне), с занесением в протокол испытаний (табл. 4.2);
- открытие натекаателя для напуска газа в измерительную камеру до установления в ней атмосферного давления;
- включение, прогрев, обезгаживание и установка рабочих параметров вакуумметров;
- закрытие натекаателя;
- включение испытуемого насоса и запуск секундомера;
- определение по секундомеру времени достижения контрольных значений давления, определяемых по вакуумметрам, с занесением в

протокол испытаний до установления в измерительной камере предельного остаточного давления;

- выключение испытуемого насоса;
- выключение вакуумметров;
- открытие натекаателя для напуска газа в измерительную камеру до установления в ней атмосферного давления;
- закрытие натекаателя.

Предельное остаточное давление считается установленным, если в течение 1 ч давление в измерительной камере меняется в пределах погрешности вакуумметра.

Таблица 4.2.
Протокол испытаний

i	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$P_k, \text{Па}^*$	10^5	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	10^4	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	10^3	$5 \cdot 10^2$	...
$t_1, \text{с}$	0								
$t_2, \text{с}$	0								
...	0								
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	0								
$S_n, \text{м}^3/\text{с}$									

* Обозначения: i – номер контрольной точки измерения;

P_k – давление в измерительной камере;

t_k – время откачки при проведении k -го эксперимента;

$t_{\text{ср}}$ – среднее значение времени откачки;

S_n – быстрота действия испытуемого насоса.

После проведения всех экспериментов рассчитывают средние значения времени достижения контрольных точек давления. Для построения откачной характеристики, пренебрегая сопротивлением впускного фланца измерительной камеры, определяют быстроту действия МНН с занесением в протокол испытаний:

$$S_n^i = \frac{V_0}{t_{\text{ср}}^i - t_{\text{ср}}^{i+1}} \ln \frac{P_{\text{к}}^i}{P_{\text{к}}^{i+1}}, \quad (4.2)$$

где $t_{\text{ср}}^i$ – среднее время достижения $P_{\text{к}}^i$ при откачке;

S_n^i – быстрота действия испытуемого насоса в контрольной точке i .

Откладывая по логарифмической оси абсцисс значения давления в измерительной камере $P_{\text{к}}^i$, а по линейной оси ординат – соответствующие им значения быстроты действия насоса S_n^i , получают откачную характеристику МНН.

Анализируя откачную характеристику, в ней выделяют плоский участок кривой, соответствующий номинальной скорости действия насоса $S_{\text{н}}$, и, используя условие (3.32), определяют наименьшее рабочее давление $P_{\text{мин}}$.

4.2. Результаты экспериментальных исследований

В соответствии с вышеизложенной методикой были проведены экспериментальные исследования конструкции МНН, описанной в разделе 5.3 и обладающей значениями конструктивных и эксплуатационных параметров, указанных в разделе 3.3. По результатам проведенных экспериментов построена зависимость давления в измерительной камере (на впускном патрубке насоса) от времени откачки, представленная на **рис. 4.3**. Точками на нем отмечены средние значения времени достижения кон-

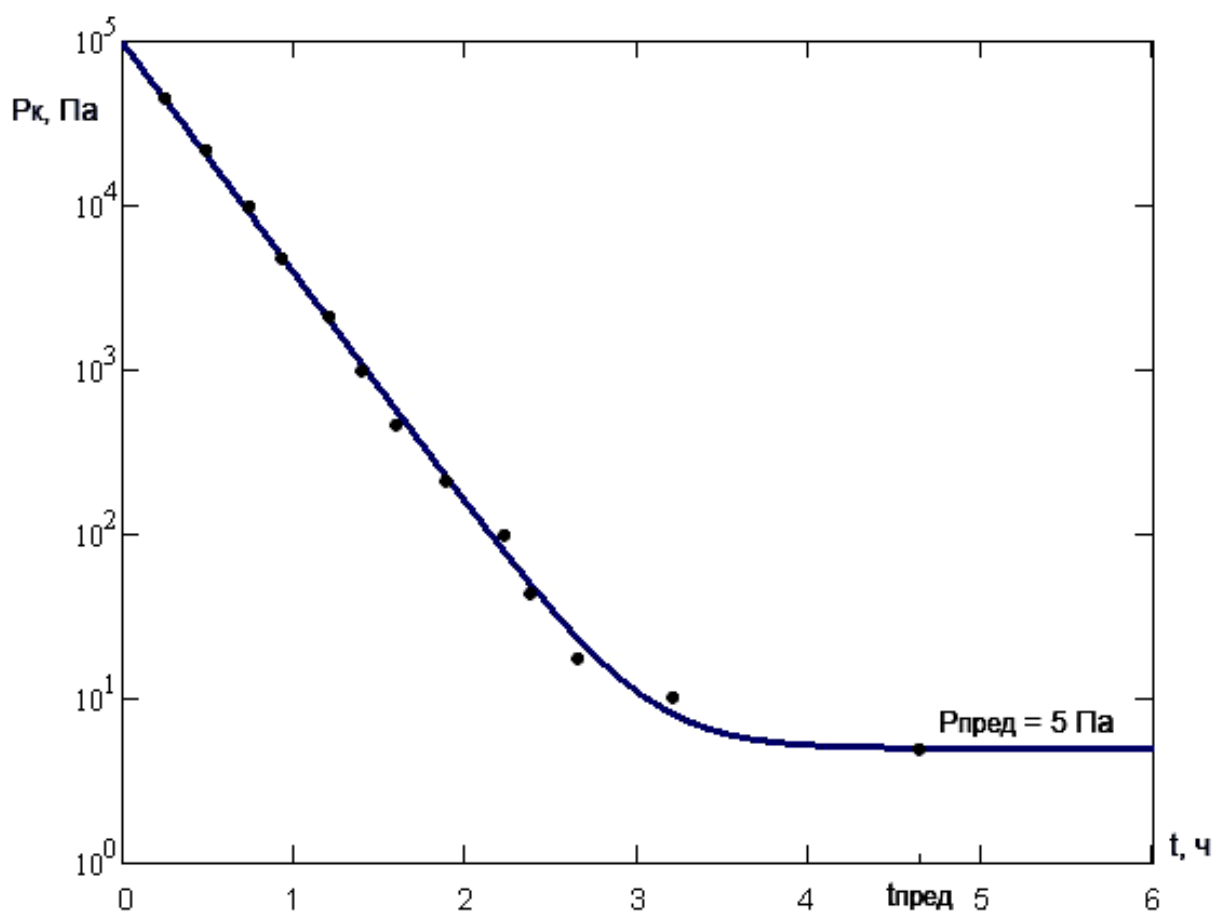


Рис. 4.3. Зависимость давления в измерительной камере испытательной установки P_k (на впускном патрубке насоса) от времени откачки t

трольных значений давления.

Откачка измерительной камеры проводилась в среднем в течение шести часов. По истечении $t_{\text{пред}} = 4,67 \pm 0,05$ ч давление в ней переставало уменьшаться, что свидетельствовало о достижении в камере предельного остаточного давления $P_{\text{пред}} = 5 \pm 1$ Па. Это значение превосходит полученное при моделировании (2 Па) на 150 %, что может являться следствием неточной оценки "мертвых" объемов первой откачной ступени насоса и пренебрежением в математической модели натеканием через соединения.

Обработывая средние значения времени достижения контрольных точек давления в соответствии с формулой (4.2), получены значения быст-

роты действия МНН в контрольных точках, по которым построена откачная характеристика насоса (рис.4.4). Характер построенной кривой соответствует полученной в результате моделирования. Номинальная быстрота действия насоса $S_n = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ не отличается от полученной при моделировании. Используя условие (3.32), по полученной графической зависимости можно оценить наименьшее рабочее давление МНН как $P_{\min} = 10^2 \text{ Па}$, что на 150 % превосходит полученное при моделировании (40 Па).

"Мертвые" объемы и натекание через соединения являются источниками обратного потока газа в первую откачную ступень. В области вы-

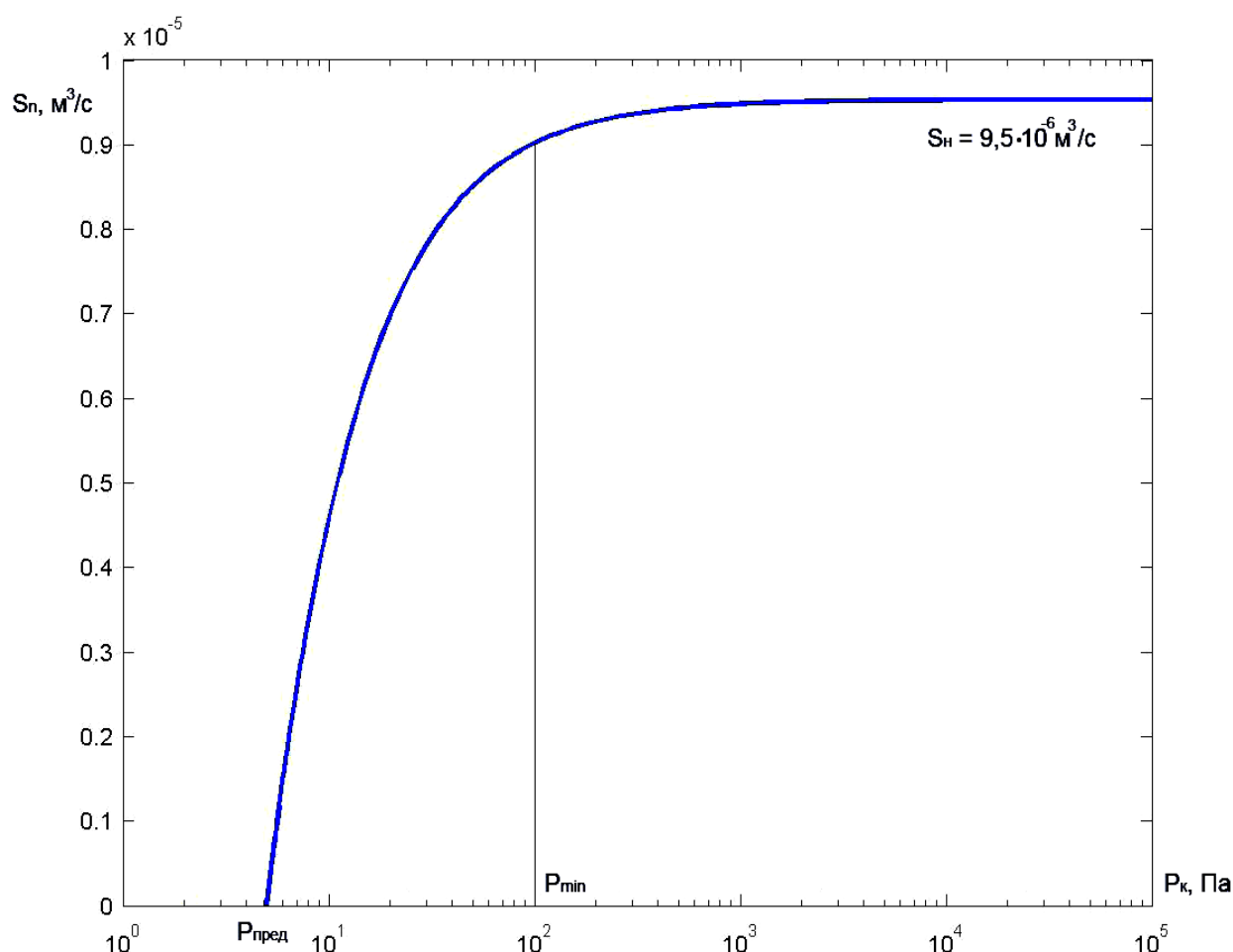


Рис. 4.4. Откачная характеристика МНН: зависимость быстроты действия S_n от давления в измерительной камере испытательной установки P_k

соких давлений обратный поток газа пренебрежимо мал по сравнению с прямым, что позволяет иметь плоский участок откачной характеристики, который соответствует номинальной скорости действия насоса. Таким образом, неточности оценки "мертвых" объемов и пренебрежение в математической модели натеканием через соединения практически не влияют на полученное значение номинальной скорости действия, которая преимущественно зависит от геометрических характеристик первой откачной ступени. Совпадение ее экспериментального значения с теоретическим обусловлено высокой точностью оценки максимального объема первой откачной ступени при моделировании.

Причины расхождения экспериментального значения наименьшего рабочего давления с теоретическим аналогичны причинам в случае с предельным остаточным давлением. По мере снижения давления обратный поток стремится сравняться с прямым. Начиная с некоторого значения давления, принимаемого за минимальное рабочее, потоки становятся сопоставимы, и откачная характеристика круто падает к нулю. Обратный поток серьезно влияет на минимальное рабочее и предельное остаточное давление, что обуславливает столь значительные в процентном соотношении расхождения их экспериментальных значений по сравнению с теми, которые были получены при моделировании. Однако, несмотря на большое относительное расхождение полученных двумя способами результатов, они находятся в рамках одного десятичного диапазона, что позволяет говорить об адекватности построенной математической модели.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что основные показатели качества МНН соответствуют техническим требованиям.

Согласно разработанной конструкции (рисунок 5.3) испытанный макетный образец для снижения шума при работе содержит демпферы. В процессе экспериментальных исследований установлено, что использова-

ние демпферов ощутимо снижает уровень шума, производимый насосом при работе, что говорит о правильности принятого конструктивного решения.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МИНИАТЮРНОГО НИЗКОВАКУУМНОГО НАСОСА

5.1. Методика расчета миниатюрного низковакуумного насоса

Исходными данными для расчета безмасляного мембранного МНН произвольной пространственной ориентации для откачки газовой среды обычного атмосферного состава является техническое задание (ТЗ), представляемое в следующем виде:

диаметр условного прохода D_y , мм $D_y^{ТЗ}$
номинальная быстрота действия по воздуху S_n , см³/с..... не менее $S_n^{ТЗ}$
наименьшее рабочее давление P_{min} , Па..... не более $P_{min}^{ТЗ}$
предельное остаточное давление $P_{пред}$, Па..... не более $P_{пред}^{ТЗ}$
внешний диаметр d , мм не более $d^{ТЗ}$
высота c , мм не более $c^{ТЗ}$
масса m , кг не более $m^{ТЗ}$
потребляемая мощность W , Вт не более $W^{ТЗ}$
атмосферное давление $P_{атм}$, Па $P_{атм}^{ТЗ}$

Символы, обозначенные верхним индексом "тз", представляют собой числовые значения соответствующих параметров, задаваемых в ТЗ.

Методика расчета МНН представляет собой ряд последовательно решаемых задач:

- выбор диаметра условного прохода;
- определение максимального значения объемов откачных ступеней и частоты работы насоса;

- определение геометрических параметров откачных ступеней;
- оценка предельного остаточного давления;
- оценка наименьшего рабочего давления;
- выбор мембраны;
- выбор и расчет привода;
- проверка соответствия массогабаритных характеристик ТЗ;
- расчет и проектирование регулирующих клапанов;
- проверочный расчет.

5.1.1. Выбор диаметра условного прохода

Значение диаметра условного прохода D_y выбирается из рядов нормальных линейных размеров в соответствии с ГОСТ 6636-69 [1].

5.1.2. Определение максимального значения объемов откачных ступеней и частоты работы насоса

Номинальная быстрота действия МНН S_n , как и любого ВН объемного действия, определяется номинальной быстротой действия первой откачной ступени S_I :

$$S_I = \alpha_1 \cdot S_I^r = \alpha_1 \cdot V_1^{\max} \cdot n, \quad (5.1)$$

где α_1 – коэффициент, учитывающий газовыделение первой откачной ступени и обратный поток газа в нее;

S_I^r – геометрическая быстрота действия первой откачной ступени;

$V_1^{\max}$ – максимальное значение объема первой откачной ступени;

n – частота движения рабочего тела (в данном случае – мембраны).

Согласно основному уравнению вакуумной техники сопротивление входного патрубка снижает номинальную быстроту действия насоса по сравнению с номинальной быстротой действия первой откачной ступени:

$$\frac{1}{S_{\text{H}}} = \frac{1}{S_{\text{I}}} + \frac{1}{U_{\text{ВХ}}} , \quad (5.2)$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – проводимость входного патрубка насоса в молекулярном режиме, определяемая в соответствии с диаметром условного прохода D_y , типом и параметрами патрубка по одной из известных формул [67].

Для ограничения влияния проводимости входного патрубка на номинальную быстроту действия насоса значения геометрических параметров его условного прохода должны обеспечивать выполнение неравенства

$$U_{\text{ВХ}} \geq 10 \cdot S_{\text{H}}^{\text{ТЗ}} . \quad (5.3)$$

В соответствии с ТЗ уравнения (5.1-5.2) преобразуется в неравенство

$$V_1^{\text{max}} \cdot n \geq \frac{S_{\text{H}}^{\text{ТЗ}} \cdot U_{\text{ВХ}}}{\alpha_1 \left(U_{\text{ВХ}} - S_{\text{H}}^{\text{ТЗ}} \right)} , \quad (5.4)$$

исходя из которого, задавая $\alpha_1=(0,9\dots0,95)$, произвольно выбираются значения V_1^{max} и n .

Пренебрегая объемом штока, максимальное значение объема второй откачной ступени V_2^{max} полагается равным значению аналогичного параметра для первой (рисунок 3.4):

$$V_2^{\text{max}} = V_1^{\text{max}} . \quad (5.5)$$

5.1.3. Определение геометрических параметров откачных ступеней

Представляя откачные ступени в виде двух усеченных конусов с обращенными друг к другу большими основаниями и изменяющимися во времени высотами (рисунок 3.4), пренебрегая на данном этапе проектирования "мертвыми" объемами, исходя из неравенства

$$\frac{\pi H}{6} (d_6^2 + d_m^2 + d_6 d_m) \geq V_1^{\max}, \quad (5.6)$$

произвольным образом выбираются прогиб мембраны H (высота усеченного конуса), больший d_6 и меньший d_m внутренние диаметры корпусов.

