

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

МОНОГРАФИЯ 6

В.А. ВАСИН Е.Н. ИВАШОВ
П.С. КУЗНЕЦОВ С.В. СТЕПАНЧИКОВ

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ

НИИТИ

Издательство НИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
2013

УДК 621.315 + 621.01/03

ББК 30.3

М 33

Рецензенты: **Глазунов В.А.**, доктор технических наук и доктор философских наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,

Шалумов А.С., доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «CALS-технологии»

М 33 **Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: Серия из 7-и монографий. Монография 6. В.А. Васин, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков. Микроинженерия магнитных устройств. – Ивантеевка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2013. – 205 с.**

ISBN 978-5-905872-13-6

Рассмотрены общие и специальные вопросы проектирования устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную технологическую среду. Представлена классификация устройств с бесконтактным взаимодействием для вакуумного оборудования, построенная на основе реализованных и перспективных технических решений. Получено выражение, позволяющее определить максимальную интенсивность изнашивания во фрикционном контакте опорного узла устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, при которой газовый поток из зоны трения равен нулю. Показаны новые технические решения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Монография предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся микро- и наноинженерией в электронном машиностроении, в том числе наноинженерией углеродных структур и может быть рекомендована аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и нанoeлектроника» профиля «Микро- и наноинженерия в электронике».

ISBN 978-5-905872-13-6

УДК 621.01/03 + 621.37/39

© В.А. Васин, Е.Н. Ивашов,

П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков, 2013

© Издательство НИИ предельных технологий, 2013

© МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013

50-ЛЕТИЮ МИЭМ ПОСВЯЩАЕТСЯ

ВВЕДЕНИЕ

Особенности электронного производства, в основе которого лежит использование физико-химических свойств вещества и процессов, протекающих на молекулярном и атомарном уровне, необходимость проведения большинства процессов в условиях высокого и сверхвысокого вакуума с контролируемым уровнем привносимых загрязнений и составом остаточной газовой среды, требуют особого подхода к процессу конструирования объектов современного электронного машиностроения, для создания которых непригодны традиционные принципы конструирования, принятые в общем машиностроении.

В большинстве случаев высокие технологии, используемые в электронном производстве, основываются на осуществлении сложных комплексных процессов, выполняемых последовательно в едином технологическом цикле на автоматических линиях и установках кластерного типа. В них предусматривается межоперационная транспортировка изделий и полуфабрикатов в герметичных условиях, а также то или иное силовое воздействие на объекты обработки.

К числу таких процессов относится выращивание монокристаллов, многослойное нанесение тонкоплёночных структур, ионное легирование, молекулярно-лучевая, ионно-лучевая и лазерная эпитаксия, сборка различных типов СВЧ приборов и многие другие процессы.

Проведение вышеупомянутых процессов в автоматическом режиме представляет собой технически сложную задачу.

Получение тонких плёнок и покрытий в вакууме, формирование остаточной газовой среды при откачке электронных приборов – всё это случаи, когда технологический процесс обработки построен не только на вы-

полнении определенного комплекса физико-химических процессов, но, кроме того, требует выполнения некоторых механических или силовых воздействий на обрабатываемые изделия, а также относительного перемещения последних внутри вакуумных технологических объёмов. Также вакуумное технологическое оборудование должно быть оснащено рядом исполнительных органов, осуществляющих указанные взаимодействия с изделием в определенной, заранее заданной, последовательности.

Для большинства технологических процессов не должна нарушаться чистота рабочего объёма и состав остаточной газовой среды.

Оптимизация конструирования вакуумного оборудования и его функциональных элементов могли бы решить все эти проблемы. Доскональное исследование многочисленных конструкций автоматизированного вакуумного оборудования радиоэлектронной промышленности и проведённые расчёты показывают, что механические устройства и системы, которые находятся в вакуумных технологических объёмах, генерируют до 50% от суммарного количества привносимых загрязнений микрочастицами и создают дополнительные газовые нагрузки, составляющие от 20% до 40% газового потока, создаваемого во время обработки изделий.

Проблемы трения, изнашивания, герметичности и снижения факторов дестабилизации среды являются основными для оценки работоспособности внутрикамерных устройств по критериям, установленным в соответствии с конкретными условиями их эксплуатации.

Другим немаловажным фактором работоспособности является способность вакуумного технологического оборудования сохранять герметичность рабочего объёма.

Одним из решений, обеспечивающих минимальное влияние на вакуумную технологическую среду по критериям привносимой дефектности, газовой выделенности и надёжности, является значительное сокращение пар тре-

ния во внутрикамерных механических системах, при использовании устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием (УБМВ).

В книге рассматриваются научно-технические задачи, связанные с разработкой методов расчёта и выбора параметров устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную среду оборудования высоких технологий и качество выпускаемых приборов, а именно:

- Теоретическое изучение работ в области создания и применения вакуумного технологического и аналитического оборудования с функциональными устройствами бесконтактного магнитного взаимодействия. Изучение конструктивных особенностей рассматриваемых устройств и материалов для них.
- Разработка математической модели и создание на её основе метода расчёта вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием на привносимый уровень загрязнений микрочастицами.
- Создание метода расчёта газовыделения из внутрикамерных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.
- Проведение комплекса экспериментальных исследований и моделирование количества и размеров микрочастиц, образующихся в опорных узлах устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.
- Изучение газовыделения из устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и газопроницаемости их тонкостенных герметизирующих элементов.
- Создание методики инженерного расчёта устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования.
- Разработка охраноспособных технических решений функциональных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, отвечающих

требованиям проведения высокоэкологичных технологических процессов в современном вакуумном оборудовании.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами микро- и наноинженерии в электронном машиностроении, в том числе наноинженерией туннельных преобразователей.

Издание может быть также рекомендовано аспирантам ВУЗов и студентам, обучающимся по направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и наноэлектроника» профиля подготовки «Микро- и наноинженерия в электронике».

ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ В ВАКУУМНОМ ОБОРУДОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Создание сверхчистой вакуумной среды в оборудовании производства изделий электронной техники

Анализ тенденций развития современного электронного производства в отечественной и зарубежной практике свидетельствует о непрерывном расширении масштабов применения высоких технологий и специального вакуумного технологического и аналитического оборудования для их реализации.

Одним из важнейших факторов, определяющих уровень и надежность оборудования этого класса, является снижение загрязнений привносимых при транспортировке изделий между функциональными устройствами оборудования, проводящими разные операции технологического процесса [1].

Решение этой проблемы имеет следующие наиболее распространенные варианты.

- Создание "чистых комнат". Этот вариант при достигнутой величине топологических размеров наиболее современных микросхем и сложности технологического цикла перестает себя оправдывать в связи с постоянным ростом чистых объемов и повышением класса чистоты.
- Выполнение технологического цикла без выхода изделий на атмосферу, достигаемое тремя разными способами [2].

1. Создание вакуумной линии с интегрированными в нее установками технологического процесса. Сейчас в линии и кластерные системы обычно объединены по несколько установок. Многие ведущие производители заявляют о создании проекта линий полного технологического цикла без выхода на атмосферу [3] (с устройствами транспортирования и хранения изделий).

2. Создание линии с контролируемой газовой средой, соединяющей установки технологического процесса. В линии создается давление газовой среды, незначительно превышающее атмосферное. Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных.

3. Создание стандартных механических интерфейсов (герметизированных контейнеров с поддерживаемым или неподдерживаемым вакуумом или контролируемой газовой средой для транспортирования и хранения изделий). Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных с учетом возможности модернизации под него устаревшего оборудования и невысокой по сравнению с другими стоимостью реализации.

Эти решения обычно комбинируются в разных вариантах кроме линий с контролируемой газовой средой, не представлены нигде в чистом виде.

Другим важнейшим фактором является не только способность оборудования формировать необходимые для соответствующих технологических процессов вакуумные условия, но и сохранять их стабильными в течение технологического цикла.

Сохранение сверхчистой вакуумной технологической среды в процессе работы высоковакуумного автоматического оборудования с размещением в рабочих объемах вакуумных камер различных функциональных систем и устройств для ориентации и перемещения изделий относительно источников технологического воздействия, их транспортирования и меж-

камерного шлюзования в многомодульных системах и т. д., является достаточно сложной комплексной задачей (рис.1.1.1).

Рабочая камера служит основным рабочим пространством в котором проводятся процессы вакуумных технологий. В ней создаются условия, необходимые для протекания технологического процесса по возможности с оптимальными режимами.

Узлы источника материала распыляемых частиц и крепления подложек с системами их нагрева являются важнейшими узлами, во многом определяющими эффективность технологического процесса. Они могут иметь различные конструктивные решения в зависимости от тех задач, которые выполняет данная установка.

Откачная и газораспределительная системы состоят из насосов, накателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, а также средств измерения разрежения или скоростей газовых потоков. Эти устройства должны обеспечивать высокую производительность откачки при высокой герметичности систем, не допускающей "натекание" при отключении средств откачки.

Системы электропитания и блокировки обеспечивают надежное и стабильное электропитание всех энергетических устройств аппарата и активную блокировку всех рабочих узлов.

Система контроля и управления состоит из набора датчиков, связанных через управляющий компьютер с исполнительными устройствами и информационными системами. Как правило, измеряются и регулируются следующие технологические параметры: скорость осаждения и толщина пленок, температура осаждения и отжига, физические свойства пленок, состав остаточных газов и др.

Системы вспомогательных устройств и технологической оснастки состоят из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и

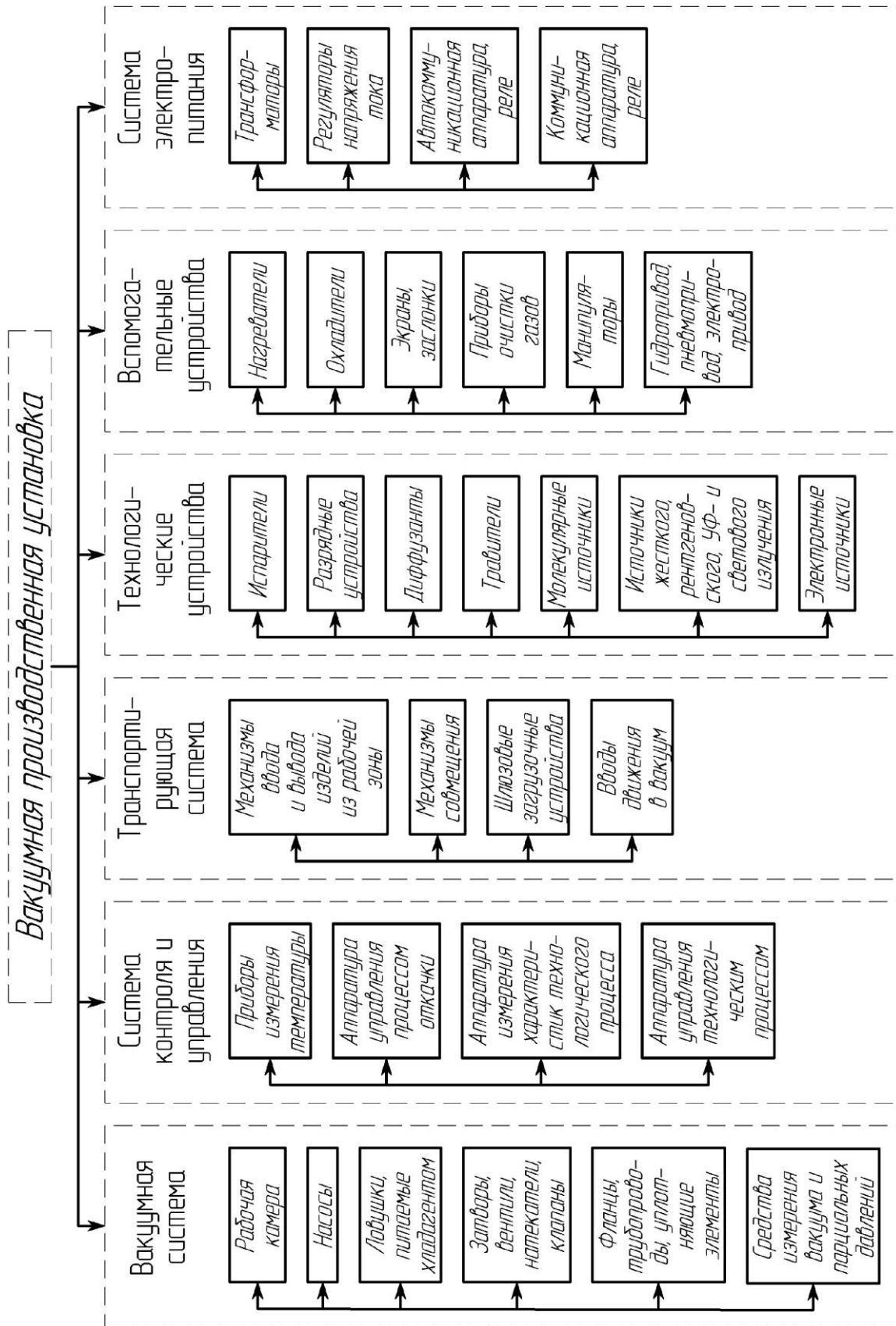


Рис.1.1.1.1. Состав современной вакуумной производственной установки

пневмоприводов, устройств очистки газов (см. рис.1.1.1).

Транспортирующие устройства состоят из устройств ввода и вывода подложек из рабочей камеры, шлюзовых устройств, механизмов совмещения и др.

В то же время автоматизация сложных технологических процессов требует размещения в рабочих объемах высоковакуумных камер ряда механических устройств, которые во многих случаях являются источниками генерации "загрязнений", так называемой привносимой дефектности вакуумной среды, в том числе наиболее опасным их видом – микрочастицами износа, при наличии в составе функциональных устройств узлов внешнего трения скольжения или качения [4].

Одним из направлений уменьшения привносимой дефектности в вакуумной технологической среде является применение устройств с минимальным количеством узлов трения, построенных на принципе бесконтактного магнитного взаимодействия.

Современное автоматизированное оборудование высоких вакуумных технологий требует особого подхода к созданию функциональных устройств различного назначения.

Несмотря на общность задач, связанных с автоматизацией производственных процессов, в различных отраслях промышленности возникают технические трудности при решении проблем создания специального автоматизированного вакуумного технологического и аналитического оборудования.

Очевидно, что дальнейшее развитие высоких технологий потребует, в числе прочих задач, ещё более высокой чистоты технологических вакуумных сред с исключением, в том числе наиболее опасного вида загрязнения – микрочастицами износа, распространяющимися из пар трения функциональных устройств.

Количество микрочастиц износа, образующихся при формировании i -го слоя от j -го узла трения в единицу времени, определяется [4]:

$$N_{ij} = \frac{J_{nij} v_{ск.ij} S_{nij}}{W_{ij}},$$

где J_{nij} , $v_{ск.ij}$, S_{nij} , W_{ij} – интенсивность изнашивания, скорость скольжения, номинальная площадь трения и средний объем микрочастицы соответственно при формировании i -го слоя от j -го узла трения.

В свою очередь, вероятность появления привносимой дефектности имеет вид

$$P_{ij} = P_{1ij} P_{2ij} P_{3ij}.$$

Вероятность вылета микрочастиц из зоны трения определяется

$$P_{1ij} = S_{3ij} / S_{nij},$$

где S_{3ij} – площадь зазора в j -й паре при формировании i -го слоя.

Вероятность попадания на поверхность подложки микрочастиц из зоны трения имеет вид

$$P_{2ij} = \frac{S_{nij}}{S_{kij} K},$$

где S_{nij} – площадь подложки;

S_{kij} – площадь днища вакуумной камеры;

K – количество кристаллов на подложке.

Вероятность того, что частица удержится на поверхности подложки, определяется

$$P_{3ij} = \cos \alpha_{ij} \cos \beta_{ij},$$

где α_{ij} – угол между нормалью к поверхности подложки и направлением движения частицы;

β_{ij} – угол наклона подложки к горизонтали.

В табл.1.1.1 приведены данные по минимальным размерам топологии тонкопленочных структур и соответствующим критическим размерам микрочастиц загрязнений, достигнутых рядом ведущих мировых фирм.

Следует отметить, что вакуумное технологическое оборудование, имеющееся в распоряжении отечественных предприятий радиоэлектронного комплекса (КМОП процесс топологических норм составляет $0,8 \div 1,5$ мкм) может быть успешно использовано в производстве микро- и нано-электромеханических систем [5].

Известно, что при наличии в составе функциональных устройств пар трения, образовавшиеся микрочастицы износа в большинстве случаев приобретают электрический заряд, благодаря которому могут мигрировать в вакуумных объемах и осаждаться на обрабатываемых полупроводниковых пластинах, снижая коэффициент выхода годных микросхем, который по параметру η "привносимой дефектности" выражается следующей зависимостью [6]:

$$\eta_r = \exp[-DA\nu P(d_{\text{ч}} - d_{\text{кр}})],$$

где D – доза привносимой дефектности;

A – площадь кристалла;

ν – доля площади кристалла, занятая микроструктурами;

$P(d_{\text{ч}} - d_{\text{кр}})$ – доля попавших на кристалл микрочастиц с размером $d_{\text{ч}}$, большим $d_{\text{кр}}$;

$d_{\text{ч}}$ и $d_{\text{кр}}$ – средний и критический размеры микрочастиц.