В случае соответствия выбранных параметров условиям ТЗ

$$d_6 \leq 0,9 \cdot d^{\text{ТЗ}}, \quad (5.7)$$

переходят к следующему шагу проектирования. В случае несоответствия выбор по условию (5.6) необходимо провести заново. Если выбор, удовлетворяющий условию (5.7), невозможен – возвращаются к п. 5.1.2 или изменяют ТЗ. Наличие численного коэффициента в неравенстве (5.7) обусловлено конструктивным исполнением МНН.

5.1.4. Оценка предельного остаточного давления

Пренебрегая "мертвыми" объемами, образованными за счет микронеровностей при прилегании мембраны к поверхности корпусов, "мертвые" объемы первой $V_1^{\text{М}}$ и второй $V_2^{\text{М}}$ откачных ступеней можно оценить как

$$V_1^{\text{М}} = V_2^{\text{М}} = (10^{-9} \dots 10^{-8}) \text{ м}^3, \quad (5.8)$$

Эти значения становятся техническими требованиями для эскизного проекта МНН.

Для оценки давления выхлопа второй откачной ступени $P_{II \text{ вхл}}$ необходимо задаться проекцией силы сопротивления выхлопного РК на ось его симметрии $F_{в \text{ кл}}$ и площадью его поверхности, обращенной в атмосферу, $A_{в \text{ кл}}$:

$$P_{II \text{ вхл}} = P_{\text{атм}}^{\text{ТЗ}} + \frac{F_{в \text{ кл}}}{A_{в \text{ кл}}} . \quad (5.9)$$

В качестве силы сопротивления могут выступать сила упругости пружины, сила тяжести, действующая на уплотнительный элемент, и другие силы, препятствующие открыванию клапана. Давление $P_{II \text{ вхл}}$ неизменно как в стационарном, так и нестационарном режимах работы насоса.

Задавшись коэффициентом $\alpha_2=(0,9...0,95)$, учитывающим газовыделение второй откачной ступени и обратный поток газа в нее, предельное остаточное давление второй ступени оценивается по уравнению:

$$P_{II \text{ пред}} = \alpha_2 \frac{V_2^{\text{м}}}{V_2^{\text{max}}} P_{II \text{ вхл}} . \quad (5.10)$$

Поскольку в качестве перепускного клапана используется управляемый РК, структурно-конструктивная схема которого синтезирована в главе 2, давление выхлопа первой откачной ступени в стационарном режиме $P_{I \text{ вхл}}$ равно предельному остаточному давлению второй:

$$P_{I \text{ вхл}} = P_{II \text{ пред}} . \quad (5.11)$$

В строгом понимании определяемый формулой (5.11) параметр является давлением газа, содержащегося в "мертвом" объеме первой откачной ступени в момент ее полного сжатия. Однако, в вакуумных насосах объем-

ного действия, в которых традиционно используются неуправляемые РК, этот параметр приобретает также смысл давления выхлопа.

Предельное остаточное давление МНН $P_{\text{пред}}$ определяется предельным остаточным давлением первой откачной ступени $P_{\text{Iпред}}$ и оценивается по формуле:

$$P_{\text{пред}} = P_{\text{Iпред}} = \alpha_1 \frac{V_1^{\text{м}}}{V_1^{\text{max}}} P_{\text{Iвхл}} . \quad (5.12)$$

В случае соответствия оценочного значения ТЗ:

$$P_{\text{пред}} \leq P_{\text{пред}}^{\text{ТЗ}} , \quad (5.13)$$

переходят к следующему пункту методики. В случае несоответствия необходимо пересмотреть оценку "мертвых" объемов откачных ступеней (5.8). Если пересмотр невозможен, возвращаются к п. 5.1.2 или изменяют ТЗ.

5.1.5. Оценка наименьшего рабочего давления

Качественное определение наименьшего рабочего давления дано в учебнике [66], однако количественное определение в литературе отсутствует. Исходя из практического опыта, можно полагать, что давление в первой откачной ступени является наименьшим рабочим в момент времени, когда прямой поток газа в первой ступени $Q_{\text{Iп}}$ становится на порядок большим по сравнению с обратным в ней $Q_{\text{Iоб}}$:

$$Q_{\text{Iп}} = 10 \cdot Q_{\text{Iоб}} . \quad (5.14)$$

Преобразуя уравнение (5.14), наименьшее рабочее давление опреде-

ляется из уравнения

$$P_{\min} = 10 \cdot \alpha_1 \frac{V_1^{\text{м}}}{V_1^{\text{max}}} P_{\text{I вхл}} = 10 \cdot P_{\text{пред}} . \quad (5.15)$$

В случае соответствия оценочного значения ТЗ

$$P_{\min} \leq P_{\min}^{\text{ТЗ}} , \quad (5.16)$$

переходят к следующему пункту методики. В случае несоответствия необходимо пересмотреть оценку "мертвых" объемов откачных ступеней (5.8). Если пересмотр невозможен, возвращаются к п. 5.1.2 или изменяют ТЗ.

5.1.6. Выбор мембраны

Используя определенные геометрические параметры откачных ступеней – больший внутренний диаметр корпусов d_6 и прогиб мембраны H , из каталогов выбирается металлическая мембрана с соответствующими диаметром и прогибом. В случае если в результате не выбран ни один вариант возвращаются к п. 5.1.3, 5.1.2 или изменяют ТЗ.

5.1.7. Выбор и расчет привода

Исходными данными для выбора и расчета привода являются частота движения мембраны n , прогиб мембраны H и усилие прогиба $F_{\text{пр}}$, известное из п. 5.1.6. Выбор проводится по одной из известных методик выбора вида технического объекта [51, 52].

Требуемая потребляемая мощность W не должна превосходить значение, установленное ТЗ:

$$W^{ТЗ} \geq W \geq 2 \cdot H \cdot n \left(P_{\text{атм}} \frac{\pi d_6^2}{4} + F_{\text{пр}} \right). \quad (5.17)$$

В случае выполнения неравенства (5.17) проводят расчет выбранного вида привода по соответствующим методикам, в противном случае возвращаются к п. 5.1.6, 5.1.3, 5.1.2 или изменяют ТЗ.

Линейные размеры рассчитанного привода $a_{\text{п}}$ и $b_{\text{п}}$, оси которых перпендикулярны оси симметрии рабочей камеры МНН, не должны превосходить внешний диаметр, установленный в ТЗ:

$$a_{\text{п}} \leq d^{ТЗ}, \quad (5.18)$$

$$b_{\text{п}} \leq d^{ТЗ}. \quad (5.19)$$

В случае выполнения неравенств (5.18-5.19) переходят к следующему пункту методики, в противном случае выбор вида привода проводится заново. Если ни один из существующих видов по результатам расчета не в состоянии обеспечить условия (5.18-5.19) возвращаются к п. 5.1.3, 5.1.2 или изменяют ТЗ.

5.1.8. Проверка соответствия массогабаритных характеристик техническому заданию

По результатам определения геометрических параметров откачных ступеней (п. 5.1.3) и расчета привода (п. 5.1.7) оценивается масса m и высота c с МНН. Оба параметра проверяются на соответствие ТЗ:

$$m \leq m^{ТЗ}, \quad (5.20)$$

$$c = c_{\text{п}} + 10 \cdot H \leq c^{ТЗ}, \quad (5.21)$$

где $c_{\text{п}}$ – линейный размер привода, ось которого параллельна оси симметрии рабочей камеры МНН.

Наличие численного коэффициента в неравенстве (5.21) обусловлено конструктивным исполнением МНН.

В случае выполнения неравенств (5.20-5.21) переходят к следующему пункту методики, в противном случае заново определяют геометрические параметры откачных ступеней (п. 5.1.3) или выбирают другой вид привода (п. 5.1.7). Если это не приносит результата, возвращаются к п. 5.1.2 или изменяют ТЗ.

5.1.9. Расчет и проектирование регулирующих клапанов

Разработанная конструкция (раздел 5.3) содержит управляемые РК – впускной и перепускной. Их расчет осуществляется в соответствии с методикой, представленной в разделе 5.2.

Выхлопные клапаны представляют собой неуправляемые РК. Для ограничения влияния проводимости каждого из них U_{23} , определяемой по одному из уравнений из [67], на номинальную быстроту действия насоса значения геометрических параметров их условных проходов должны обеспечивать выполнение неравенства

$$T_{\text{кл3}} \cdot U_{23} \geq 10 \cdot S_{\text{II}} = 10 \cdot \alpha_1 \cdot S_{\text{II}}^{\Gamma} = 10 \cdot \alpha_1 \cdot V_{\text{II}}^{\text{max}} \cdot n, \quad (5.22)$$

где $T_{\text{кл3}}$ – количество выхлопных РК;

S_{II} – номинальная быстрота действия второй откачной ступени;

S_{II}^{Γ} – геометрическая быстрота действия второй откачной ступени.

5.1.10. Проверочный расчет

Поскольку, оценка "мертвых" объемов (5.8) носит грубый характер, после разработки эскизного проекта, в соответствии с п. 5.1.4 и 5.1.5 определяют предельное остаточное и наименьшее рабочее давления. Если они удовлетворяют ТЗ в соответствии с условиями (5.13) и (5.16), переходят к экспериментальным исследованиям. В противном случае ищут конструктивные возможности уменьшения "мертвых" объемов, или, если это не приносит результата, расчет проводят заново, начиная с п. 5.1.2 и используя значения "мертвых" объемов в соответствии с эскизным проектом.

5.2. Расчет регулирующих клапанов

Исходными данными для расчета впускного (ВРК) и перепускного (ПРК) регулирующих клапанов являются значения параметров МНН, определенные в п. 5.1.1-5.1.8 созданной методики проектирования: диаметр условного прохода D_y ; меньший d_m внутренний диаметр корпусов; максимальные значения объемов первой $V_1^{\max}$ откачной ступени; коэффициент, учитывающий газовыделение первой ступени и обратный поток газа в нее α_1 ; частота движения мембраны n ; наименьшее рабочее давление $P_{\min}$.

На рис. 5.1 представлена структурно-конструктивная схема РК с указанием его геометрических характеристик, используемых в расчете. Для удобства расчета ярмо разделено непосредственно на ярмо и базу. Разделение магнитопровода на сердечник, ярмо и базу показано пунктирной линией.

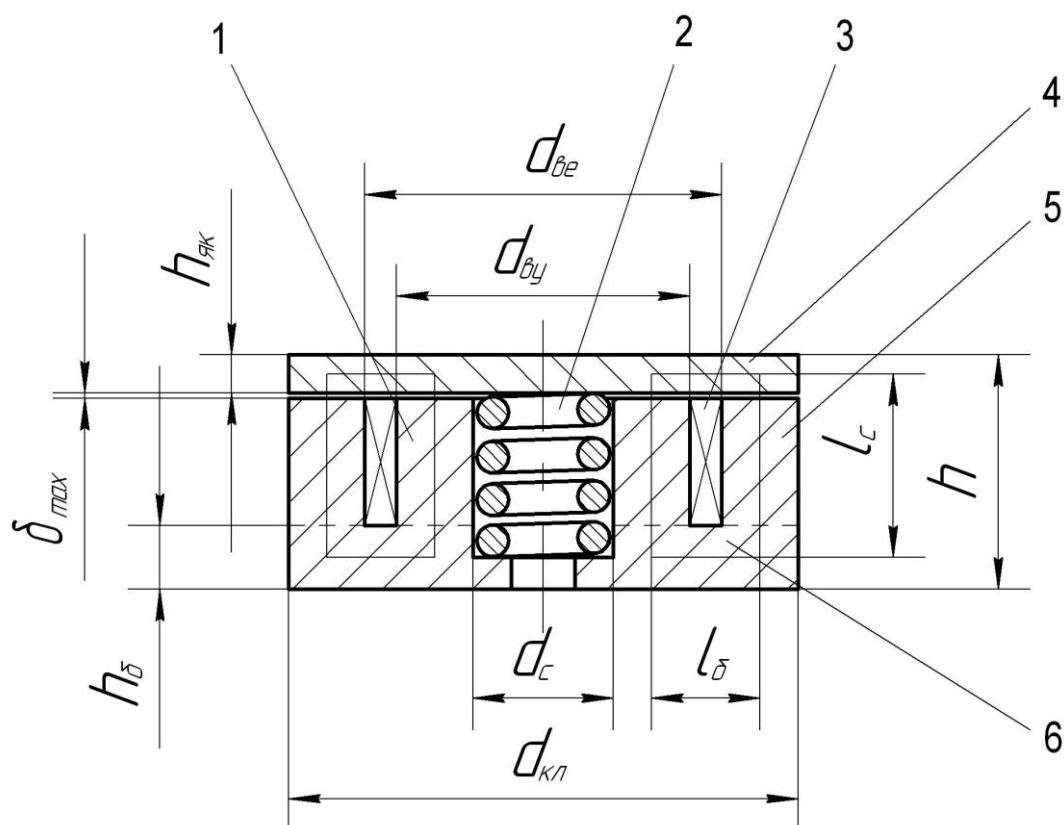


Рис. 5.1. К расчету регулирующих клапанов:

- 1 – сердечник; 2 – пружина; 3 – обмотка; 4 – якорь;
5 – ярмо; 6 – база

5.2.1. Расчет впускного клапана

Диаметр условного прохода ВРК $D_y^{\text{кл}}$ (внутренний диаметр седла d_c) выбирается не меньшим, чем диаметр условного прохода МНН D_y :

$$D_y^{\text{кл}} = d_c \geq D_y . \quad (5.23)$$

Внешний диаметр ВРК $d_{\text{кл}}$ должен укладываться в меньший внутренний диаметр корпуса насоса d_m :

$$d_{\text{кл}} \leq d_m . \quad (5.24)$$

Для того чтобы не ограничивать номинальную быстроту действия первой откачной ступени S_1 , проводимость ВРК $U_{кл}$ при достижении в первой откачной ступени наименьшего рабочего давления $P_{\min}$ должна превосходить ее минимум на порядок:

$$U_{кл} \geq 10 \cdot S_1 = 10 \cdot \alpha_1 \cdot V_1^{\max} \cdot n . \quad (5.25)$$

В соответствии с уравнением определения проводимости кольцевой щели в вязкостном режиме величина высоты рабочего зазора в полностью открытом положении клапана

$$\delta_{\max} \geq \sqrt[3]{\frac{U_{кл}}{2.89 \cdot 10^4 \cdot P_{\min}} \ln \left(\frac{d_c}{d_{кл}} \right)} , \quad (5.26)$$

где значения всех переменных берутся в единицах СИ.

Для определения основных геометрических параметров ВРК необходимо задаться внутренним $d_{\text{вн}}$ и внешним $d_{\text{вс}}$ диаметрами канавки под обмотку:

$$d_c < d_{\text{вн}} < d_{\text{вс}} < d_{кл} . \quad (5.27)$$

Площади малого S_1 и большого S_2 полюсов:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot (d_{\text{вс}}^2 - d_c^2)}{4} ,$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot (d_{кл}^2 - d_{\text{вн}}^2)}{4} . \quad (5.28)$$

Задавая длины магнитных трактов сердечника l_c и ярма $l_{\text{яр}}$

$$l_c = l_{\text{яр}} = (0,2 \dots 0,5) d_{кл} , \quad (5.29)$$

толщины базы $h_{\text{б}}$ и якоря $h_{\text{як}}$

$$h_{\text{б}} = (0,4 \dots 0,6)(d_{\text{кл}} - d_{\text{ве}}) , \quad (5.30)$$

$$h_{\text{як}} = (0,1 \dots 0,5) \text{ мм} , \quad (5.31)$$

вычисляя длины магнитных трактов базы $l_{\text{б}}$ и якоря $l_{\text{як}}$

$$l_{\text{б}} = l_{\text{як}} = 0,25(d_{\text{кл}} + d_{\text{вы}} - d_{\text{ве}} - d_{\text{с}}) , \quad (5.32)$$

минимальные значения площадей сечения базы $S_{\text{б}}$ и якоря $S_{\text{як}}$

$$S_{\text{б}} = 0,5\pi(d_{\text{ве}} - d_{\text{с}})h_{\text{б}} , \quad (5.33)$$

$$S_{\text{як}} = 0,5\pi(d_{\text{ве}} - d_{\text{с}})h_{\text{як}} , \quad (5.34)$$

определяются геометрические параметры ВРК, необходимые для расчета магнитной цепи.

Высота ВРК при этом определяется согласно уравнению

$$h = l_{\text{с}} + 0,5(h_{\text{б}} + h_{\text{як}}) . \quad (5.35)$$

Внешний диаметр пружины $d_{\text{пр}}$ выбирается по каталогам согласно условию

$$d_{\text{пр}} < d_{\text{с}} . \quad (5.36)$$

Полученные геометрические параметры условного прохода ВРК $d_{\text{с}}$ и $l_{\text{с}}$ в соответствии с [67] проверяются на обеспечение проводимости клапана:

$$U_{\text{уп}} \geq U_{\text{кл}} , \quad (5.37)$$

где $U_{\text{уп}}$ – проводимость условного прохода ВРК.

В случае невыполнения условия (5.37) пересматривают выбор по неравенствам (5.27, 5.29). В случае если это не приносит положительного результата, возвращаются к расчету МНН (п. 5.1.2).