Отсюда выражение для дозы привносимой дефектности имеет вид

$$[D] = \frac{\ln(1/\eta_r)}{A\nu \cdot \exp(d_{\text{кр}}/d_{\text{ч}})}.$$

Так как в вакуумных камерах технологического и аналитического оборудования работают механические устройства, генерирующие привносимые загрязнения в виде микрочастиц, то, очевидно, и надежность

Таблица 1.1.1

Минимальные размеры топологии тонкоплёночных структур и соответствующие им критические размеры микрочастиц загрязнения (указаны в мкм)

Фирма	Разрешение (по поверхности/эффективное), мкм		Критический размер микрочастиц, мкм	
	2000 г.	2008 г.	2000 г.	2008 г.
FUJITSU	0,25/0,18; 0,35/0,28; 0,5/0,45	0,060	0,022; 0,032; 0,048	0,007
HITACHI	0,18/0,16; 0,2/0,18; 0,35/0,28; 0,4/0,35	0,065	0,016; 0,019; 0,032; 0,038	0,006
LG SEMICON	0,4/0,3	0,12	0,038	0,010
National Semiconductor	0,22/0,18	0,1	0,02	0,010
SIEMENS	0,25/0,22; 0,35/0,25; 0,5/0,3	0,1	0,023; 0,036; 0,05	0,009
Taiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC)		0,080; 0,065		0,010; 0,008
Texas Instrument	0,23/0,18; 0,32/0,22; 0,42/0,35	0,080	0,02	0,008
® INTEL		0,045		0,005

оборудования должна оцениваться с учетом этого фактора. Если обозначить вероятность безотказной работы оборудования $P(t)$, то:

$$P(t) = \prod_{i=1}^K P_i(t) \cdot U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}],$$

где K – количество механических устройств;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го механического устройства в составе оборудования, размещенного в вакуумной камере;

$\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}$ — текущее и допустимое значение уровня привносимой дефектности;

$U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}]$ — функция при $\Phi(t) = \Phi_{\text{доп}}$ принимает нулевое значение, и соответственно $P(t) = 0$.

Таким образом, в случае превышения уровня (дозы) привносимой дефектности D по отношению к допустимому значению при достижении некоторого времени вероятность безотказной работы оборудования принимает нулевое значение и его дальнейшая эксплуатация становится бессмысленной, то есть наибольший эффект повышения надежности вакуумного оборудования может быть достигнут в случае полного исключения привносимой дефектности со стороны действующих функциональных устройств и систем или сведения её к минимуму, при использовании устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Анализ и обобщение работ отечественных и зарубежных специалистов и ученых [6, 7, 8], а также изучение современного состояния высоких вакуумных технологий позволили регламентировать требования, предъявляемые к спектральному составу остаточной газовой среды, и парциальным давлениям составляющих компонент при проведении ответственных вакуумных технологических процессов (рис.1.1.2).

В соответствии с этим, допустимые значения парциальных давлений кислородосодержащих газов при осаждении резистивных и диэлектриче

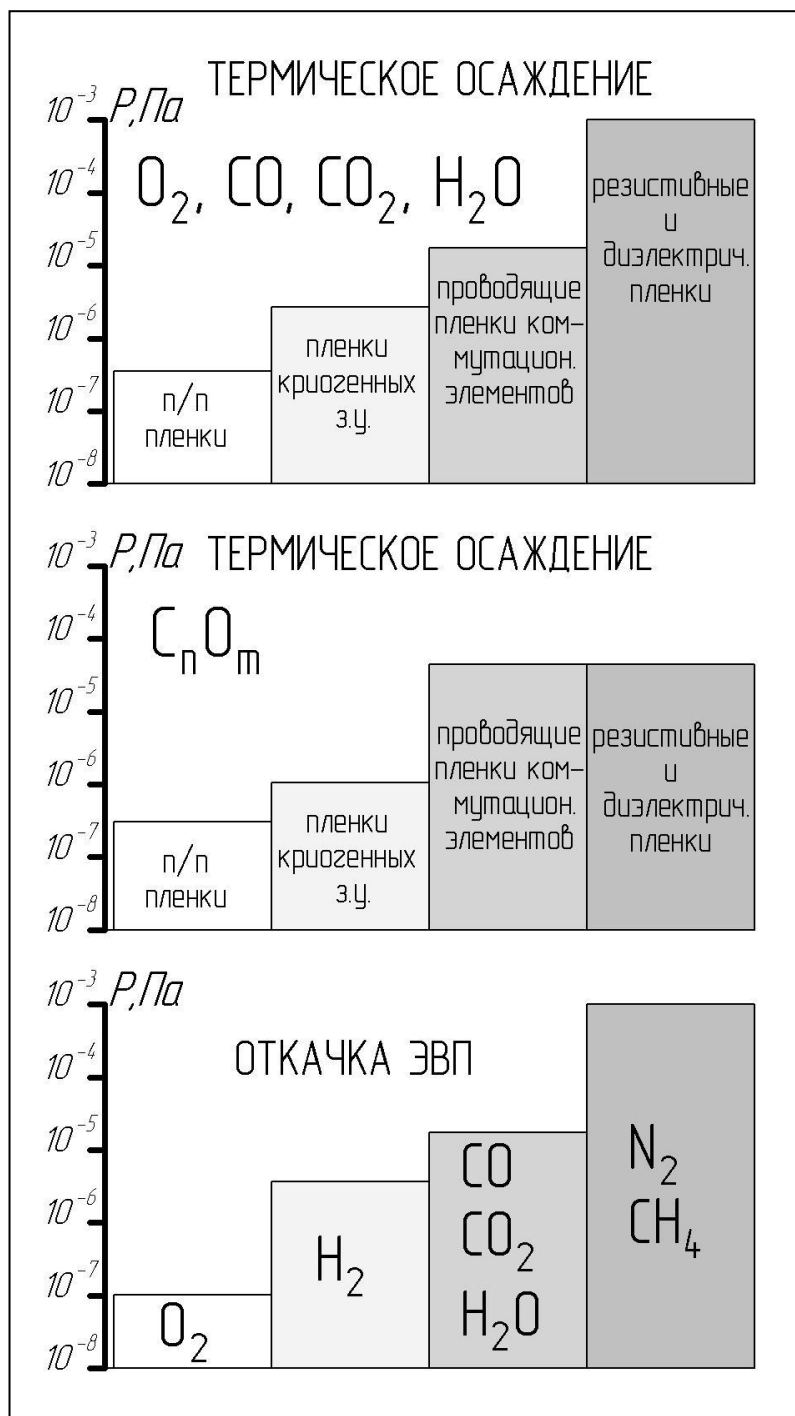


Рис.1.1.2. Контролируемые вакуумные среды

ских плёнок должно быть не более $(5 \div 10) \cdot 10^{-4}$ Па; при осаждении проводящих плёнок криогенных запоминающих устройств – не более $5 \cdot 10^{-6}$ Па; при формировании плёнок полупроводниковых соединений – не более $5 \cdot 10^{-7}$ Па; при откачке большинства СВЧ-приборов – $10^{-7} \div 10^{-5}$ Па.

Допустимые значения газов, содержащих углеводородные соединения при осаждении упомянутых выше структур, составляют $5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Высокая степень заполнения рабочих объёмов вакуумных технологических камер функциональными устройствами, наличие герметичных вводов движения в технологических объём, периодическое соприкосновение всех внутренних поверхностей и т.д., создают условия возникновения существенных и нестабильных во времени газовых потоков.

Повышение качества вакуумной среды, путем обеспечения минимальных газовых потоков и минимальной привносимой дефектности от микрочастиц, может быть достигнуто рациональным проектированием рабочих камер и внутрикамерных вакуумных устройств, в том числе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, обзор, анализ и конструктивные особенности которых представлен ниже.

1.2. Обзор и анализ вакуумного технологического и аналитического оборудования с функциональными устройствами бесконтактного магнитного взаимодействия

В разделе рассмотрено современное вакуумное технологическое и аналитическое оборудование в котором применяются УБМВ.

Разработанная в ЗАО «Научное и технологическое оборудование» (г. Санкт-Петербург) установка STE EB71 [9], представляющая собой полно-

стью автоматизированную станцию электронно-лучевого нанесения высококачественных тонкоплёночных композиций в сверхвысоком вакууме, показана на рис.1.2.1.

Станция разработана в идеологии "lab to fab" и ориентирована как на интенсивные исследования и разработки (R&D), так и на мелкосерийный выпуск продукции в составе пилотной производственно-технологической линии.

В конструкцию установки заложена возможность комплексирования и встраивания в состав роботизированных вакуумно-технологических кластерных систем.

Особенности конструкции установки:

- Безмасляная система откачки на основе производительного ионного насоса 500 л/с со встроенной азотной криопанелью/титановым испарителем либо крионасос.
- Рабочая камера из нержавеющей стали с уплотнениями типа ConFlat с интегрированным водяным охлаждением стенок.
- Три пространственно разнесённых двухпозиционных кварцевых толщиномеров, позволяющих в реальном времени оценивать несимметричность диаграммы распыления либо проводить индивидуальную калибровку датчиков на выделенные материалы.
- Водяной экран для предотвращения запыления камеры распыляемыми материалами, а также сбора и утилизации продуктов распыления.
- Манипулятор для установки держателей подложек с вращением, а также возможностью изменения расстояния подложка-испаритель в пределах 250÷400 мм.
- Автоматизированный передающий манипулятор с минимальным количеством образующихся микрочастиц износа.

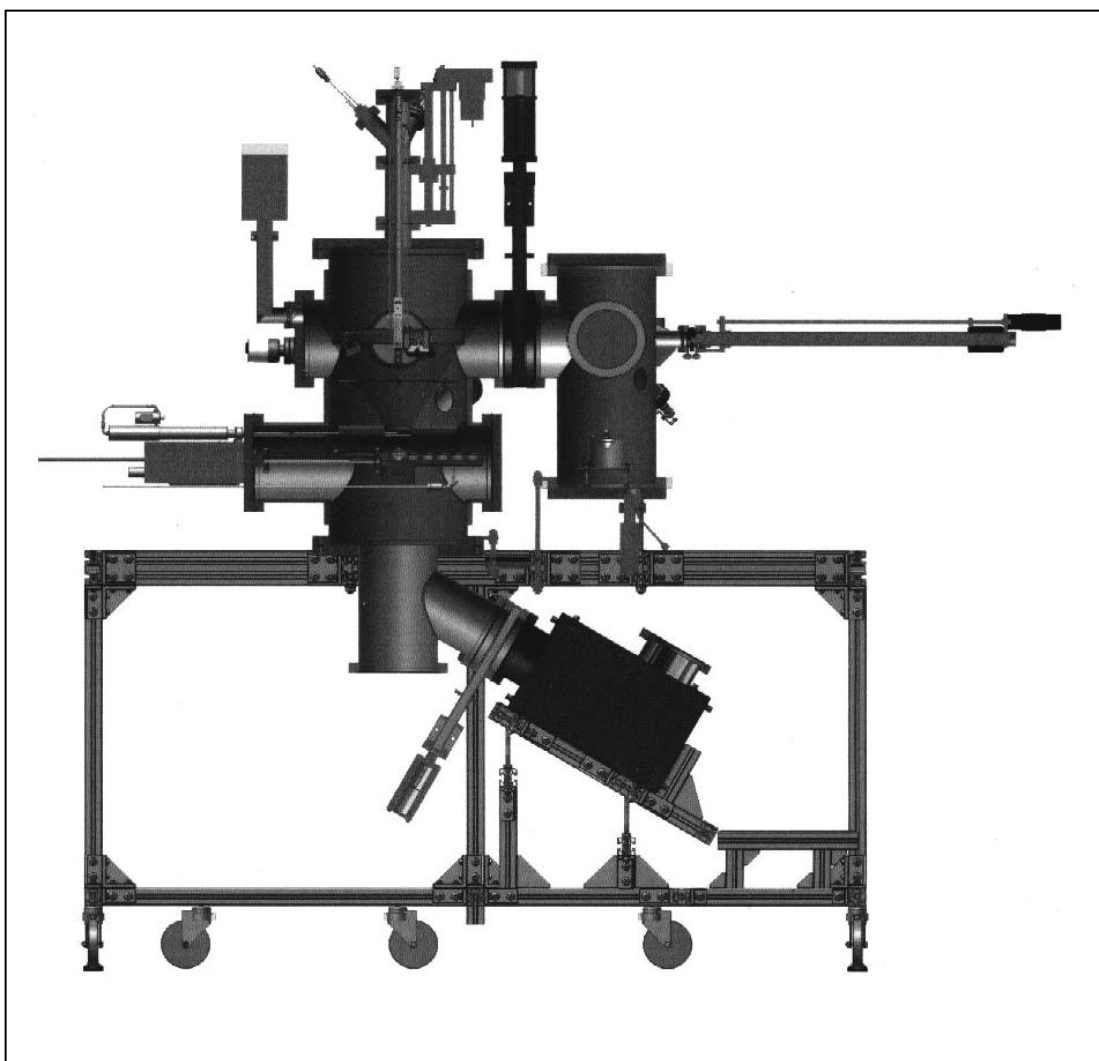


Рис.1.2.1. Автоматизированная станция электронно-лучевого нанесения высококачественных тонкопленочных композиций в сверхвысоком вакууме, предназначенная для встраивания в состав роботизированных вакуумно-технологических кластерных систем