Характеристика противодействующих сил клапана определяется тремя составляющими – силой упругости пружины клапана $F_{\text{упр}}$, силой тяжести якоря $F_{\text{т}}$ и усилием герметизации $F_{\text{герм}}$:

$$F_{\text{упр}}(\delta) = k_{\text{пр}}(\delta_{\text{max}} - \delta), \quad (5.38)$$

где δ – текущее значение высоты рабочих зазоров, $k_{\text{пр}}$ – жесткость выбранной пружины;

$$F_{\text{т}} = g \cdot m_{\text{як}}, \quad (5.39)$$

где g – ускорения свободного падения, $m_{\text{як}}$ – масса якоря

$$m_{\text{як}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{кл}}^2}{4} h_{\text{як}} \rho, \quad (5.40)$$

где ρ – плотность материала якоря (на данном этапе расчета может быть взята для любого магнитомягкого материала);

$$F_{\text{герм}} = q \cdot S_1, \quad (5.41)$$

где q – удельное усилие герметизации

$$q = 10^3 \text{ Н/м}^2. \quad (5.42)$$

Характеристика противодействующих сил $F_n(\delta)$ задается в виде закона

$$F_n(\delta) = \begin{cases} F_{\text{упр}}(\delta) + F_{\text{т}} + F_{\text{герм}}, & \text{если } \delta = 0 \\ F_{\text{упр}}(\delta) + F_{\text{т}}, & \text{если } \delta \neq 0 \end{cases}. \quad (5.43)$$

Задавая коэффициент запаса по силе $k_z = (1,5 \dots 2)$, формируют тяговую характеристику $F_e(\delta)$, превосходящую характеристику противодействующих сил во всем диапазоне значений высоты рабочих зазоров:

$$F_e(\delta) \geq k_3 F_n(0) - \frac{F_n(0)}{\delta_{\max}} \delta . \quad (5.44)$$

Пренебрегая магнитными потоками утечки, для расчета магнитных цепей клапана используется схема замещения (рис. 5.2), представляющая собой один замкнутый контур, содержащих магнитодвижущую силу обмотки θ , постоянные магнитные сопротивления сердечника R_c , якоря $R_{як}$, ярма $R_{яр}$, базы $R_{б}$, переменные магнитные сопротивления двух рабочих зазоров $R_{з1}$ и $R_{з2}$.

Геометрия полюсов определяет магнитные проводимости малого $G_1(\delta)$ и большого $G_2(\delta)$ рабочих воздушных зазоров:

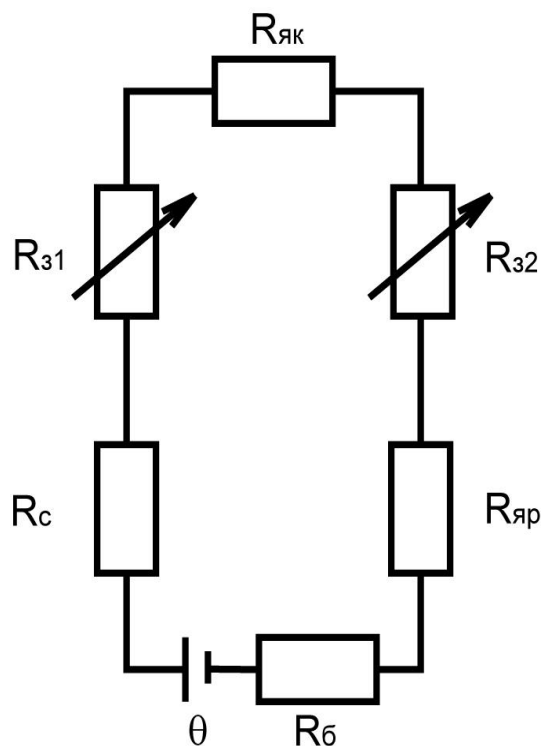


Рис. 5.2. Схема замещения магнитной цепи РК

$$G_1(\delta) = \mu_0 \frac{S_1}{\delta} ,$$

$$G_2(\delta) = \mu_0 \frac{S_2}{\delta}, \quad (5.45)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Исходя из того, что тяговая характеристика складывается из сил притяжения, возникающих в обоих рабочих зазорах, требуемое падение магнитодвижущей силы на малом $\theta_{\delta 1}$ и большом $\theta_{\delta 2}$ рабочих зазорах определяется следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \theta_{\delta 1}(\delta) &\geq \sqrt{\frac{2 \cdot \delta^2 F_e(\delta) S_2}{\mu_0 S_1 (S_1 + S_2)}}, \\ \theta_{\delta 2}(\delta) &\geq \sqrt{\frac{2 \cdot \delta^2 F_e(\delta) S_1}{\mu_0 S_2 (S_1 + S_2)}}. \end{aligned} \quad (5.46)$$

Домножая требуемые падения магнитодвижущей силы (5.46) на проводимости соответственных рабочих зазоров (5.45), получают ограничение на зависимость магнитного потока в магнитопроводе от высоты рабочих зазоров:

$$\Phi(\delta) \geq \theta_{\delta 1}(\delta) \cdot G_1(\delta). \quad (5.47)$$

Для определения требуемых зависимостей магнитной индукции малого $B_{\delta 1}(\delta)$ и большого $B_{\delta 2}(\delta)$ рабочих зазоров, сердечника $B_c(\delta)$, ярма $B_{яр}(\delta)$, якоря $B_{як}(\delta)$ и базы $B_6(\delta)$ от высоты рабочих зазоров необходимо разделить магнитный поток (5.47) на площади сечений соответствующих участков:

$$B_{\delta 1}(\delta) \geq \frac{\Phi(\delta)}{S_1},$$

$$\begin{aligned}
B_{\delta 2}(\delta) &\geq \frac{\Phi(\delta)}{S_2}, \\
B_c(\delta) &\geq \frac{\Phi(\delta)}{S_1}, \\
B_{\text{яр}}(\delta) &\geq \frac{\Phi(\delta)}{S_2}, \\
B_{\text{як}}(\delta) &\geq \frac{\Phi(\delta)}{S_{\text{як}}}, \\
B_{\bar{6}}(\delta) &\geq \frac{\Phi(\delta)}{S_{\bar{6}}}.
\end{aligned} \tag{5.48}$$

Вычисляя требуемые максимальные значения магнитной индукции для всех участков цепи $B_c(0)$, $B_{\text{яр}}(0)$, $B_{\text{як}}(0)$, $B_{\bar{6}}(0)$ (5.47), для выбранного материала элементов магнитопровода по кривой намагничивания [98] определяются требуемые максимальные значения напряженности магнитного поля сердечника $H_c(0)$, ярма $H_{\text{яр}}(0)$, якоря $H_{\text{як}}(0)$ и базы $H_{\bar{6}}(0)$.

Согласно второму закону Кирхгофа для замкнутого контура магнитной цепи зависимость магнитодвижущей силы катушки от высоты рабочих зазоров $\theta(\delta)$ складывается как сумма ее падений на всех участках цепи:

$$\theta(\delta) \geq \theta_{\delta 1}(\delta) + \theta_{\delta 2}(\delta) + H_c(0) \cdot l_c + H_{\text{яр}}(0) \cdot l_{\text{яр}} + H_{\text{як}}(0) \cdot l_{\text{як}} + H_{\bar{6}}(0) \cdot l_{\bar{6}}.$$

Значение магнитодвижущей силы выбираемой катушки θ_k должно быть не менее требуемого значения при полностью поднятом якоре:

$$\theta_k \geq \theta(\delta_{\max}), \tag{5.50}$$

Расчет обмоточных данных и времени срабатывания, тепловой расчет проводятся по известным методикам [97, 98]. Если в результате их проведения выявляется отсутствие геометрической возможности навивки катушки, превышение ее мощности максимально допустимого значения или сопоставимость времени срабатывания и длительности такта работы МНН, расчет проводят заново, пересматривая выбор по условиям (5.27, 5.29, 5.31). В случае если это не приносит положительного результата, возвращаются к расчету МНН (п. 5.1.2).

5.2.2. Расчет перепускного клапана

Для расчета ПРК пользуются вышеизложенной методикой для ВРК с приведенными ниже коррективами. Диаметр условного прохода ПРК $D_y^{\text{кл}}$ (внутренний диаметр седла d_c) выбирается из конструктивных соображений. Внешний диаметр ПРК $d_{\text{кл}}$ должен укладываться менее чем в половину внутреннего диаметра корпуса насоса d_m :

$$d_{\text{кл}} \leq 0,4d_m . \quad (5.51)$$

Поскольку разработанная конструкция (раздел 5.3) предполагает наличие нескольких перепускных клапанов, работающих параллельно, проводимость ПРК $U_{\text{кл}}$ при достижении в первой откачной ступени наименьшего рабочего давления P_{min} :

$$U_{\text{кл}} \geq \frac{10}{T_{\text{кл}2}} \cdot S_1 = \frac{10}{T_{\text{кл}2}} \cdot \alpha_1 \cdot V_1^{\text{max}} \cdot n , \quad (5.52)$$

где $T_{\text{кл}2}$ – количество перепускных клапанов.

5.3. Конструкция миниатюрного

низковакуумного насоса

На основе синтезированных структурно-конструктивных схем МНН (рис. 2.9, а) и его РК (рис. 2.14), используя предложенные выше методики их проектирования и расчета, разработана конструкция рабочей камеры МНН, сборочный чертеж которой представлен на рис. 5.3.

Рабочая камера насоса образована верхним (1) и нижним (11) корпусами, скрепленными шестью болтовыми соединениями (21, 22, 23). Рабочим телом насоса является мембрана, состоящая из металлического диска с прорезями (3) и резиновых мембран (2, 4), с обеих сторон покрывающих диск. Наличие металлической основы в мембране позволяет избежать ее неконтролируемой деформации при сжатии газа и гарантирует выполнение закона ее движения. Упругая деформация диска без прохлопывания обеспечивается наличием в нем прорезей. Для исключения объема прорезей из числа "мертвых" объемов и более плотного прилегания мембраны к поверхности корпусов с обеих сторон диска расположены резиновые мембраны. Помимо этого периферийная часть мембраны выполняет функцию уплотнения в месте соединения корпусов (1, 11), а центральная – в месте соединения тарелки (9) и штока-тарелки (8). Для крепления своих центральных частей резиновые мембраны (2, 4) и металлический диск (3) зажаты между шток-тарелкой (8) и навинченной на нее тарелкой (9). При деформации мембраны происходит упругое растяжение резиновых мембран, между которыми перемещается центральная часть диска.

Управление газовыми потоками осуществляется впускным (7), двумя перепускными (10) и выхлопным (19) РК. Поскольку при сжатии откачной

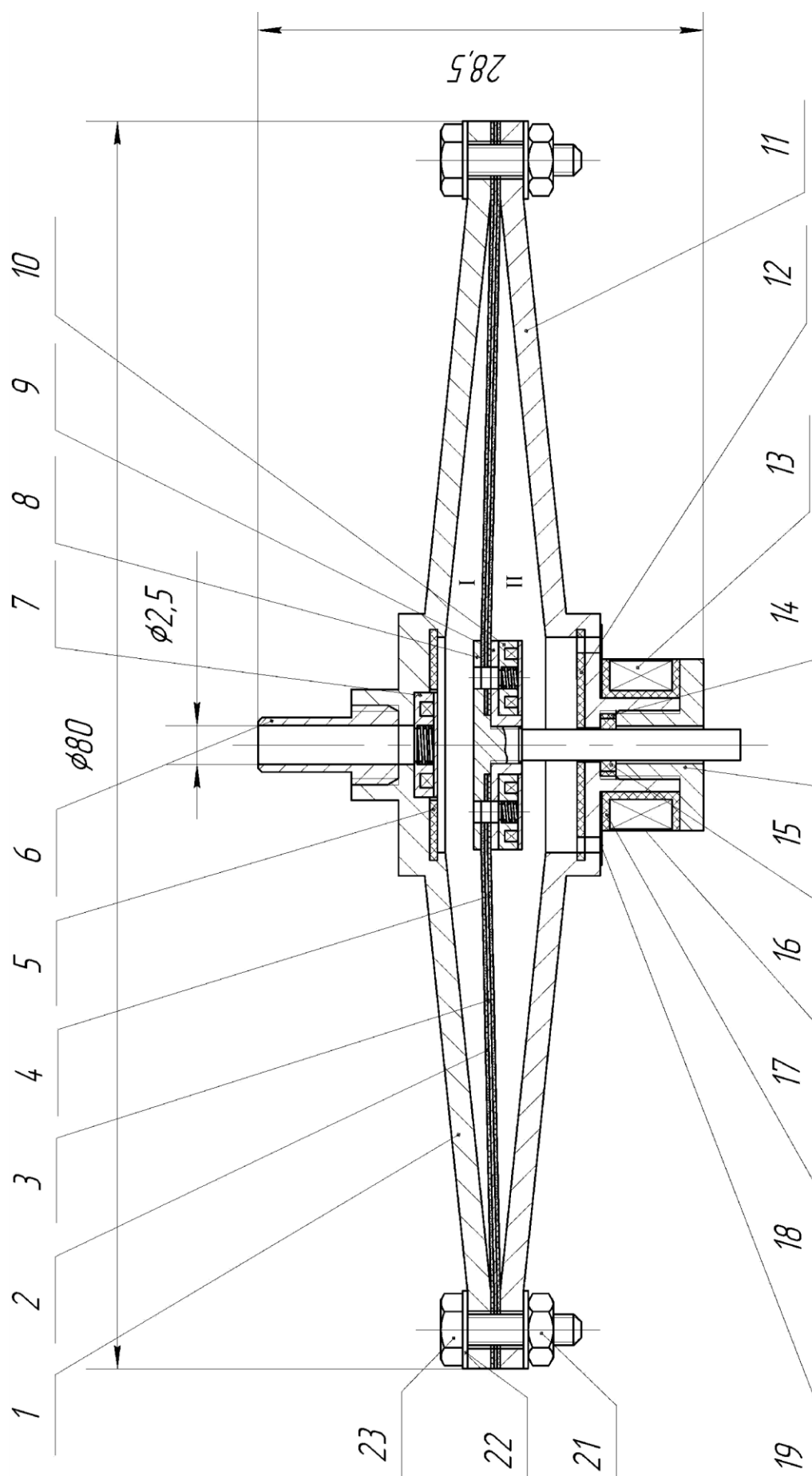


Рис. 5.3. Сборочный чертеж рабочей камеры МНН: 1, 11 – корпуса; 2, 4 – мембраны резиновые; 3 – диск; 5, 12 – демпферы; 6 – впускной патрубок; 7 – впускной РК; 8 – шток-тарелка; 9 – тарелка; 10 – перепускной РК; 13 – обмотка; 14 – кольцо резиновое; 15 – винт-фиксатор; 16 – уплотнение фторопластовое; 17 – изоляция; 18 – каркас; 19 – мембрана резиновая; 20 – гайка; 21 – шайба; 22 – винт; I, II – первая и вторая откачные ступени соответственно

ступени поток газа направлен в сторону торцевой поверхности корпуса, впускной (7) и выхлопной (19) РК расположены на торцевых поверхностях верхнего и нижнего корпусов соответственно. Расположение этих клапанов на конических поверхностях корпусов привело бы к тому, что по мере прилегания мембраны к поверхности корпуса их проводимость постоянно уменьшалась бы, ограничивая быстроту действия насоса.

Значение давления выхлопа насоса всегда несколько больше атмосферного, что позволяет удаляемому из второй откачной ступени газу преодолевать силу сопротивления выхлопного РК вплоть до выхода на стационарный режим работы. Исходя из этого и конструктивных соображений, выхлопной РК (19) является неуправляемым и представляет собой тонкую резиновую мембрану.

В отличие от выхлопного РК (19) открытие впускного (7) и перепускных (10) РК осуществляется при различном давлении газа, уменьшающемся от цикла к циклу до значения давления выхлопа, обусловленного силами сопротивления клапана. Во избежание ограничения предельного остаточного давления вследствие этого и недостатков неуправляемых РК, приведенных в разделе 2.3, в соответствии с разработанной структурной схемой (рис. 2.14), впускной (7) и перепускные (10) клапаны представляют собой управляемые РК.

Для соблюдения симметрии и повышения общей проводимости между откачными ступенями конструкция содержит два перепускных РК (10). В конструкциях МНН больших типоразмеров возможно наличие их большего количества. Перепускные РК (10) впрессованы в тарелку (9), в которой под них профрезерованы посадочные места. Впускной РК (7) аналогичным способом впрессован в верхний корпус (1). Пространственная ориентация впускного и перепускных РК обусловлена необходимостью обеспечения радиального направления потока газа в них.

Вывод обмоток катушек перепускных РК (10) к системе автоматического управления осуществляется через прорези в диске (3), впускного (7) – через впускной патрубок (6). На чертеже не показано.

Резиновая мембрана (19) прижата к корпусу (11) винтом-фиксатором (15) опосредовано через электромагнит, который состоит из каркаса (18) и намотанной в нем обмотки (13), обернутой снаружи изоляцией (17). Электромагнит своим каркасом (18) насажен на корпус (11) и прижат к нему винтом-фиксатором (15).

Ввод возвратно-поступательного движения штока-тарелки (8) в рабочую камеру насоса уплотнен фторопластовым уплотнением (16), которое прижато к корпусу (11) винтом-фиксатором (15). Во избежание растекания уплотнения (16) в зазоре между корпусом (11) и винтом-фиксатором (15) оно поджато резиновым кольцом (14), вставленным в корпус (11).

Для снижения уровня шума при эксплуатации насоса и более плотного прилегания штока-тарелки (8) к верхнему корпусу (1) в последний вставлен демпфер (5). Наличие зазора между ним и цилиндрической поверхностью впускного клапана (7) обусловлено необходимостью обеспечения при поднятии якоря впускного клапана (7) достаточной проводимости между его трактом и первой откачной ступенью. С этой же целью конструкция насоса содержит демпфер (12).

Всасывание газа осуществляется через впускной патрубок (6), ввинчиваемый в верхний корпус (1). Присоединение МНН к вакуумной системе осуществляется при помощи гибкой коммуникации, надеваемой на впускной патрубок (6), для чего он на краю имеет фаску.

ГЛАВА 6. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ МИНИАТЮРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Рассмотрим в этой главе некоторые конструкции вакуумных насосов, обладающих более высоким быстродействием и разрежением при минимизации их массы и габаритных размеров в ущерб другим эксплуатационным характеристикам. Данные конструкции, не смотря на свою специфичность, и возможно благодаря ей, во многих случаях успешно находят своё применение.

6.1. Вакуумный насос на мембране с прощёлкиванием

Насосы с металлической мембраной имеют существенный недостаток, вызванный малым ходом мембраны и соответственно малыми рабочими объёмами. Это устраняется применением мембран с прощёлкиванием.

Повышение количества циклов работы мембраны, увеличение её хода и снижение натекания через мембрану достигается её переменной толщиной в радиальном направлении [114].

Рассмотрим мембранный двухступенчатый вакуумный насос с металлической мембраной с прощёлкиванием [115, 116] представлен на рис. 6.1. Насос создан в трёх вариантах: с принудительно открываемым впускным клапаном; с принудительно открываемыми впускным и промежуточными клапанами; и с принудительно открываемыми впускным промежуточным и выпускным клапанами (см. рис. 6.1). Данные конструкции рассчита-

ны на скорость колебания мембраны 10÷50 Гц. Быстродействие такого типа насосов определяется частотой колебания мембраны и величиной паразитных объёмов, которая у предложенных конструкций минимальна.

В данной конструкции это достигается единым циклом изготовления корпуса и мембраны, что значительно упрощает и удешевляет изготовление насоса и одновременно значительно улучшает его характеристики. Так профили мембраны 1 и впускной части корпуса 2 соответствующим образом рассчитываются. Мембрана шлифуется для создания неоднородной толщины по радиусу. Создание профиля мембраны 1 и впускной части корпуса 2, производится их совместной штамповкой, что обеспечивает довольно точное прилегание мембраны к корпусу [117].

Насос работает следующим образом:

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении.

На обмотку привода 3 впускного клапана подаётся напряжение определённой полярности. По обмотке протекает ток и создаётся электромагнитное поле, концентрируемое якорем 4 впускного клапана. Под его действием якорь 5 промежуточного клапана давит на мембрану 6 промежуточного клапана и промежуточный клапан закрывается, за его герметизацию отвечает уплотнитель 7.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении.

На обмотку привода 3 впускного клапана подаётся более высокое напряжение той же полярности. Под действием якоря 8 впускного клапана, данный клапан открывается, также передавая усилие на якорь 5 промежуточного клапана. Мембрана насоса 1 прощелкивает, занимая нижнее положение.

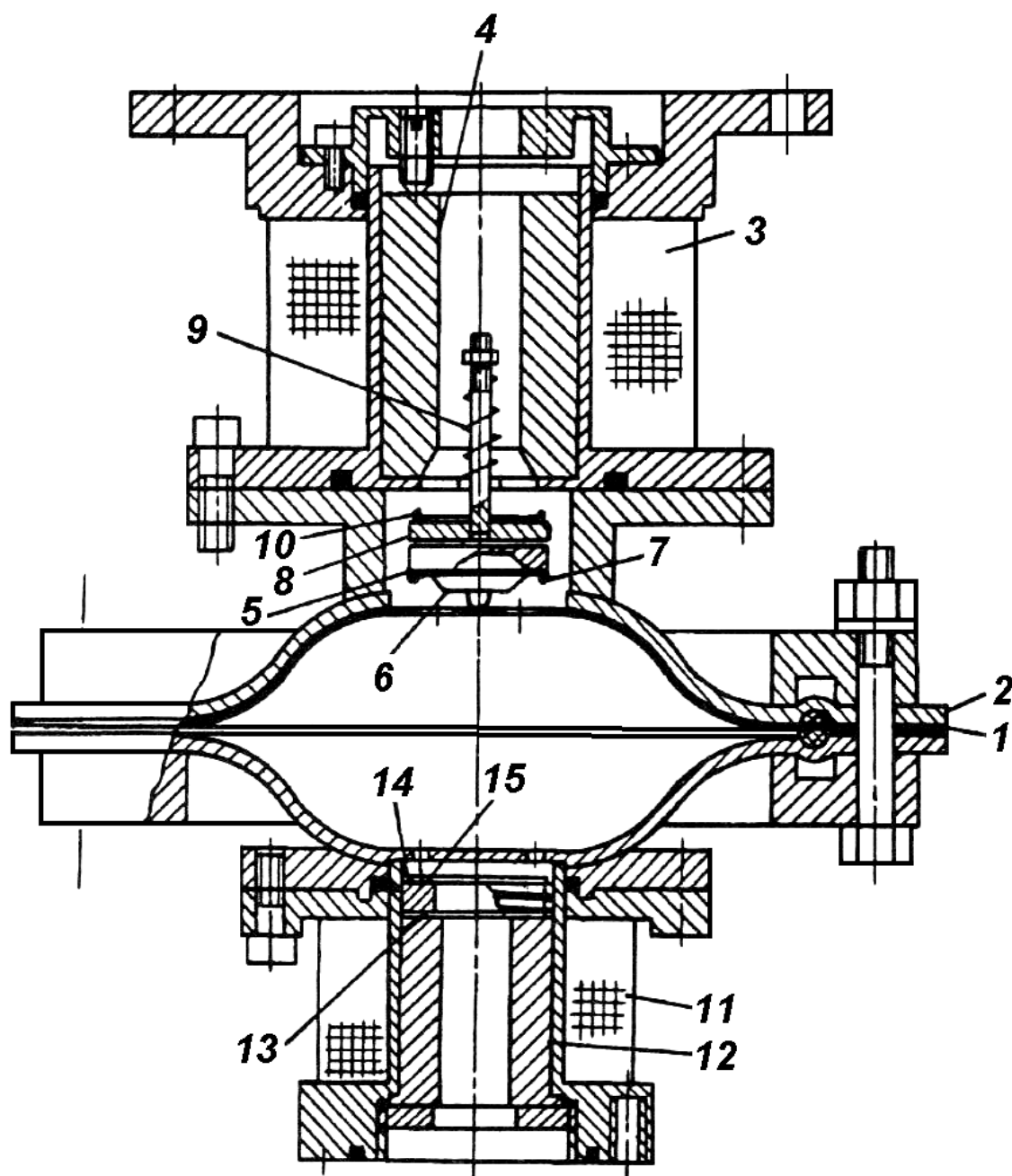


Рис. 6.1. Двухступенчатого насоса с металлической мембраной.

Вариант с принудительным открытием впускного
 выпускного и промежуточного клапанов
 (Рабочая часть мембраны 1 и корпуса насоса 2 и 3
 показана в сжатом в два раза по радиальному к мембране
 направлению)

Впускной клапан открыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной

клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

Откачиваемый газ поступает в первую ступень насоса. Подача напряжения на обмотку привода 3 впускного клапана прекращается и впускной клапан закрывается под действием пружины 9. Герметизация седла клапана производится уплотнением 10.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

На обмотку привода 11 выпускного клапана подаётся напряжение определённой полярности. По обмотке протекает ток и создаётся электромагнитное поле, концентрируемое якорем 12 выпускного клапана. Под действием якоря 13 выпускного клапана, данный клапан открывается.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан открыт. Мембрана находится в нижнем положении.

Откачиваемый газ покидает вторую ступень насоса. Подача напряжения на обмотку привода 11 выпускного клапана прекращается и выпускной клапан закрывается под действием пружины 14. Герметизация отверстий выпускной ступени производится уплотнениями 15.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

На обмотку привода 11 выпускного клапана подаётся напряжение обратной полярности. Электромагнитное поле воздействует на якорь 5 промежуточного клапана. Под его действием якорь 5 промежуточного клапана давит на мембрану 6 промежуточного клапана и промежуточный клапан открывается.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

При усилении напряжения усиливается и действие на якорь 5 мембрана 1 насоса прощелкивает, занимая верхнее положение. Откачиваемый

газ переходит из первой во вторую ступень насоса.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении. Цикл работы насоса завершен.

В конструкции насоса возможно увеличение частоты колебаний мембраны до $100 \div 200$ Гц, что повышает его производительность.

Размеры загрязняющих микрочастиц износа, выделяемых в процессе работы насоса определяются по следующим зависимостям [118].

$$d = 1,4 \sqrt[3]{4 p_k R R_{\max} (2R - R_{\max}) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$$

– при упругом контактном взаимодействии.

Здесь p_k – удельное давление в контакте;

R – радиус скругления микронеровностей;

$R_{\max}$ – максимальная высота микронеровностей;

E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов.

Или

$$d = 2,8 \sqrt{\frac{p_k R_{\max} (2R - R_{\max})}{HV}}$$

– при пластическом контакте.

Здесь HV – микротвердость менее твердого материала рассматриваемой пары.

На рис.6.2. показаны зависимости среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k , при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_c=157$ мм/с, для пар некоторых пар материалов [119].

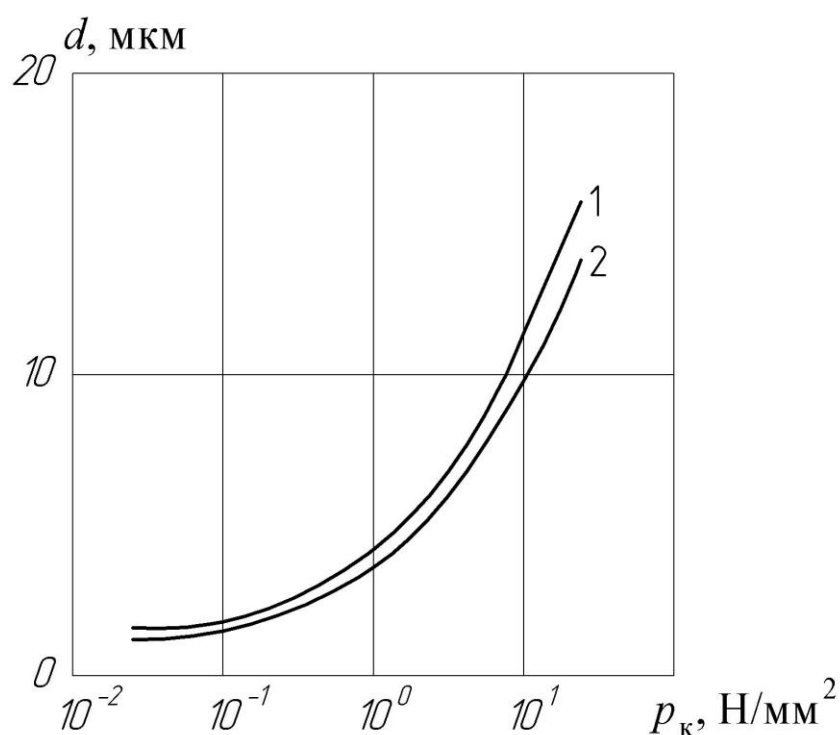


Рис. 6.2. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k для пар материалов:
 1 – сталь 40Х13 – сталь 40Х13;
 2 – сталь 45 – сталь 45

6.2. Двухступенчатый сифонный безмасляный насос

Двухступенчатый сифонный насос линейной структуры, упрощённая схема которого представлена на [рис.6.3 \[120, 121\]](#), может выполняться в безмасляном варианте.

Насос состоит из двух идентичных сифонов 1 и 2 неподвижно закреплённых со стороны обеих торцов, расстояние между которыми равно сумме растянутого и сжатого сифонов. Вытеснители 3 и 4 выполнены

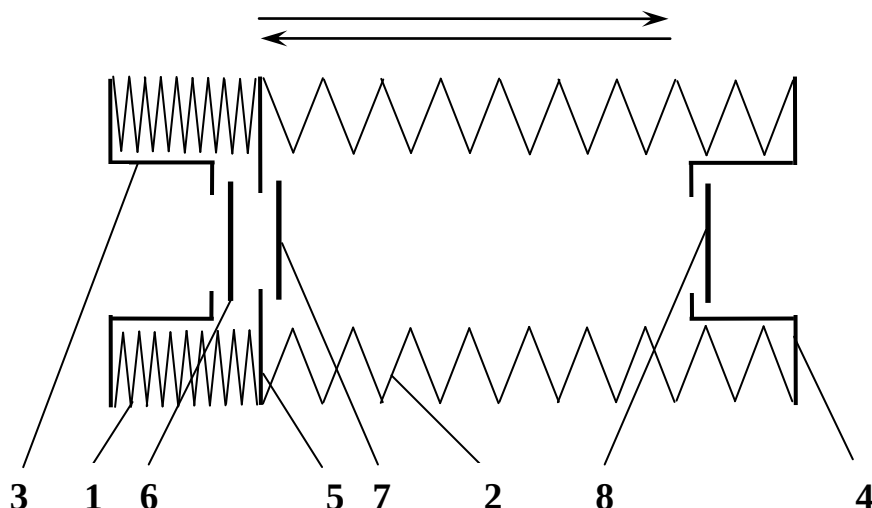


Рис. 6.3. Упрощённая схема двухступенчатого сильфонного безмасляного насоса

как элементы концевых фланцев. Сильфоны 1 и 2 герметично соединены между собой фланцем 5, подвижным вдоль главной оси сильфонов. Фланцы 3, 5 и 4 оснащены клапанами 6, 7 и 8 соответственно.

Хотя сильфонный насос не содержит пар трения-движения в своём рабочем объёме, что позволяет создать конструкцию не требующую смазки, но для сварных сильфонов повышенной растяжимости (со сложной геометрией профиля гофр) характерно трение между гофрами в состоянии близком к полному сжатию, что обеспечивает определённую генерацию микрочастиц износа, критичных для некоторых вакуумных аналитических и технологических процессов.

При их проектировании необходимо учитывать коэффициенты трения материалов в условиях вакуума [122].

Анализ многочисленных экспериментальных данных по трению твёрдых тел в условиях вакуума показывает, что в общем случае коэффициент трения материалов определяется зависимостью вида [123]:

$$f = \frac{F_{\text{адг}} + F_{\text{деф}}}{T},$$

где $F_{\text{адг}}$ – сила адгезионного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте;

$F_{\text{деф}}$ – сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте;

T – нагрузка, действующая на одну микронеровность, которая смоделирована в виде сферического сегмента пятна контакта.

Адгезионная составляющая силы трения определяется по формуле [124]:

$$F_{\text{адг}} = \frac{P \cdot E_{\text{св}} \cdot n}{\text{КЧ} \cdot d},$$

где P – вероятность образования адгезионных связей;

$E_{\text{св}}$ – энергия связи;

n – число граничных атомов на площадке контакта;

d – расстояние между ближайшими "соседями" в кристаллической решетке.

КЧ – координационное число для кристаллической структуры, находящейся в контакте;

Если учитывать влияние окружающей среды, то среднее число атомов n на площадке контакта будет определяться выражением:

$$n = \frac{2A_{\text{юв}}}{\pi \cdot S_B},$$

где $A_{\text{юв}}$ – величина площадки контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа;

S_B – площадь элементарного базиса, зависящая от кристаллической структуры металла.

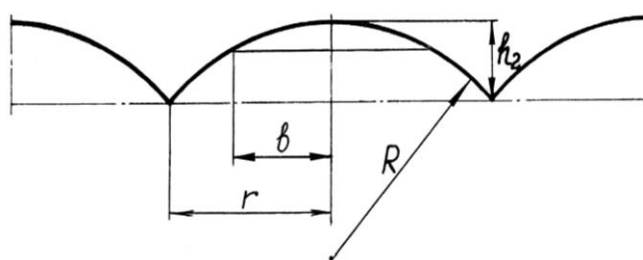


Рис. 6.4. Модель шероховатости реальной поверхности в виде сферических сегментов

Величина площадки контакта определяется из модели шероховатости, показанной на **рис. 6.4.**

Ориентировочные значения параметров шероховатости для различных видов обработки приведены в **табл.6.1 [125].**

В соответствии с работой **[126]** величина пятна контакта двух сфер радиуса R из различных материалов для случая их упругого взаимодействия определяется по формуле

$$b = 1,4 \cdot \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}.$$

В случае же пластического контактного взаимодействия

$$b = 0,618 \cdot \sqrt[3]{\frac{p_0 R h_2}{H_\mu}},$$

где R – радиус сегмента, в соответствии с **рис. 6.4;**

h_2 – высота микронеровностей;

p_0 – удельное давление в контакте;

E_1, E_2 – модули упругости для материалов, находящихся во фрикционном контакте;

H_μ – микронеровность более мягкого материала.

Таблица 6.1.

Ориентировочные значения параметров шероховатости
для различных видов обработки

Вид обработки	Класс шероховатости	h_2 , мкм	R , мкм
Шлифование	5	18	35
	6	9	100
	7	4,7	180
	8	2,3	370
	9	1,2	550
Полирование	8	2,3	230
	9	1,2	450
	10	0,6	670

Из работы [127] известно, что с учетом вероятности осаждения молекул на чистой поверхности при ударе, время T , в течение которого происходит образование монослоя молекул на поверхности тела, определяется по графику (рис. 6.5).

Осаждение молекул происходит в течение некоторого времени t между контактами микронеровностей, то есть за время, в течение которого происходит перемещение фрикционного контакта с одних пар микронеровностей на другие. Время t является временем паузы

$$t = S / v ,$$

где S – путь, пройденный микронеровностью до следующего контактного взаимодействия,

$$S = 2 (r - b) ;$$

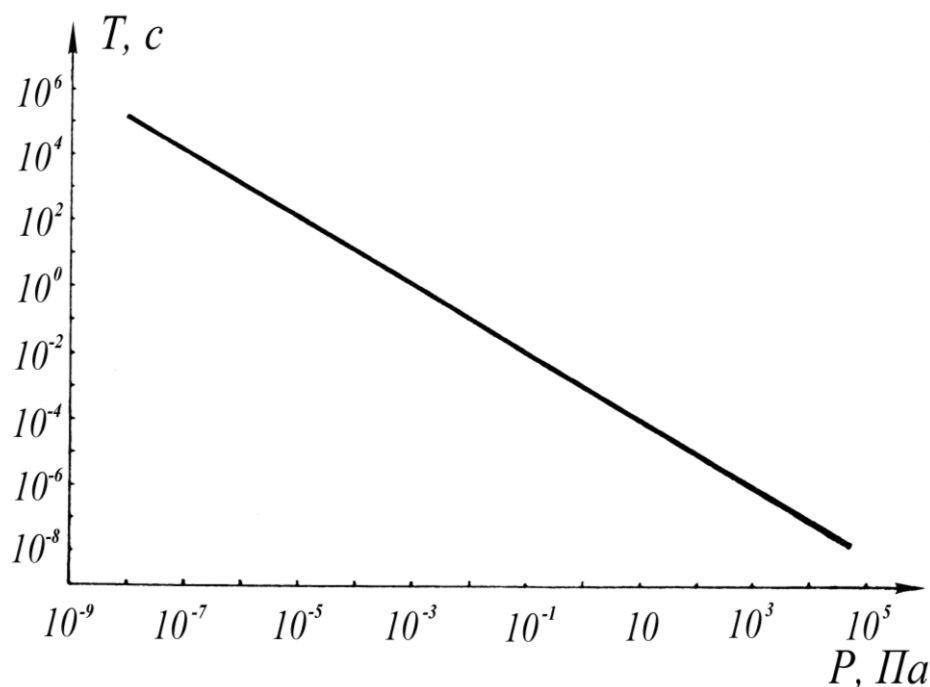


Рис. 6.5. Зависимость времени образования монослоя молекул на поверхности тела T от степени разрежения в вакуумной камере P

r – радиус основания сегмента;

v – скорость скольжения во фрикционном контакте.