- Автоматизированный процесс откачки установки и проведения процесса нанесения тонкоплёночных композиций.

Автоматизированный передающий манипулятор установки выполнен на основе устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

На рис.1.2.2 представлена сверхвысоковакуумная установка для реализации метода спектроскопии обратнорассеянных ионов низких энергий [10]. Метод основан на регистрации потерь энергии первичных ионов, упругоотражённых от атомов исследуемой поверхности. Величина потерь энергии однозначно связана с массой атомов поверхности.

Для загрузки исследуемых образцов и их замены на держателе, в конструкции установки использован сверхвысоковакуумный манипулятор, выполненный на основе устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием и имеющий ход перемещения 600 мм.

На основании Соглашения о содружестве, группой российских приборостроительных компаний, реализуется проект (Программа «НаноФаб»). Благодаря кооперации в рамках проекта, силами отечественного приборостроения, разработан нанотехнологический комплекс объединяющий в единую сверхвысоковакуумную систему набор технологических модулей для групповых (молекулярно-пучковая эпитаксия) и локальных (методы фокусированных ионных пучков, сканирующей зондовой микроскопии и др.) воздействий с возможностью прецизионного транспортирования и позиционирования образцов [11]. Макет нанотехнологического комплекса представлен на рис.1.2.3.

Как видно из рисунка, в комплексе используется вакуумно-транспортная система с внутрикамерными роботом и передающими манипуляторами, которые целесообразно выполнять на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

ФГУП СКБ ИРЭ РАН (г. Фрязино, Московская обл.) разработана сверхвысоковакуумная установка финишной сборки электронно-

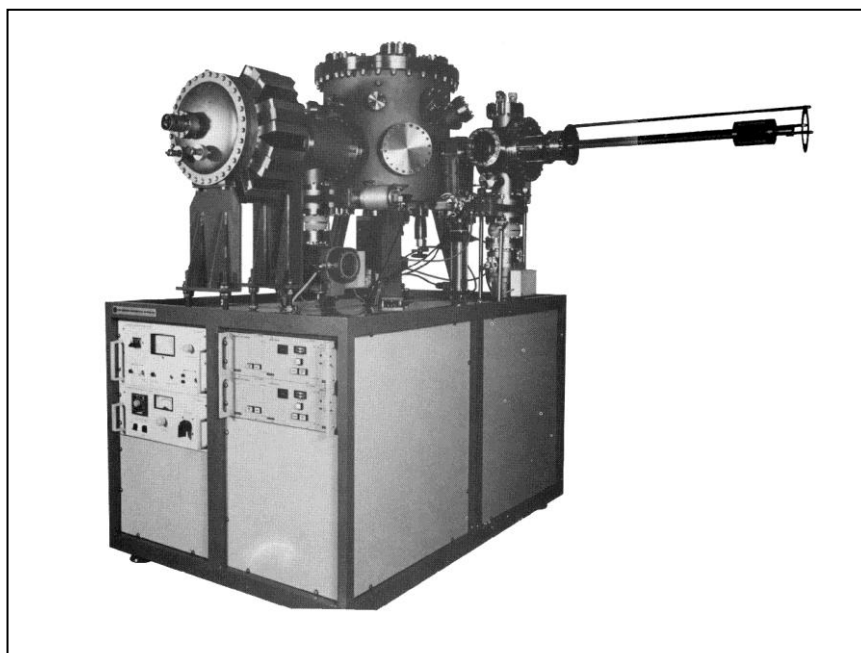


Рис.1.2.2. Сверхвысоковакуумная установка спектроскопии обратнорассеянных ионов

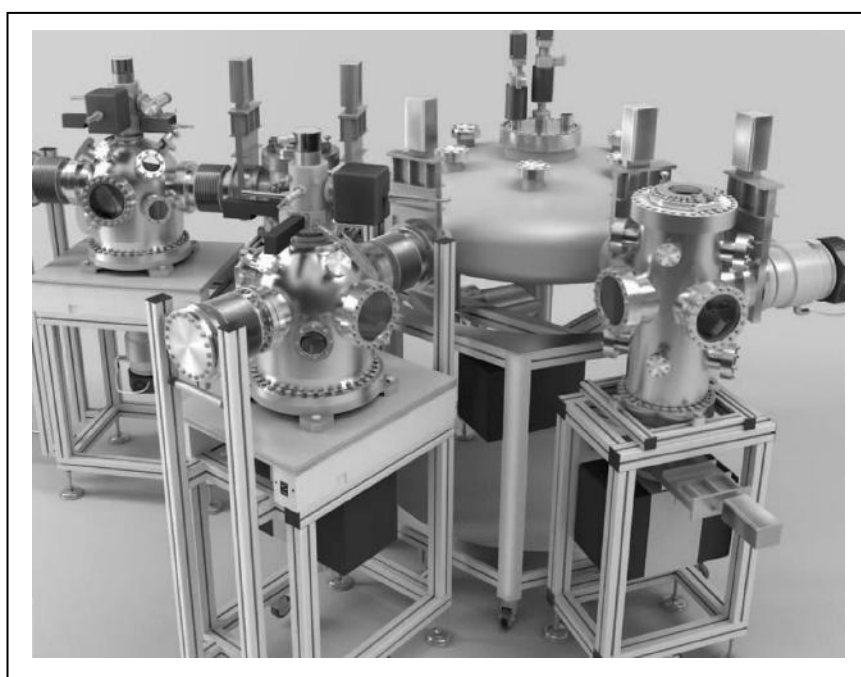


Рис.1.2.3. Нанотехнологический комплекс на базе платформы «НаноФаб-100» (макетный образец)

оптических преобразователей (ЭОП), используемых в приборах ночного видения [12].