Если $t = T$ то на поверхности фрикционного контакта образуется монослой молекул воздуха.

Если $t > T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется полислой молекул воздуха.

Если $t < T$, то поверхность контакта покрывается лишь частично молекулами воздуха, а вся площадь контактного взаимодействия A_e условно делится на две

$$A_{\text{в}} = A_{\text{адс}} + A_{\text{юв}}$$

где $A_{\text{адс}}$ – площадь единичного пятна контакта, покрытая адсорбированными молекулами;

$A_{\text{юв}}$ – ювенильная площадь контактного взаимодействия.

В зависимости от величины остаточного давления в вакуумной камере соотношение между $A_{\text{адс}}$ и $A_{\text{юв}}$ будет различным.

Адгезионное взаимодействие происходит лишь на площадке $A_{\text{юв}}$. Введем параметр

$$K = \frac{t}{T} = \frac{A_{\text{адс}}}{A_{\text{адс}} + A_{\text{юв}}},$$

или

$$K = \frac{A_{\text{в}} - A_{\text{юв}}}{A_{\text{в}}} = 1 - \frac{A_{\text{юв}}}{A_{\text{в}}},$$

получим

$$A_{\text{юв}} / A_{\text{в}} = 1 - K, \quad A_{\text{юв}} = A_{\text{в}} \cdot (1 - K).$$

Тогда среднее число атомов n на площадке контакта, которые еще не закрыты монослоем молекул воздуха, равно:

$$n = \frac{2A_{\text{в}}(1 - K)}{\pi \cdot S_{\text{в}}}.$$

Сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте

$$F_{\text{деф}} = \sigma_{-1} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)$$

– при упругом контактном взаимодействии,

$$F_{\text{деф}} = \sigma_T \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)$$

– при пластическом контактном взаимодействии

Где σ_{-1} , σ_T – соответственно пределы усталости и текучести на смятие для более мягкого материала фрикционного контакта;

b – ширина пятна контакта;

R – радиус смоделированной микронеровности.

Конечные формулы для определения коэффициентов трения примут вид:

$$f = \frac{2P \cdot E_{\text{св}} \cdot A_{\text{в}}(1-K) + \pi \cdot S_{\text{в}} \cdot K\text{Ч} \cdot d \cdot \sigma_{-1} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{4\pi \cdot S_{\text{в}} \cdot K\text{Ч} \cdot d \cdot p_0 \cdot r^2} \quad (6.1)$$

– для упругого контакта,

$$f = \frac{2P \cdot E_{\text{св}} \cdot A_{\text{в}}(1-K) + \pi \cdot S_{\text{в}} \cdot K\text{Ч} \cdot d \cdot \sigma_{\text{Т}} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{4\pi \cdot S_{\text{в}} \cdot K\text{Ч} \cdot d \cdot p_0 \cdot r^2} \quad (6.2)$$

– для пластического контакта

Предложенные формулы для определения коэффициентов трения материалов, работающих в вакууме, в зависимости от разряжения окружающей среды, для случая упругого и пластического контакта, могут быть использованы при проектировании узлов трения вакуумного оборудования.

Окончательный выбор материалов пар трения следует производить после экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей. Для этих целей разработана сверхвысоковакуумная экспериментальная установка.

Установка состоит из вакуумной камеры, на фланцах которой размещены сильфонный ввод вращения, соединенный посредством цепной передачи с электродвигателем постоянного тока П-11, со стабильно регулируемой частотой вращения вала и сильфонный ввод поступательного движения, выполненный водоохлаждаемым. В торцах вводов монтируются исследуемые образцы. Один из образцов вращается, а другой, перемещаясь поступательно, создает через сильфонный ввод осевое нагружение, осуществляемое на атмосфере с помощью грузов. Для измерения темпе-

ратуры в зоне трения на вводе поступательного движения размещены две термопары, сигналы с которых поступают на потенциометры. Система откачки включает механический насос НВР-16Д и турбомолекулярный насос 01АБ1500 со скоростью откачки 760 л/с.

Установка позволяет исследовать фрикционные характеристики материалов и твердосмазочных покрытий в вакууме.

По экспериментальным данным коэффициент трения определяется из следующего выражения [128]:

$$f = \frac{\eta (J_{\text{пол}} \cdot u_{\text{пол}} - J_{\text{ХХ}} \cdot u_{\text{ХХ}})}{T_1 \cdot \pi \cdot n_1 (R_{\text{min}} + R_{\text{max}})},$$

где η – коэффициент полезного действия электродвигателя;

$J_{\text{пол}}$ – величина тока при работе электродвигателя под нагрузкой;

$u_{\text{пол}}$ – напряжение, потребляемое электродвигателем во время работы под нагрузкой;

$J_{\text{ХХ}}$ – величина тока при работе электродвигателя на холостом ходу;

$u_{\text{ХХ}}$ – напряжение, потребляемое двигателем на холостом ходу;

T_1 – нагрузка;

n_1 – частота вращения;

R_{max} , R_{min} – соответственно максимальный и минимальный радиусы элементов узла трения.

Температура поверхностей трения определяется по тарировочному графику через зависимости вида:

$$t_{\text{пов}} = F (t_1 , P);$$

$$t_{\text{пов}} = F (t_2 , P),$$

где t_1 , t_2 – температура в двух точках ввода осевого нагружения;

P – разрежение в вакуумной камере.

Значения коэффициентов трения металлов, твёрдых смазочных покрытий и антифрикционных материалов в атмосфере и вакууме представлены в [таблице 6.2 \[129\]](#).

Необходимыми данными для проектирования элементов передач и опорных узлов, работающих в вакууме, являются данные по величине интенсивности изнашивания применяемых материалов и покрытий.

Контактирующие поверхности реального механизма никогда не бывают совершенно гладкими и поэтому в действительности реакции на контактирующих поверхностях не являются нормальными.

Поверхности узлов трения защищены сорбированными и окисным слоями. В атмосфере слои, изношенные в процессе трения, практически мгновенно восстанавливаются. В вакууме же для их восстановления требуется время, поэтому вероятность схватывания очищенных поверхностей возрастает.

Рассмотрим узел трения, состоящий из двух деталей, которые перемещаются относительно друг друга в вакууме. На поверхностях трения удерживается окисный слой с энергией удержания, равной $2e$.

Одна деталь вращается и находится в контакте с другой, создающей осевое нагружение. Площадь контакта составляет

$$S = C_{cp} l ,$$

где C_{cp} – длина поверхности трения для кольца, рассчитанного по среднему диаметру;

l – ширина контактной зоны.

Касательное напряжение между деталями узла трения

$$\tau = \frac{f \cdot T_1}{S} , \quad (6.3)$$

где f – коэффициент трения; T_1 – нагрузка.

Таблица 6.2.

Коэффициенты трения металлов, твердых смазочных покрытий
и антифрикционных материалов в атмосфере и вакууме

Материал трения	Материал контртела	Коэффициент трения	
		в атмосфере	в вакууме
1	2	3	4
Медь	Никель	0,45	1,50
Тантал	Никель	0,23	0,90
Вольфрам	Никель	0,21	1,36
Медь	Железо	0,51	0,75
Тантал	Медь	0,44	0,43
Вольфрам	Медь	0,34	0,41
Никель	Вольфрам	0,30	0,60
Никель	Никель	0,60	4,60
Золото	Золото	0,60	4,50
Алюминий	Алюминий	0,78	1,57
Бериллиевая бронза	Бериллиевая бронза	0,58	1,10
Латунь	Латунь	0,31	0,70
Медь	Медь	1,04	2,00
Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь	0,51	0,93
Сталь ШХ15	Медь	0,70	0,45
Нержавеющая сталь	Алюминий	0,40	0,34

1	2	3	4
Нержавеющая сталь	Латунь	0,39	0,84
Бериллиевая бронза	Латунь	0,38	0,90
Латунь	Бериллиевая бронза	0,36	0,89
Медь	Сталь ШХ15	0,55	0,96
Серебро	Железо	-	0,30
Никель	Железо	-	0,69
Серебро	Никель	-	0,86
Алюминий	Железо	-	1,28
Алюминий	Медь	-	1,47
Серебро	Медь	-	1,72
Алюминий	Серебро	-	2,20
Алюминий	Никель	-	2,36
Железо	Железо	-	0,80
Серебро	Серебро	-	2,60
Металлокерамическая бронза	Сталь 2Х13	-	0,80
Кадмий	Кадмий (покрытие)	0,39	0,31
Серебро	Серебро (покрытие)	0,36	0,89
Сплав АМг-6 с покрытием ВНИИ ПП-209	Титановый сплав ВТ-14	-	0,18
Сплав АМг-6	Титановый сплав ВТ-14	0,73	1,18
Сплав МА2-1 с покрытием ВНИИ НП-209	Титановый сплав ВТ-14	-	0,24
Сплав МА2-1	Титановый сплав ВТ-14	-	0,80

1	2	3	4
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой ЭП-096	Титановый сплав ВТ-14	-	0,07
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой Э-44	Титановый сплав ВТ-14	-	0,10
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой Э-47	Титановый сплав ВТ-14	-	0,13
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой ЭД-28	Титановый сплав ВТ-14	-	0,16
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой Э-33	Титановый сплав ВТ-14	-	0,18
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой Э-41	Титановый сплав ВТ-14	-	0,18
Покрытие ВНИИ НП-230 с органическим связующим - эпоксидной смолой ЭД-5	Титановый сплав ВТ-14	-	0,20
Дисульфид молибдена	Сталь 2Х13	-	0,17
Дисульфид вольфрама	Сталь 2Х13	-	0,15
Дисульфид ниобия	Сталь 2Х13	-	0,07
Дисульфид тантала	Сталь 2Х13	-	0,06
Диселенид молибдена	Сталь 2Х13	-	0,17
Диселенид вольфрама	Сталь 2Х13	-	0,10
Диселенид ниобия	Сталь 2Х13	-	0,17
Диселенид тантала	Сталь 2Х13	-	0,09

1	2	3	4
Графит	Сталь 2Х13	-	0,14
ПТФЕ	Сталь 2Х13	-	0,25
АМАН	Сталь 2Х13	-	0,15
АМАН (облучение ионами водорода)	Сталь 2Х13	-	0,11
Фторпласт-4	Сталь 3Х15	-	0,22
Стирол	Сталь 3Х15	-	0,55
Стирол (облучение потоком электронов)	Сталь 3Х15	-	0,62
ε-капролактам	Сталь 3Х15	-	0,23
ε-капролактам (облучение потоком электронов)	Сталь 3Х15	-	0,51
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	X18H10T	0,34	0,33
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Сплав ВТ-6	0,43	0,45
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Покрытие М-801	0,21	0,19
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Покрытие М-802	0,21	0,22
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Покрытие Т-801	0,52	0,50
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Покрытие С-802	0,58	0,57
Аналог лунного грунта - мелкий базальтовый песок	Титан азотированный	0,52	0,52
Сталь 45 с фосфатным покрытием	12Х18Н10Т	-	0,40

1	2	3	4
Сталь 45 с фосфатным покрытием	Сталь ШХ15	-	0,30
Сталь 45 с кадмиевым покрытием	12Х18Н10Т	-	0,51
Сталь 45 с кадмиевым покрытием	Сталь ШХ15	-	0,24
Сталь 45 с цинковым покрытием	12Х18Н10Т	-	0,50
Сталь 45 с цинковым покрытием	Сталь ШХ15	-	0,49
Сталь 45 с хромовым покрытием	12Х18Н10Т	-	0,40
Сталь 45 с хромовым покрытием	Сталь ШХ15	-	0,30
Сталь 45 с никелевым покрытием	12Х18Н10Т	-	0,42
Сталь 45 с никелевым покрытием	Сталь ШХ15	-	0,30
Сталь 45 с оловянным покрытием	12Х18Н10Т	-	0,22
Сталь 45 с оловянным покрытием	Сталь ШХ15	-	0,30
Д16Т	12Х18Н10Т	-	0,40
12Х18Н10Т	Латунь ЛС-59-1	-	0,40
12Х18Н10Т	Сталь ШХ15	-	0,60
12Х18Н10Т	Сталь ШХ15 сульфоциани- рованная и шаржированная дисульфидом молибдена	-	0,60
Медь М3 сульфоцианированная	12Х18Н10Т	-	0,20
Сталь 45	Покрытие: дисульфид мо- либдена + эпоксидная смола	-	0,17
Сталь 45	Покрытие: дисульфид мо- либдена + цеолит + эпок- сидная смола	-	0,07

1	2	3	4
Сталь 45	Покрытие: дисульфид молибдена + силикагель эпоксидная смола	-	0,10
Сталь 45	Покрытие: графит + силикагель + эпоксидная смола	-	0,30

Работа трения определяется по выражению

$$A = 2 \int_0^{C_{cp}} y \cdot l \cdot \tau dy = C_{cp}^2 \cdot l \cdot \tau = C_{cp} \cdot S \cdot \tau .$$

Поскольку в вакууме отсутствует конвективный теплообмен и в предположении отсутствия потерь в результате теплопроводности запишем с учетом (6.3):

$$C_{cp} \cdot S \frac{f \cdot T_1}{S} = 2eS .$$

Откуда

$$T_1 = T_{1max} = \frac{2el}{f} .$$

Здесь T_{1max} – максимальная нагрузка при которой поверхностные слои изнашиваются сразу и схватывание происходит за один оборот.

Если действующая нагрузка меньше T_{1max} то схватывание произойдет, но после определенного количества циклов N .

Для полного износа поверхностных слоев с площади контакта необходимо затратить энергию

$$N C_{cp} f \sigma_H = e S , \quad (6.4)$$

где σ_H – среднее контактное напряжение по Герцу.

Из формулы (6.4) число циклов работы узла трения в вакууме до

схватывания равно:

$$N = \frac{e}{f C_{\text{ср}} \sigma_H} .$$

На площадках контакта происходит два вида изнашивания – деформационное и адгезионное.

Суммарное изнашивание равно:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{деф}} + J_{\text{адг}} . \quad (6.5)$$

Интенсивность линейного изнашивания J_h . определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh , удаленная с единицы пути трения L :

$$J_h = \Delta h / L .$$

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_h , величина которой выражается зависимостью [130]:

$$i_h = \Delta h_1 / l ,$$

где Δh_1 – средняя толщина изношенного слоя пятна контакта;

l – путь трения, равный диаметру пятна контакта.

При условии, что изнашивание идет равномерно во времени и по поверхности, установившийся процесс отделения материала на всем пути трения равен средней интенсивности изнашивания за одно нарушение фрикционной связи

$$J_h = i_h \frac{A_{\phi}}{A_H} , \quad (6.6)$$

где A_{ϕ} – фактическая площадь контакта;

A_H – номинальная площадь контакта.

При деформационном изнашивании принимаем, что за одно фрикционное взаимодействие происходит удаление слоя $\Delta h_1 / N_1$, где N_1 – количество циклов деформации до разрушения.

Если напряжение в контакте превышает допустимое, то согласно работе [131] количество циклов деформации до разрушения будет определяться:

$$N_1 = 10^7 \left(\frac{\sigma_{HP}}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^6,$$

где σ_{HP} – допускаемое контактное напряжение;

$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное контактное напряжение.

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_n \sqrt{1 + 4f^2},$$

где σ_n – контактное напряжение в зоне контактирования двух микронеровностей,

$$\sigma_n = \frac{1,5T}{\pi b} = \frac{6r^2}{\pi b};$$

f – коэффициент трения определяемый по формулам (6.1) и (6.2).

Введя параметры T и t , и с учетом выражений (6.5) и (6.6) интенсивность деформационного и адгезионного изнашиваний будет определяться выражениями:

$$J_{\text{деф}} = i_{\text{деф}} \frac{A_{\text{адс}}}{A_H} = K i_{\text{деф}} \frac{A_B}{A_H},$$

$$J_{\text{адг}} = i_{\text{адг}} \frac{A_{\text{юв}}}{A_H} = (1 - K) i_{\text{адг}} \frac{A_B}{A_H},$$

откуда

$$J_{\Sigma} = J_{\text{деф}} + J_{\text{адг}} = \left[K \cdot i_{\text{деф}} + (1-K) i_{\text{адг}} \right] \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}},$$

где

$$i_{\text{деф}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2bN},$$

$$i_{\text{адг}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b}.$$

Окончательно

$$J_{\text{деф}} = K \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}, \quad (6.7)$$

$$J_{\text{адг}} = (1-K) \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}, \quad (6.8)$$

где b – ширина пятна контакта;

$$b = 1.4 \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$$

– при упругом контакте,

$$b = 0.618 \sqrt{\frac{p_0 R h_2}{H_{\mu}}}, \quad \text{при } R \gg R_{\text{max}},$$

или

$$b = 0.437 \sqrt{\frac{p_0 h_2 (2R - h_2)}{H_{\mu}}}, \quad \text{при } R > R_{\text{max}}$$

– при пластическом контакте.

Здесь E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов;

R, h_2 – параметры шероховатости;

p_0 – удельное давление в контакте;

H_μ – микротвёрдость;

Полученные выражения (6.7) и (6.8) позволяют рассчитывать интенсивность изнашивания любых пар трения материалов в вакууме в зависимости от нагрузки, микрогеометрии, скорости скольжения, остаточного давления в вакуумной камере и их механических характеристик.

Результаты проведённых исследований могут быть использованы в процессе конструирования функциональных устройств и систем вакуумного оборудования, в том числе:

- при составлении требований и определении параметров работоспособности функциональных устройств и систем;
- при количественном определении параметров материала, формы и нагрузки на узлы трения (размеров, оптимальных материалов и твёрдосмазочных покрытий);
- при проведении функционального анализа основных структур механических устройств и систем с сопоставлением возможных вариантов;
- при проведении анализа процессов трения и изнашивания (определении типа трения и износа, анализа граничного состояния с учётом параметров узлов трения);
- при оценке работоспособности конструкции функционального устройства по узлам трения на основе параметров и моделей для описания надёжности.

6.3. Сильфонно-поршневой насос

На **рис. 6.5** показан внешний вид вакуумного сильфонно-поршневого насоса.

Сущность разработки поясняется чертежами, где на **рис. 6.6, а, б, в и**

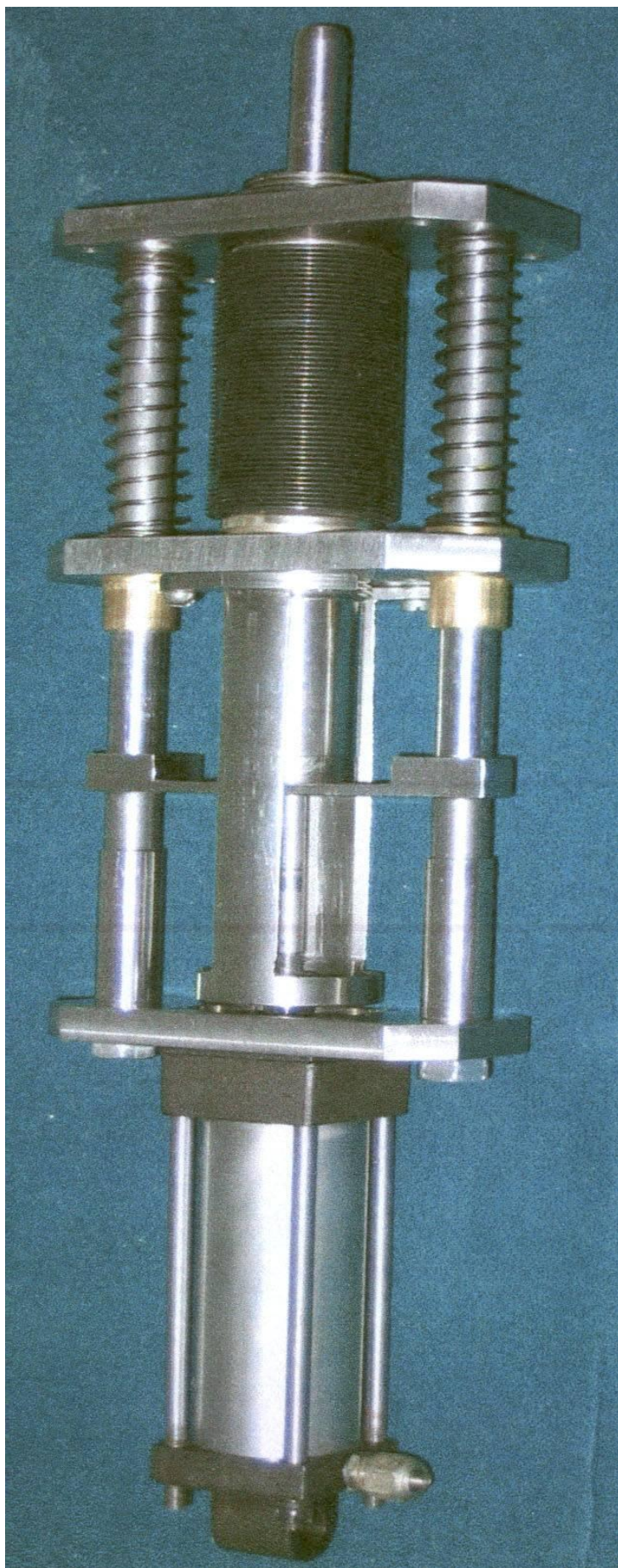


Рис. 6.5. Вакуумный сифонно-поршневой насос. Внешний вид

г показаны стадии работы сифонно-поршневого насоса* [132]:

а-стадия работы I ;

б-стадия работы II ;

в-стадия работы III ;

г-стадия работы VI.

Насос содержит полый поршень 1 (вытеснитель) (см. рис. 6.6, а), выполненный с возможностью продольного перемещения, и сифонный элемент 2, один конец которого герметично закреплен на поршне 1, а другой - на основании впускного (нижнего) подпружиненного клапана 3. Поршень 1 жестко закреплен на рамке 4, которая от внешнего привода имеет возможность продольно перемещаться по направляющим 5.

Внутри поршня 1 расположен полый цилиндрический шток 6 с глухим торцом со стороны впускного клапана 3 и перекрытым выпускным обратным клапаном 7 торцом с противоположной стороны. Со стороны глухого торца поршня 1 в его боковой стенке выполнены отверстия 8, сообщающие полости штока 6 и сифонного элемента 2.

Шток 6 имеет возможность ограниченно перемещаться вдоль оси поршня 1, перекрывая впускной клапан 3 в крайнем нижнем своем положении. На внешней поверхности штока 6 выполнен упор 9, а поршень 1 снабжен защелкой 10, выполненной в виде двуплечего рычага, взаимодействующего одним из своих плеч с упором 9, фиксируя тем самым шток 6 относительно поршня 1, в крайнем нижнем положении, и освобождая шток 6 относительно поршня 1 путем взаимодействия другого плеча рычага с бобышкой 11, неподвижно закрепленной относительно направляющих 5, в крайнем верхнем положении поршня со штоком.

Работа насоса осуществляется следующим образом.

* Работы по сифонно-поршневому насосу проводились под руководством профессора Кеменова В.Н.

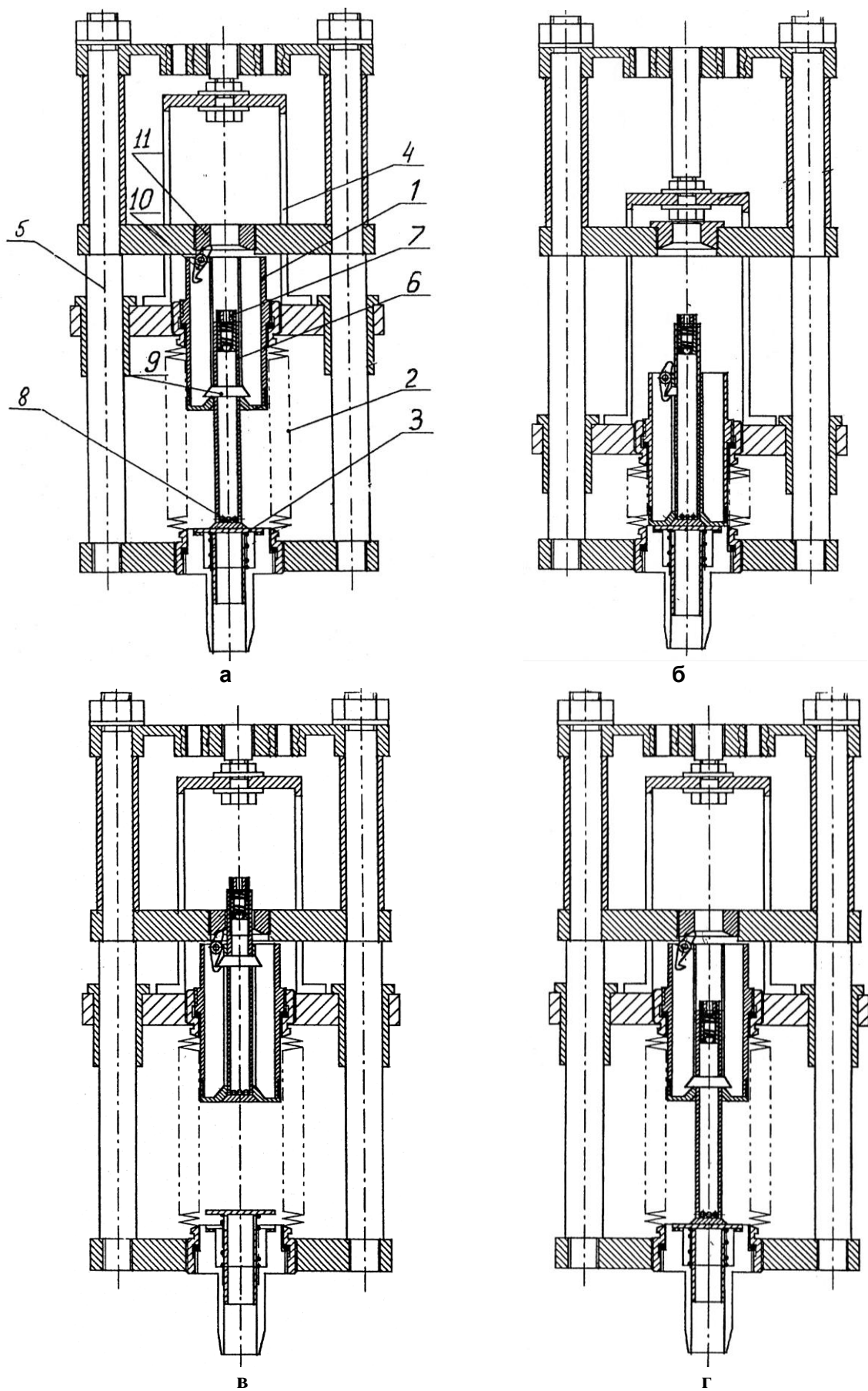


Рис. 6.6. Вакуумный сифонно-поршневой насос: стадии работы

На **рис. 6.6,а** показано начальное положение перечисленных функциональных элементов насоса, когда поршень 1 находится в крайнем верхнем положении, а шток 6 - в крайнем нижнем, перекрывая своим глухим торцом впускной клапан 3.

При движении рамки 4, а следовательно, и поршня 1 вниз (**см. рис. 6.6,б**) происходит сжатие сильфонного элемента 2, в результате чего газ из сильфонного элемента выдавливается и через отверстия 8 в штоке 6, через выпускной клапан 7 выходит в атмосферу.

При движении рамки 4, а следовательно, и поршня 1 вверх (**см. рис. 6.6,в**) защелка 10 зацепляет упор 9 штока 6, и вся конструкция движется вверх. Сильфонный элемент 2 растягивается и увеличивает объем, при этом шток 6 с поршнем 1 освобождают впускной клапан 3, который под действием пружины открывает вакуумный объем.

Защелка 10 (**см. рис. 6.6,г**) одним из своих рычагов наезжает на боышку 11 и, поворачиваясь, освобождает упор 9 штока 6, который под действием пружины (не показана) перемещается вниз, закрывает впускной клапан 3, запирая газ в объеме сильфонного элемента 2.

После чего рассмотренная последовательность повторяется необходимое количество раз.

Вакуумный сильфонно-поршневой насос имеет простую конструкцию, надежен в эксплуатации и имеет относительно высокую производительность, так как является двухступенчатым.

Также разработана конструкция вакуумного безмасляного насоса с эластичной мембраной, исключая загрязнения смазкой [133].

Вакуумный сильфонно-поршневой насос имеет простую конструкцию, надежен в эксплуатации и имеет относительно высокую производительность, так как является двухступенчатым.

Для определения предельного давления вакуумного насоса исполь-

зудается выражение [66]

$$P_{пред} = P_0 \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{V_k}{V_p} \right) \right]^n} + \sum a_1 \frac{V_{\text{вп}}}{V_k} P_{\text{выхл}} \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{V_k}{V_p} \right) \right]^m}, \quad (6.9)$$

где V_p – откачиваемый объём;

V_k – объём рабочей камеры насоса;

$V_{\text{вп}}$ – “паразитный объём”;

$P_{\text{выхл}}$ – давление выхлопа;

a_1 – коэффициент, учитывающий газовыделение;

P_0 – начальное давление в откачиваемом объёме.

Выражение (6,9) может быть представлено в виде, широко используемом при оценке предельного давления вакуумных насосов:

$$P_{пред} = a_1 \frac{V_{\text{вп}}}{V_k} P_{\text{выхл}}.$$

Приняв $a_1 = 1$,

$$P_{пред} = \frac{V_{\text{вп}}}{V_k} P_{\text{выхл}}. \quad (6.10)$$

Из выражения (6.10) следует, что при формировании необходимой величины предельного давления важным фактором является отношение “паразитного объёма” к объёму камеры.

В конструкциях вакуумных насосов на основе сильфонных камер, необходимо оценить влияние межмембранных зазоров Δ , образующихся в результате недоскладывания сильфона, и рассматривать совокупный “паразитный объём”.

Очевидно, что длина сильфона в полном сложенном состоянии равна:

$$L_c = \delta \cdot n ,$$

где δ – толщина мембраны сильфона; n – количество гофр.

При $2\delta \cdot n > L_c$ на некоторую величину m , имеет место недоскладывание сильфона, а межмембранный зазор Δ , создающий дополнительный “паразитный объём” во внутренней полости сильфона может быть определён из следующего выражения

$$\Delta = \frac{m}{n} .$$

Предельное давление в поршневой ступени, обусловленное геометрическими параметрами её элементов определяется из выражения

$$P_{\Pi \text{ пред}} = \frac{V_{\text{вр}}}{V_{\text{к.эф}}} P_{\text{выкл}} .$$

Здесь $V_{\text{к.эф}}$ эффективный объём поршневой камеры, определяющийся следующим образом:

$$V_{\text{к.эф}} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} L ,$$

где D_1 – внутренний диаметр цилиндра, контактирующего с поршнем;

L – максимальный ход сильфона до состояния полного складывания гофр.

Так как поршневая ступень насоса выходит на атмосферу, выражение для $P_{\Pi \text{ пред}}$ принимает вид

$$P_{\Pi \text{ пред}} = \frac{V_{\text{вр}}}{V_{\text{к.эф}}} \cdot 10^5 \text{ Па} .$$

Для снижения трения и износа сильфонно-поршневого насоса, в условиях вакуума, целесообразно использовать твердосмазочные композиционные покрытия, в которых в качестве связующего вещества используется эпоксидная смола в сочетании с твердой смазкой, например, дисульфидом мо-

либдена или графитом, и газопоглотителем, например, цеолитом, силикагелем или алюмогелем. Такое твердосмазочное покрытие наносится на втулку подшипника скольжения или другие трущиеся детали. При этом остаточные, в вакуумной системе, газы адсорбируются газопоглотителем на поверхностях трения и образуют плотную пленку из адсорбированных молекул, которая снижает адгезионное взаимодействие и в сочетании с твердой смазкой уменьшает коэффициент трения и изнашивание поверхностей.

На **рис. 6.7** представлены зависимости интенсивности изнашивания твердосмазочных композиционных покрытий, содержащих газопоглотитель – цеолит (CaA) и различные компоненты: графит (C) или дисульфид молибдена (MoS_2), связанные эпоксидной смолой (ЭС), от времени.

Интенсивность изнашивания покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами приведена на **рис. 6.8**. На **рис. 6.9** показаны зависимости коэффициентов трения предлагаемых покрытий от разрежения в вакуумной камере. Эксперименты проводились с подшипниками скольжения, на втулки которых наносились твердосма-

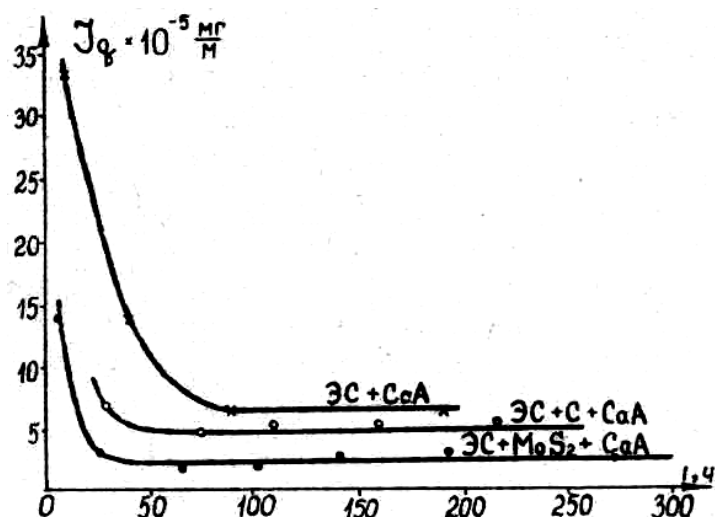


Рис. 6.7. Зависимости интенсивности изнашивания различных твёрдосмазочных композиционных покрытий от времени

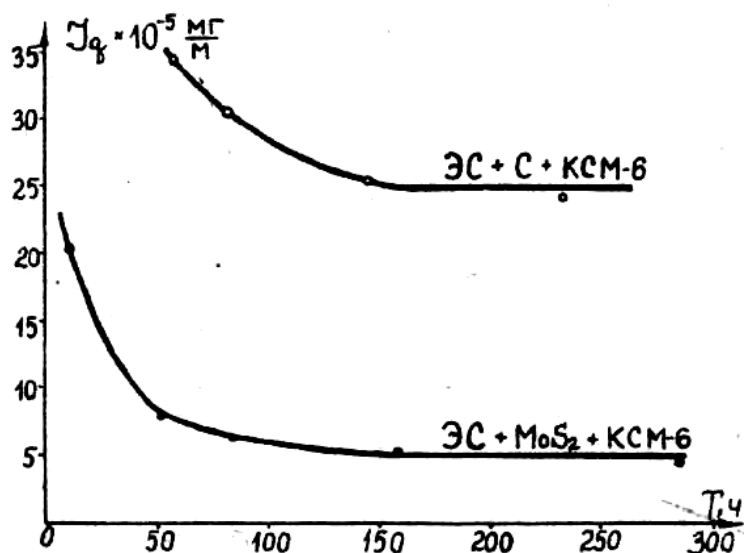


Рис. 6.8. Зависимости интенсивности изнашивания твёрдосмазочных композиционных покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами от времени

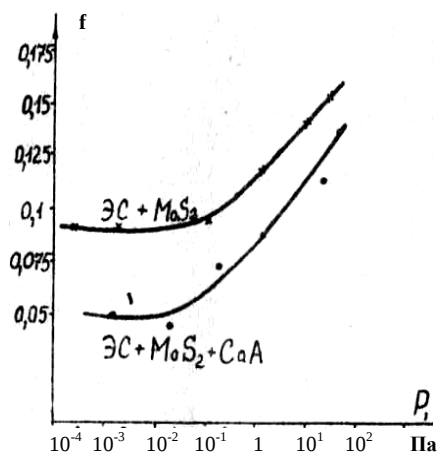


Рис. 6.9. Зависимости коэффициентов трения твёрдосмазочных композиционных покрытий от разрежения в вакуумной камере

зочные покрытия.