Установка состоит из модулей загрузки, активации, герметизации, стоек питания и управления. Разработка может быть укомплектована беспылевым азотным боксом для обработки фотокатодного устройства (ФКУ) и загрузки его в контейнер с последующей установкой контейнера в камеру загрузки.

Особенности конструкции установки:

- Одновременная загрузка четырех ФКУ, в герметичном контейнере, в загрузочную камеру.
- Термическое обезгаживание ФКУ в камере активации.
- Последовательное активирование фотокатода в камере активации.
- Визуальный контроль однородности фотоэлектронной эмиссии фотокатода.
- Загрузка и термическое обезгаживание двенадцати корпусов с микроканальными пластинами (МКП) и экранами в камере герметизации.
- Одновременное электронное обезгаживание четырех МКП.
- Цезирование корпусов ЭОП.
- Перенос фотокатодного узла из камеры загрузки в камеру активации и из камеры активации в камеру герметизации.
- Перенос ЭОП с позиции на карусели в позицию герметизации.
- Одновременная герметизация двух ЭОП независимо от процесса электронного обезгаживания МКП.

Для загрузки объектов сборки, в сверхвысоковакуумном оборудовании для сборки ЭОП, использованы передающие манипуляторы на основе УБМВ.

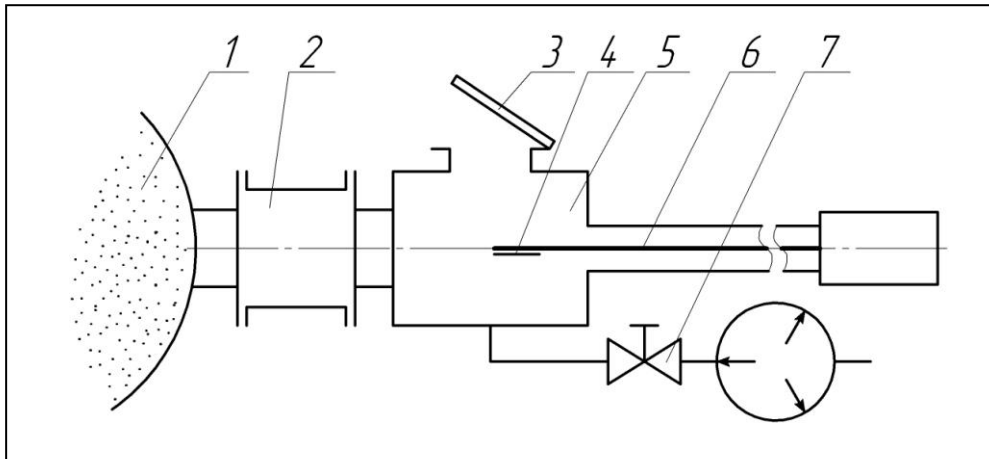
На рис.1.2.4 представлены схемы работы загрузочного шлюзового устройства [13], предназначенного для аналитико-технологических и тех-

нологических модулей сверхвысоковакуумных комплексов молекулярно-лучевой эпитаксии.

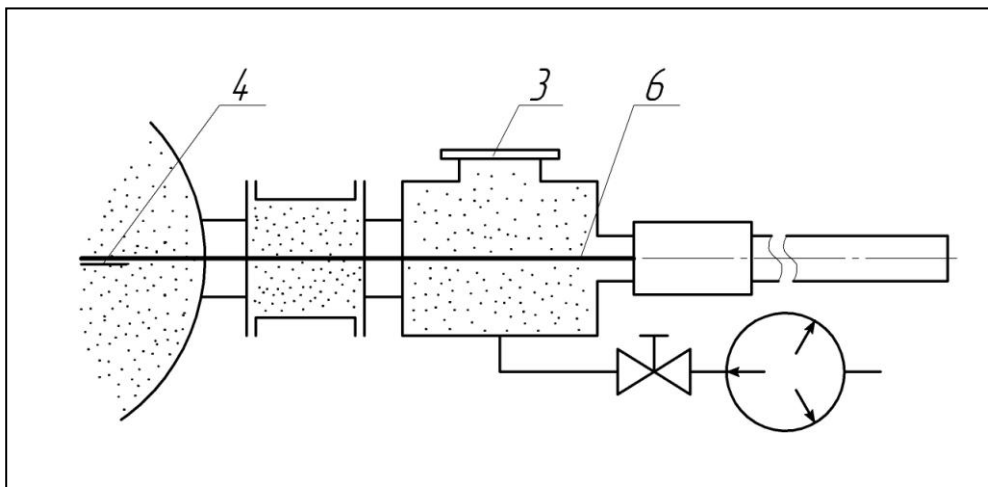
Загрузочное шлюзовое устройство содержит рабочую камеру 1, шиберные затворы 2, крышку люка 3, подложку 4, камеру загрузки 5, передающий манипулятор 6, вакуумный вентиль 7. Передающий манипулятор 6 выполнен на основе УБМВ и шариковой направляющей. Магнитная часть передающего манипулятора 6 выполнена с возможностью её отсоединения во время обезгаживающего высокотемпературного прогрева.

Лазерное вакуумное технологическое оборудование [14] пока ещё не нашло широкого применения в промышленности, но целый ряд преимуществ импульсного лазерного формирования тонких плёнок позволяет рассматривать его как перспективное. По сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией, метод лазерного испарения характеризуется более высокими плотностью пара в импульсе и энергией частиц, что делает возможным получение сплошных эпитаксиальных плёнок сверхмалых (до 2 нм) толщин при сохранении состава пленки близким к исходному материалу. Схема вакуумной технологической камеры установки лазерной эпитаксии, разработанной в НИИ «Полус» (г. Москва) представлена на рис.1.2.5. В конструкции использованы функциональные элементы на основе УБМВ.