Одним из основных требований, предъявляемых к подшипникам скольжения, является обеспечение заданной точности. В связи с этим необходимо, чтобы изнашивание цапфы или втулки за определенный промежу-

ток времени, для конкретных условий эксплуатации, не выходило за пределы допустимых значений, лимитирующих надежность подшипника скольжения по точности.

Оценка интенсивности изнашивания производится в зависимости от механических свойств материалов цапфы и втулки, микрогеометрии контактирующих поверхностей и удельного давления в контакте.

Величина максимального удельного давления в контакте определяется по формуле

$$P_0 = P / 2R_{ц} \cdot \ell ,$$

где P – радиальная нагрузка на опору;

$R_{ц}$ – радиус цапфы;

ℓ – длина цапфы.

При оценке интенсивности изнашивания приняты следующие допущения:

1. Поверхность трения моделируется сферическими сегментами высотой R_{max} и радиусом R . Поверхности трения можно моделировать в виде сферы, цилиндра или конуса (рис. 6.10 а,б,в) [134]. Наиболее пригодной для расчетов на трение и изнашивание и предпочтительной является сферическая модель, которая обладает осевой симметрией, что особенно важно при рассмотрении проблемы с учетом кинематики. При сферической модели осевая симметрия отражает изотропность трения. Две другие формы способны описать анизотропные эффекты. В этих формах нормальные напряжения на периферии (рис. 6.10,б) и в центре (рис. 6.10,в) пятна контакта являются неопределенными.

Однако сферическая модель, где микронеровности моделируются в виде полусфер, не всегда отражает картину реальной шероховатости. Поэтому мы моделируем поверхность трения в виде сферических сегментов, форма которых близка к форме реальной поверхности.

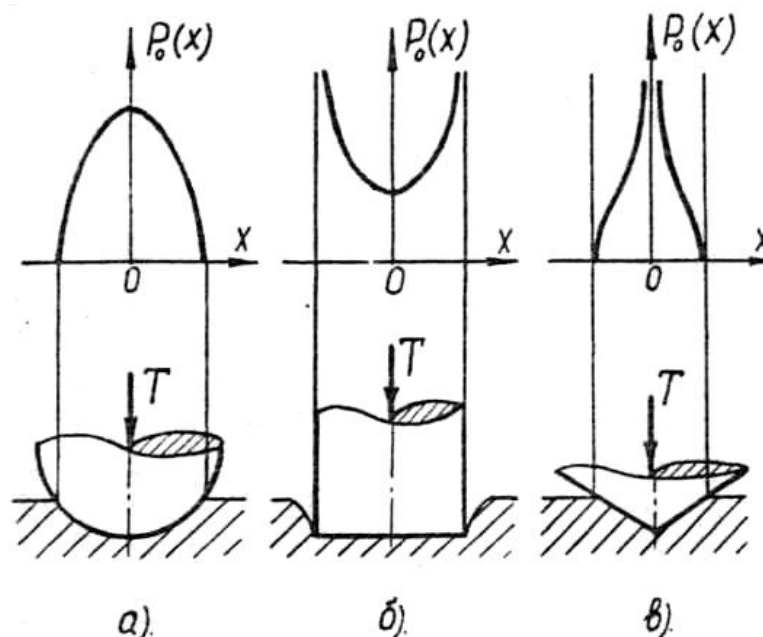


Рис. 6.10. Модели поверхностей трения

2. Износ происходит в зоне вершин микронеровностей.
3. Влияние температуры в зоне трения учитывается изменениями механических свойств материалов.
4. Адгезионные свойства и физико-химические изменения поверхностных слоев не учитываются.

Интенсивность линейного изнашивания J_n определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh удалённая с единицы пути трения L [130]:

$$J_n = \Delta h / L \quad .$$

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_n , величина которой выражается зависимостью

$$i_n = \Delta h_1 / \ell \quad , \quad (6.11)$$

где Δh_1 – средняя толщина изношенного слоя контакта;

ℓ – путь трения, равный диаметру пятна контакта.

Между интенсивностью изнашивания J_n и удельной интенсивностью изнашивания i_n существует следующая связь:

$$J_n = i_n \frac{A_a}{A_R}, \quad (6.12)$$

где A_a – фактическая площадь контакта;

A_R – номинальная площадь контакта.

Средняя толщина изношенного слоя шероховатой поверхности за одно нарушение фрикционной связи, в соответствии с рис. 6.11, может быть определена по формуле

$$\Delta h_1 = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{N}, \quad (6.13)$$

где R – радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента;

a – радиус единичного пятна контакта;

N – количество циклов деформации до разрушения.

В соответствии с рис. 6.11 радиус основания сегмента при $R_{max} \ll R$ будет равен

$$r \approx \sqrt{2R \cdot R_{max}}. \quad (6.14)$$

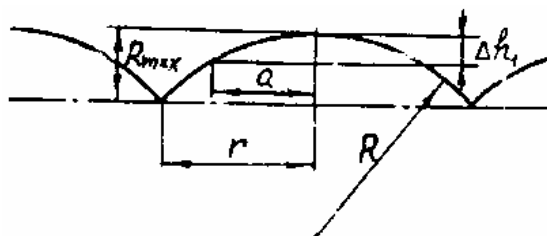


Рис. 6.11. Схема поверхностей трения, моделируемая сферическими сегментами равных радиусов

Расстояние между микровыступами двух шероховатостей равно $2r$.

Тогда сила, действующая на единичную микронеровность, равна

$$T = 4P_0 \cdot r^2 . \quad (6.15)$$

Величина пятна контакта определяется по формуле

$$a = 0,88 \sqrt[3]{\frac{T}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R} , \quad (6.16)$$

где T – сила, действующая на единичную микронеровность;

E_1, E_2 – модули упругости материала цапфы и втулки;

R – радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента.

После подстановки выражений (6.14) и (6.15) в (6.16) получим для случая упругого контактного взаимодействия

$$a = 1,4 \cdot \sqrt[3]{R^2 R_{\max} P_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)} . \quad (6.17)$$

Для случая пластического контактного взаимодействия радиус пятна контакта находится из условия, что контактные напряжения σ_k не превышают $10 H\mu$, т.е.

$$\sigma_k = 10 H\mu , \quad (6.18)$$

$$\text{или} \quad \frac{1,5T}{a^2} = 10 H\mu .$$

Откуда, используя выражения (6.14) и (6.15) получим

$$a = 0,618 \sqrt{\frac{P_0 R_{\max} R}{H\mu}} . \quad (6.19)$$

Максимальное удельное давление, назовем его допускаемым удельным давлением $[P_0]$, при котором ещё выполняются соотношения (6.16), будет

определяться из следующих соображений.

Наибольшее контактное напряжение возникает в центре круга касания двух микронеровностей и определяется по формуле

$$\sigma_{\kappa} = \frac{2P_0 P_{\max}}{\sqrt[3]{RR_{\max}^2 P_0^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}} .$$

Откуда с учетом выражения (6.18)

$$[P_0] = \frac{125H\mu^3 \cdot R \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}{R_{\max}} .$$

Интенсивность линейного изнашивания с учетом выражений (6.11), (6.12) и (6.13) равна

$$J_n = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{2aN} \cdot \frac{A_a}{A_R} , \quad (6.20)$$

где a – величина пятна контакта.

$$A_a = \pi \cdot a^2 ; \quad (6.21)$$

$$A_R = \pi \cdot r^2 . \quad (6.22)$$

Количество циклов деформации N , приводящих к разрушению зависит от напряженного состояния единичного пятна контакта. Если напряжение в контакте превышает допустимое, то количество циклов деформации до разрушения будет определяться [135]:

$$N = 10^7 \left(\frac{[\sigma_{\kappa}]}{\sigma_{\kappa}} \right)^6 . \quad (6.23)$$

Допускаемое контактное напряжение $[\sigma_{\kappa}]$ может быть определено по

справочным данным. Что касается расчетного контактного напряжения, его следует определять по формулам (6.17) или (6.19) в зависимости от характера контактного взаимодействия.

Подставив выражения (6.21), (6.22), (6.23) в формулу (6.20), получим

$$J_n = \frac{(R - \sqrt{R^2 - a^2})a}{2 \cdot 10^7 \left(\frac{[\sigma_\kappa]}{\sigma_\kappa} \right)^6 \cdot R^2},$$

или

$$J_n = 5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{[\sigma_\kappa]}{\sigma_\kappa} \right)^{-6} \cdot \frac{a(R - \sqrt{R^2 - a^2})}{R^2}.$$

Предложенные и исследованные твёрдосплавные композиционные покрытия [136] позволяют создавать механические системы с пониженной интенсивностью изнашивания и тем самым снижать уровень загрязнений привносимых исполнительными элементами вакуумного оборудования, что особенно важно при современном повышении требований к чистоте технологической среды на загрязнения как частицами износа, так и высокомолекулярными углеродными загрязнениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе системной модели технического объекта предложен подход к построению классификации вакуумных насосов, устанавливающий необходимое и достаточное множество признаков, принимаемых в качестве оснований деления. Разработана классификация вакуумных насосов, охватывающая все известные их виды, включая комбинированные, и являющаяся основой для проектирования миниатюрных низковакуумных насосов.

В монографии отображена разработанная методика поиска физического принципа действия вакуумных насосов нового класса, в основе которой лежат эвристические правила, позволяет применять при поиске многокритериальный логико-эвристический выбор вида насоса.

На основе предложенных классификации и методики поиска физического принципа действия вакуумных насосов нового класса разработана эвристическая модель выбора вида для проектирования класса "миниатюрный вакуумный насос", устанавливающая зависимости между видами насосов и диапазонами значений их основных показателей качества. В результате выбора по эвристической модели определен рациональный физический принцип действия миниатюрного низковакуумного насоса, заключающийся в удалении газа путем перекачки его объемов мембраной, движущейся возвратно-поступательно.

Развита методика эволюционного синтеза структурно-конструктивных схем, включающая себя новые процедуры модернизации прототипа: построение дерева целей проектирования на основе его иерархической структуры, формализованное выявление и разрешение

физических противоречий с учетом целей проектирования, что обеспечивает целенаправленное улучшение прототипа без создания его промежуточных модификаций.

Предложенная методика эволюционного синтеза позволяет решить задачу миниатюризации структурно-конструктивных схем мембранных миниатюрных вакуумных насосов с мягкой и жесткой полимерной или металлической мембраной, отличающихся от известных тем, что две откачные ступени расположены в одной рабочей камере, а для изменения их объемов использовано одно рабочее тело, что дает возможность осуществлять одновременный впуск и выхлоп газа на двух разных циклах откачки.

Предложенная методика формирования моделей функционирования миниатюрных низковакуумных насосов позволяет разработчику вакуумной техники виртуальные объекты и процессы для моделирования изменения давления в насосе при произвольном изменении его структуры. Разработанная методика обобщена для многокамерных вакуумных систем, что позволит автоматизировать процесс их проектирования.

Разработанная математическая модель функционирования мембранного миниатюрного низковакуумного насоса позволяет установить зависимости, описывающие связи между давлениями газа в откачных ступенях насоса, временем их достижения в процессе откачки и геометрическими характеристиками насоса.

Построены графические проектировочные зависимости давления выхлопа первой откачной ступени в стационарном режиме работы, предельного остаточного давления, номинальной быстроты действия и наименьшего рабочего давления от диаметра корпуса насоса при различных значениях прогиба мембраны, являющиеся основой для расчета и конст-

руирования мембранных миниатюрных вакуумных насосов различных типоразмеров.

Предложенная методика проектирования мембранного миниатюрного низковакуумного насоса позволяет разработать его конструкцию, обладающую заданными геометрическими и функциональными характеристиками, и включает в себя процедуры выбора диаметра условного прохода, определения максимального значения объемов откачных ступеней и частоты колебаний мембраны насоса, определения геометрических параметров откачных ступеней, оценку предельного остаточного и наименьшего рабочего давления, выбор мембраны, выбор и расчет привода, проверку соответствия массогабаритных характеристик техническому заданию, расчет и проектирование регулирующих клапанов, проверочный расчет.

Выполненные теоретико-экспериментальные, опытно-конструкторские и патентно-лицензионные исследования позволяют выявлять научно обоснованные, технически целесообразные, экономически и технологически выгодные разработки устройств вакуумной откачной аппаратуры.

ЛИТЕАТУРА

1. Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., Kratschmer E., Kim H.S., Lee K.Y., Rishton S.A., Zolgharnain S. Electron beam technology – SEM to microcolumn // *Microelectronic Engineering*. – 1996. – Vol. 32. – P. 113-130.
2. Khursheed A. Construction and design of a high-resolution portable scanning electron microscope column // *Proc. SPIE*. – 1999. – Vol. 3777. – P. 116-124.
3. Callas J.L. Miniature Scanning Electron Microscope // *JPL New Technology Report*. – 1999. – NPO-20499.
4. Reijonen J., Ji O., King T.J., Leung K.N., Persaud A., Wielde S. Compact focusing system for ion and electron beams // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. – 2002. – Vol. 20, № 1. – P.180–184.
5. Бельский М.Д., Львов Б.Г., Суворинов А.В., Филиппчук Т.С. Задача оптимального проектирования микроминиатюрной электростатической оптики электроннолучевых микроколонн // Тез. докл. VI Всеросс. Сем. "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики". – М.: НПО "Орион", 2003. – С. 48-50.
6. Muray L.P., Spallas J.P., Stebler C., Lee K., Mankos M., Hsu Y., Gmur M., Chang T. H. P. Advances in arrayed microcolumn lithography // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. – 2000, Vol.18, № 6. – P. 3099-3104.
7. Mankos M., Covle S., Fernandez A., Sagle A., Owens W., Sullivan J., Chang T.H.P. Basic constraints for a multibeam lithography column // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. – 2001, Vol.19, № 2. – P. 467-475.
8. Coyle S.T., Shamoun B., Yu M., Maldonado J., Thomas T., Holmgren D.,

- Chen X., Schienfein M.R., De Vore B., Gesley M. Progress toward a raster multibeam lithography tool // J. Vacuum Sci. Technol. B. – 2004, Vol. 22, № 2. – P. 501-505.
9. Chisholm T., Liu H., Munro E., Rouse J., Zhu X. Compact electrostatic lithography column for nanoscale exposure // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. – 1997. – Vol. 15, № 6. – P. 2702–2706.
 10. Ji Q., King T.J., Lee Y.Y., Leung K.N. Compact column design for a focused ion-beam lithography system // Proc. SPIE. – 1999, Vol. 3777. – P. 175-182.
 11. Казаченко В.П. Технологические методы формирования наноразмерных полимерных покрытий в вакууме // Нанотехника. – 2004, № 1. – С. 48-54.
 12. Митин А.В. Митин В.С., Шарипов Э.И. Высокоскоростной процесс ионно-плазменного магнетронного распыления – основа новейших технологий, материалов и оборудования по нанесению многокомпонентных защитных, функциональных и специальных покрытий // Нанотехника. – 2004, № 1. – С. 63-71.
 13. D’Souza B., Jamison A., Young M. MEMS Technology Demonstration on Traveler-I // Proceedings of the 16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. – Reston, VA, USA: AIAA, 2002. – SSC02-IX-2.
 14. Mahaffy P., Harpold D. Pump Effects in Planetary Mass Spectrometers. Proceedings of the 1st NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 1999. – Режим доступа: <http://cissr.jpl.nasa.gov/conferences/pumpsworkshop/index.html>. – Загл. с экрана.
 15. Holland P.M., Chutjian A., Darrach M. Micro-GC/MS Instrumentation for Spaceflight Applications. Proceedings of the 1st NASA/JPL Miniature

- Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 1999. – Режим доступа: <http://cissr.jpl.nasa.gov/conferences/pumpsworkshop/index.html>. – Загл. с экрана.
16. Gardner B.D., Cotter R.J. A Miniature MALDI-TOF Mass Spectrometer using Electric Fields that are Non-Homogeneous in Space and Time. Proceedings of the 4th Harsh-Environment Mass Spectrometry Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2003. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%204th/4thWSprogram2.htm>. – Загл. с экрана.
 17. Adams F., Follistein D., Arkin R., Griffin T. KSC Miniature, Rugged Mass Spectrometer Applications and Development Progress. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#KSC>. – Загл. с экрана.
 18. Henry C.M. The Incredible Shrinking Mass Spectrometers: Miniaturization is on track to take MS into space and the doctor's office // Analytical Chemistry. – 1999, Vol. 71. – P. 264A-268A.
 19. Hybrid turbomolecular pumps. ATH series: Catalog / Alcatel Vacuum Technology. – Annecy, France: Alcatel Vacuum Technology, 2004. – 16 p.
 20. Turbopumps for all applications in industry and research: Catalog / Pfeiffer Vacuum GmbH. – Asslar, Germany: Pfeiffer Vacuum, 2003. – 18 p.
 21. Turbo-V Pumps: Catalog / Varian, Inc. – Palo Alto, CA, USA: Varian, 2003. – 48 p.
 22. Turbomolecular Pumps: Leybold Vacuum Full Line Catalog 2005. Product

- Section C09 / Leybold Vacuum GmbH. – Cologne, Germany: Leybold Vacuum, 2005. – 106 p.
23. Kenton M.A., Kline-Scholder R.J. Miniaturized Vacuum Pump Development at Creare. Proceedings of the 1st NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 1999. – Режим доступа: <http://cissr.jpl.nasa.gov/conferences/pumpsworkshop/index.html>. – Загл. с экрана.
 24. Kenton M.A. Development of Turbomolecular Pumps for Demanding Environments. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Development>. – Загл. с экрана.
 25. Rowan R., Johnson M. Miniature Turbo-molecular Pump. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Turbo>. – Загл. с экрана.
 26. Ion Pumps: Catalog / Varian, Inc. – Palo Alto, CA, USA: Varian, 2003. – 52 p.
 27. Ion Pumps: Catalog / Thermionics Laboratory, Inc. – Port Townsend, WA, USA: Thermionics Laboratory, 2002. – 47 p.
 28. TiTan Ion Pumps [Электронный ресурс] / Gamma Vacuum, LLC. – Электрон. дан. – Shakopee, MN, USA: Gamma Vacuum, 2006. – Режим доступа: <http://www.gammavacuum.com/product.asp?typeid=1>. – Загл. с экрана.

29. Small Varian Style Ion Pumps [Электронный ресурс] / HeatWave Labs, Inc. – Электрон. дан. – Watsonville, CA, USA: HeatWave Labs, 2001. – Режим доступа: <http://www.cathode.com/pdf/5-1-4.pdf>. – Загл. с экрана.
30. Попов В.А., Павлова В.А. Проблемы инициирования запуска магниторазрядных микронасосов // Матер. VIII науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2001. – С. 317-319.
31. Rutherford S.L. Miniature Sputter-Ion Pump Design Considerations [Электронный ресурс] / Duniway Stockroom Corp. – Электрон. дан. – Mountain View, CA, USA: Duniway Stockroom, 1999. – Режим доступа: <http://www.duniway.com/images/pdf/pg/mini-putter-ion-pumps.pdf>. – Загл. с экрана.
32. Корепин Г.Ф., Котюргин Е.А., Стефаненко А.А. Миниатюрные магнитные электроразрядные насосы полумагнетронного типа. // Тез. докл. науч.-тех. сем. "Вакуумная техника и технология". – С-Пб.: СПбГПУ, 2003.
33. Wilcox J.Z., George T., Feldman J. Miniature Ring-Orbitron Getter Ion Vacuum Pumps // JPL New Technology Report. – 1999. – NPO–20436.
34. Capacitorr Pumps [Электронный ресурс] / SAES Getters S.p.A. – Электрон. дан. – Lainate (Milano), Italy: SAES Getters, 2006. – Режим доступа: <http://www.saesgetters.com/default.aspx?idPage=230>. – Загл. с экрана.
35. SORB-AC Cartridge Pumps [Электронный ресурс] / SAES Getters S.p.A. – Электрон. дан. – Lainate (Milano), Italy: SAES Getters, 2006. – Режим доступа: <http://www.saesgetters.com/default.aspx?idPage=233>. – Загл. с экрана.
36. Moore E., Muntz E.P., Eyre F., Myung N., Orient O., Shcheglov K., Wiberg D. Performance Analysis for Meso-Scale Scroll Pumps. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St.

- Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Performance>. – Загл. с экрана.
37. Feldman S., Feldman J., Svehla D. Pneumatically Actuated Miniature Peristaltic Vacuum Pumps // JPL New Technology Report. – 2003. – NPO–30165.
 38. Chang Z., Bar-Cohen Y. Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump // Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. – Newport: SPIE, 2001. – P. 4327-4352.
 39. Feldman S., Svehla D. Miniature Peristaltic Vacuum Pump with Magnetic Actuation. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Peristaltic>. – Загл. с экрана.
 40. Young M., Muntz E.P., Shiflett G., Green A. The Knudsen Compressor as an Energy Efficient Micro-Scale Vacuum Pump. Proceedings of the 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop [Электронный ресурс] / Center for Ocean Technology. – Электрон. дан. – St. Petersburg, FL, USA: COT, 2002. – Режим доступа: <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Knudsen>. – Загл. с экрана.
 41. Пат. 6,533,554 США, МПК⁷ F04B 019/24, F04F 001/18. Thermal transpiration pump / S.E. Vargo, E.P. Muntz, G.R. Shiflett. – № 704363 ; заявлено 01.11.00 ; опубли. 18.03.03.
 42. Никольский Ю.В. Термомолекулярный насос с полупроводниковым термоэлементом // Матер. XII науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2005. – С. 3-7.

43. Львов Б.Г., Ветров В.А. Анализ состояния миниатюрных вакуумных насосов // Вакуумная техника и технология. – 2003, Т. 13, № 3. – С. 141-151.
44. Андрейчикова О.Н. Оценка последствий в компьютерных системах принятия решений // Информационные технологии. – 1998, № 3. – С. 21-29.
45. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
46. Вишнеков А.В. Методы принятия проектных решений в CAD/CAM/CAE системах электронной техники: Учеб. пособие. В 2-х ч. – М.: МИЭМ, 1999. – Ч.1. – 85 с., Ч.2. – 78 с.
47. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. – М.: Логос, 2000. – 296 с.
48. Ларичев О.И., Стернин М.Ю. Человеко-машинные методы решения многокритериальной задачи о назначениях // Автоматика и телемеханика. – 1998, № 7. – С. 135-156.
49. Моисеева Н.К. Выбор технических решений при создании новых изделий. – М.: Машиностроение, 1980. – 181 с.
50. Ногин В.Д., Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
51. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
52. Ковалев Л.К. Машинные методы выбора аналога и структуры разрабатываемой технической системы // Проблемы машиностроения и надежности. – 1996, № 2. – С. 76-82.
53. Львов Б.Г., Ветров В.А., Соловьев И.В., Шихов А.И. Формирование эвристических моделей многокритериального выбора элементной базы вакуумно-технологического оборудования // Межвуз. сб. "Научные

- основы разработки технологий и оборудования микроэлектроники". – М.: МИЭТ, 2002. – С. 47-54.
54. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения). – М.: Машиностроение, 1998. – 476 с.
55. Глазунов В.Н. Поиск принципов действия технических систем. – М.: Речной транспорт, 1990. – 112 с.
56. Голдовский Б.И., Вайнерман М.И. Рациональное творчество. – М.: Речной транспорт, 1990. – 120 с.
57. Львов Б.Г., Батраков В.Б., Кожевников А.И. Формализация проектирования вакуумных манометров на этапе выбора ФПД // Тез. докл. II ВСМУиС "Датчики, преобразователи информации систем измерения, контроля и управления". – М.: МИЭМ, 1990. – С. 36.
58. ГОСТ 5197-85. Вакуумная техника. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 5197-70; введ. 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 36 с.
59. Ажажа В.М.; Коган В.С., Шулаев В.М. К вопросу о терминологии вакуумных насосов // Вакуумная техника и технология. – 2000. – Т. 10, № 2. – С. 43-47.
60. The generation of rough and medium vacuum: Catalog / Pfeiffer Vacuum GmbH. – Asslar, Germany: Pfeiffer Vacuum, 2003. – 68 p.
61. Шешин Е.П. Основы вакуумной техники: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2001. – 124 с.
62. Панфилович К.Б., Путиловский Ф.Д. О классификации вакуумных насосов // Матер. XII науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2005. – С. 77-79.
63. Эксплуатация вакуумного оборудования / В.И. Кузнецов, Н.Ф. Немилов, В.Е. Шемякин / Под ред. Р.А. Нилендера. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.
64. Титов В.В. Выбор целей в поисковой деятельности (методы анализа

- проблем и поиска решений в технике). – М.: Речной транспорт, 1991. – 125 с.
65. Вакуумная техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
66. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. "Вакуумная техника". – М.: Высш. шк., 1990. – 320 с.
67. Пипко А.И. Конструирование и расчет вакуумных систем / А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А. Пенчко. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.
68. Механические вакуумные насосы / Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев, Н.К. Никулин, П.И. Пластинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
69. Васильев Г.А. Магниторазрядные насосы. – М.: Энергия, 1970. – 112 с.
70. Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы. – М.: Машиностроение, 1977. – 64 с.
71. Механические вакуумные насосы / В.Д. Лубенец, В.И. Васильев, И.В. Автономова, Л.А. Беляев. – М.: Машиностроение, 1980. – 52 с.
72. Хэфер Р. Криовакуумная техника: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
73. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. – М.: Машиностроение, 1980. – 51 с.
74. Цейтлин А.Б. Безмасляные механические форвакуумные насосы / А.Б. Цейтлин, И.Ю. Гинденбург. – М.: Цинтихимнефтемаш, 1990. – 28 с.
75. Минайчев В.Е. Вакуумные крионасосы. – М.: Энергия, 1976. – 152 с.
76. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины / А.Д. Трухний, С.М. Лосев / Под ред. Б.М. Трояновского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 456 с.
77. Ануфриева И.В. Новый безмасляный двухступенчатый форвакуумный насос на основе высокочувствительного сварного сильфона // Матер. X науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2003. –

С. 179-182.

78. Петров Ю.А. Общая методология мышления / Ю.А. Петров, А.А. Захаров. – М.: Московский философский фонд, 2004. – 56 с.
79. Руднев В.Б. Формирование технических объектов на основе системного анализа / В.Б. Руднев, В.В. Володин, К.М. Луганский, В.Б. Петров. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
80. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 342 с.
81. Каменев А.Ф. Технические системы: закономерности развития. – Л.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
82. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
83. Голдовский Б.И. Рациональное творчество / Б.И. Голдовский, М.И. Вайнерман. – М.: Речной транспорт, 1990. – 120 с.
84. Голдовский Б.И. Комплексный метод разрешения проблем в технике / Б.И. Голдовский, М.И. Вайнерман. – М.: Речной транспорт, 1990. – 112 с.
85. Глазунов В.Н. Параметрический метод разрешения противоречий в технике. – М.: Речной транспорт, 1990. – 150 с.
86. Альтшуллер Г.С. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 400 с.
87. Львов Б.Г., Ветров В.А., Соловьев И.В. Логико-эвристические закономерности разрешения противоречий при проектировании вакуумного оборудования // Матер. IX науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2002. – С. 344-352.
88. Bardell R.L., Sharma N.R., Forster F.K., Afromowitz M.A., Penney R.J. Designing high-performance micro-pumps based on no-moving-parts valves // HTD. – 1997, Vol. 354, Microelectromechanical Systems

- (MEMS) ASME. – P. 47-53.
89. Esashi M., Shoji S., Nakano A. Normally closed microvalve and micropump fabricated on a silicon wafer // *Sensors and Actuators*. – 1989, Vol. 20, Iss. 1-2. – P. 163-169.
 90. Zengerle R., Ulrich J., Kluge S., Richter M., Richter A. A bidirectional silicon micropump // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1995, Vol. 50, Iss. 1-2. – P. 81-86.
 91. Пат. 20020051717 США, МПК⁷ F 04B 017/00. Miniature pump / Fukami, Tadashi. – № 867417 ; заявлено 31.05.01 ; опубл. 2.05.02.
 92. DIVAC. Diaphragm Vacuum Pumps: Leybold Vacuum Full Line Catalog 2005. Product Section C04 / Leybold Vacuum GmbH. – Cologne, Germany: Leybold Vacuum, 2005. – 24 p.
 93. Mechanical diaphragm pumps. AMD series: Catalog / Alcatel Vacuum Technology. – Annecy, France: Alcatel Vacuum Technology, 2004. – 8 p.
 94. Львов Б.Г. Формирование дерева целей проектирования вакуумного оборудования // Матер. VI науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 1999.
 95. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
 96. BOC Edwards Product Catalog 2003/04: Catalog / BOC Group plc. – Crawley, Great Britain: BOC Edwards, 2003. – 352 p.
 97. Элементы приборных устройств (Основной курс): Учеб. пособие для студентов вузов. В 2-х ч. Ч. 2. Приводы, преобразователи, исполнительные устройства / О.Ф. Тищенко, Л.Т. Киселев, А.П. Коваленко и др. / Под ред. О.Ф. Тищенко. – М.: Высшая школа, 1982. – 263 с.
 98. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
 99. Ожиганов Л.И., Якимов И.М. Применение новых информационных

- технологий в моделировании дискретных систем // Матер. науч.-техн. конф. "Нов. инф. технол. в регион. структуре – 97". – Астрахань, 1997. – С. 97-98.
100. Прицкер Б. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ. – М.: Мир, 1987. – 644 с.
101. Федоров М.Ю. Исследование структурно-декомпозиционного метода моделирования гидравлических схем // Электронное моделирование. – 1998, Т. 20, № 1. – С. 24-33.
102. Itoh A., Nakazawa M., Ueda S.C. Моделирование вакуумной системы методом конечных разностей // Journal of Society of Japan. – 1987, Vol. 30, № 5. – P. 420-424.
103. Печатников Ю.М. Современные модели и методы моделирования переходного течения разреженных газов // ЖТФ. – 2003, № 12. – С. 20-25.
104. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
105. Сырчин В.К., Ручнов С.В. Моделирование и расчет шлюзовых систем вакуумного технологического оборудования // Сб. тр. МИЭТ "Моделирование и расчет элементов и устройств технологического оборудования микроэлектроники". – 1985. – С. 9-21.
106. Львов Б.Г., Суворинов А.В., Филипчук О.И. Моделирование функционирования вакуумного тракта низковольтной электронно-оптической системы // Изв. РАН. Сер. физическая. – 1997, Т. 61, № 10. – С. 1913-1917.
107. Khurshheed A. Construction and design of a high-resolution portable scanning electron microscope column // Proc. SPIE. – 1999, Vol. 3777. – P. 116-124.
108. Coyle S.T., Shamoun B., Yu M., Maldonado J., Thomas T., Holmgren D., Chen X., Schienfein M.R., De Vore B., Gesley M. Progress toward a raster

- multibeam lithography tool // J. Vacuum Sci. Technol. B. – 2004, Vol. 22, № 2. – P. 501-505.
109. Корячко В.П. Теоретические основы САПР: Учебник / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, Н.П. Норенков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
110. Львов Б.Г., Ветров В.А. Моделирование вакуумного тракта лучепровода миниатюрного электронно-лучевого оборудования // Успехи современного естествознания. – 2004, № 4. – С. 69-70.
111. Ветров В.А., Львов Б.Г. Выбор вакуумной структурной схемы миниатюрной электроннолучевой колонны // Матер. XII науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2005. – С. 29-33.
112. ГОСТ 25663-83. Оборудование вакуумное. Насосы вакуумные механические. Методы испытаний. – Введ. 01.01.84. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 11 с.
113. ГОСТ 6636-69. Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные линейные размеры. – Взамен ГОСТ 6636-60; введ. 01.01.70. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.
114. Васин В.А., Васичев Б.Н., Степанчиков С.В., Фатьянова Н.Г. Повышение добротности колебательной системы атомно-силового микроскопа // Прикладная физика, 2012, №3. – С. 106-110.
115. Васин В.А. Двухступенчатый мембранный насос (варианты): Пат. на изобретение 2267648.
116. Васин В.А. Двухступенчатый мембранный насос (варианты): Пат. на полезную модель 39175.
117. Васин В.А. Способ изготовления корпуса и мембраны мембранного насоса): Пат. на изобретение 2261368.
118. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Нанотехнологические процессы и оборудование электронной техники. – М.: МИЭМ, 2009. – 264 с.
119. Фатьянова Н.Г., Васин В.А., Васичев Б.Н., Ивашов Е.Н., Степанчиков

- С.В. Обеспечение надёжности функционирования атомно-силового микроскопа // Надёжность, 2011, №4(39) . – С. 47-55.
120. Ануфриева И.В., Васин В.А., Кеменов В.Н. Сильфонный двухступенчатый безмаслянный насос Пат. на изобретение 2260712, опубл. 20.09.2005 в Бюлл. N%26.
121. Ануфриева И.В., Васин В.А., Кеменов В.Н. Сильфонный двухступенчатый безмаслянный насос: Пат. на полезную модель 38853, опубл. 31.03.2004 в Бюлл. N%19
122. Курманалиев Т.И., Некрасов М.И., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Определение коэффициентов трения материалов НКА, работающей в вакууме. В кн. Конструирование научных космических приборов. М.: Наука, 1985, С. 106-110.
123. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
124. Карапетян С.С. Коростелин Ю.И. Адгезионная модель трения. ДАН СССР, Машиноведение, 1980. №6. С. 100-105.
125. Трение изнашивание и смазка: Справочник в двух книгах. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 398 с.
126. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах. Т. 1. – М.: Машиностроение, 2006. – 816 с.
127. Чуларис А.А, Рогозин Д.В. Технология сварки давлением. – М.: Феникс, 2006. – 224с.
128. Степанчиков С.В. Исследование работоспособности узлов трения автоматических вакуумных манипуляторов. – В кн. Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. Тула: ТПИ, 1986. С. 106-110.
129. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Коэффициенты трения металлов. Твёрдых смазочных покрытий и антифрикционных ма-

- териалов в атмосфере и вакууме: Стандарт СТП МИЭМ 24-85. М.: МИЭМ, 1986. – 7 с.
130. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973, – 216 с.
131. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989. – 496с.
132. Александрова А.Т., Васин В.А., Горюнов А.А., Ануфриева И.В., Кеменов В.Н., Львов Б.Г Сильфонно-поршневой насос: Пат. на изобретение 2263820, опубл. 10.11.2005 в Бюлл. №31.
133. Александрова А.Т., Васин В.А., Горюнов А.А., Ануфриева И.В., Ветров В.А., Кеменов В.Н. Вакуумный насос: Пат. на изобретение 2251024 опубл. 27.04.2005 в Бюлл. №12.
134. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ.— М.: Машиностроение, 1977.- 526с.
135. Плюснин А.К., Ерданов В.И., Пин Л.Г. Проектирование механических передач приборов.— М.: Высшая школа, 1987.- 340с.
136. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Способ уменьшения трения в вакууме. Патент РФ на изобретение №2014551 – опубл. 15.06.94 в бюл. №11

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЭТ – электронная техника;

ВН – вакуумный насос;

МНН – миниатюрный низковакуумный насос;

ФПД – физический принцип действия;

РЭМ – растровый электронный микроскоп;

ТМН – турбомолекулярный насос;

JPL – Jet Propulsion Laboratory;

НГ – нераспыляемый геттер;

USC – University of Southern California;

МВН – миниатюрный высоковакуумный насос;

ТО – технический объект;

ЛПР – лицо, принимающее решение;

ОПС – объект с парными значениями свойств;

РК – регулирующий клапан;

ЭМ – электромагнит;

ВС – вакуумная система;

ВМ – вакуумный модуль;

ТЗ – техническое задание;

ВРК – впускной регулирующий клапан;

ПРК – перепускной регулирующий клапан.