Установка полунепрерывного действия для нанесения тонких пленок в вакууме [15], представленная на рис.1.2.6 состоит из трех частей: двух шлюзовых камер для загрузки 12 и выгрузки 3, кассет 4 и рабочей камеры 8. Каждая камера имеет свои индивидуальные форвакуумную и высоковакуумную системы, состоящие из форвакуумного насоса 1 с сорбционной ловушкой 2 и высоковакуумного паромасляного насоса 13 с азотной ловушкой, размещенной между насосом и затвором. Измерение вакуума в камерах осуществляется с помощью термпарных и ионизационных датчиков 10 и соответствующей регулирующей системы 6.



а)



б)

Рис.1.2.4. Схемы работы загрузочного шлюзового устройства для аналитико-технологических и технологических модулей:

а – подача подложки в камеру загрузки;

б – передача подложки в рабочую камеру

Принцип работы установки заключается в следующем. Вначале откачивается остаточный газ из всей установки, а затем при закрытых затворе 1 и шибере 2 напускается воздух через магнитный натекаТЕЛЬ в камеру 12. После её развакуумирования кассета помещается на направляющие планки. При достижении высокого вакуума кассета с помощью магнитной катушки 5 переводится в рабочую камеру 8. Транспортное устройство 7, обеспечивая равномерное передвижение кассеты, проводит ее над нагревателем 11, состоящим из ИК-ламп, для увеличения адгезии наносимых пленок, а затем вводит в камеру с двумя узкими щелями для нанесения пленки. Осаждение пленок осуществляется с помощью электронно-лучевого испарителя с медным водоохлаждаемым тиглем 9 в который непрерывно по мере распыления подается вещество в технологическую зону. После нанесения пленки на подложку кассета с помощью магнитных катушек извлекается из рабочей камеры в камеру выгрузки 3.

В работающей установке все время поддерживается высокий вакуум, чтобы исключить попадание атмосферного воздуха из камер загрузки и выгрузки в рабочую камеру. Для этих целей все камеры разделены между собой высоковакуумными шиберами, а от форвакуумной и высоковакуумной линий отделены затворами, клапанами магнитными (КМ), вентилями с электроприводом (ВЭП) и с ручным приводом (ВРП). Напуск воздуха в камеры и механические насосы осуществляется натекателями электромагнитными (Н) и ручными (НР).

При создании сверхвысокого вакуума важное значение имеет первоначальный прогрев установки. Последующие прогревы при работе в диапазоне давлений $10^{-7} \div 10^{-8}$ Па не обязательны, за счет чего время полного цикла сокращается до 3...2 ч, включая прогрев и получение предельного разрежения.

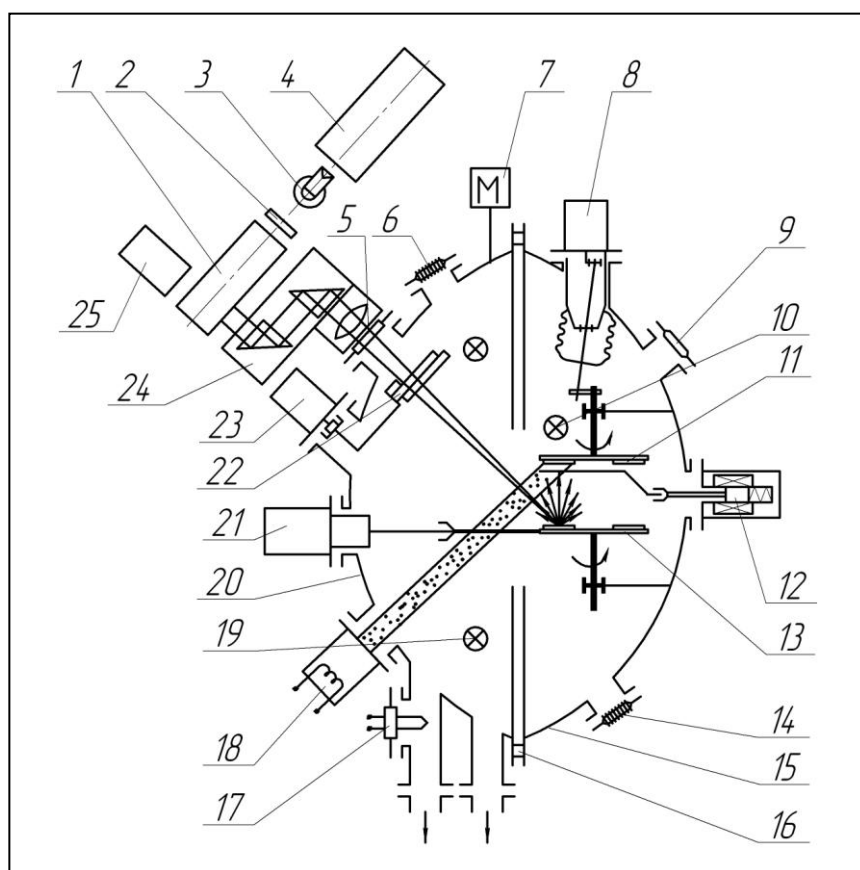


Рис. 1.2.5. Вакуумная технологическая камера установки лазерной эпитаксии: 1 – телескопическая труба; 2 – пластина; 3 – привод шторки; 4 – лазерный излучатель; 5 – оптический ввод; 6, 14 – электрические вводы; 7 – манометрический датчик; 8- ввод вращения карусели подложек; 9 – смотровое окно; 10 – нагреватель подложек; 11 – карусель подложек; 12 – магнитный привод заслонки; 13 – карусель мишеней; 15 – крышка камеры; 16 – уплотнительная прокладка; 17 – термопара; 18 – ионная пушка; 19 – лампа нагревателя технологической камеры; 20 – технологическая камера; 21 – привод смены мишеней; 22 – прозрачный экран; 23 – привод вращения экрана; 24 – привод сканирования; 25 – монокулярная насадка

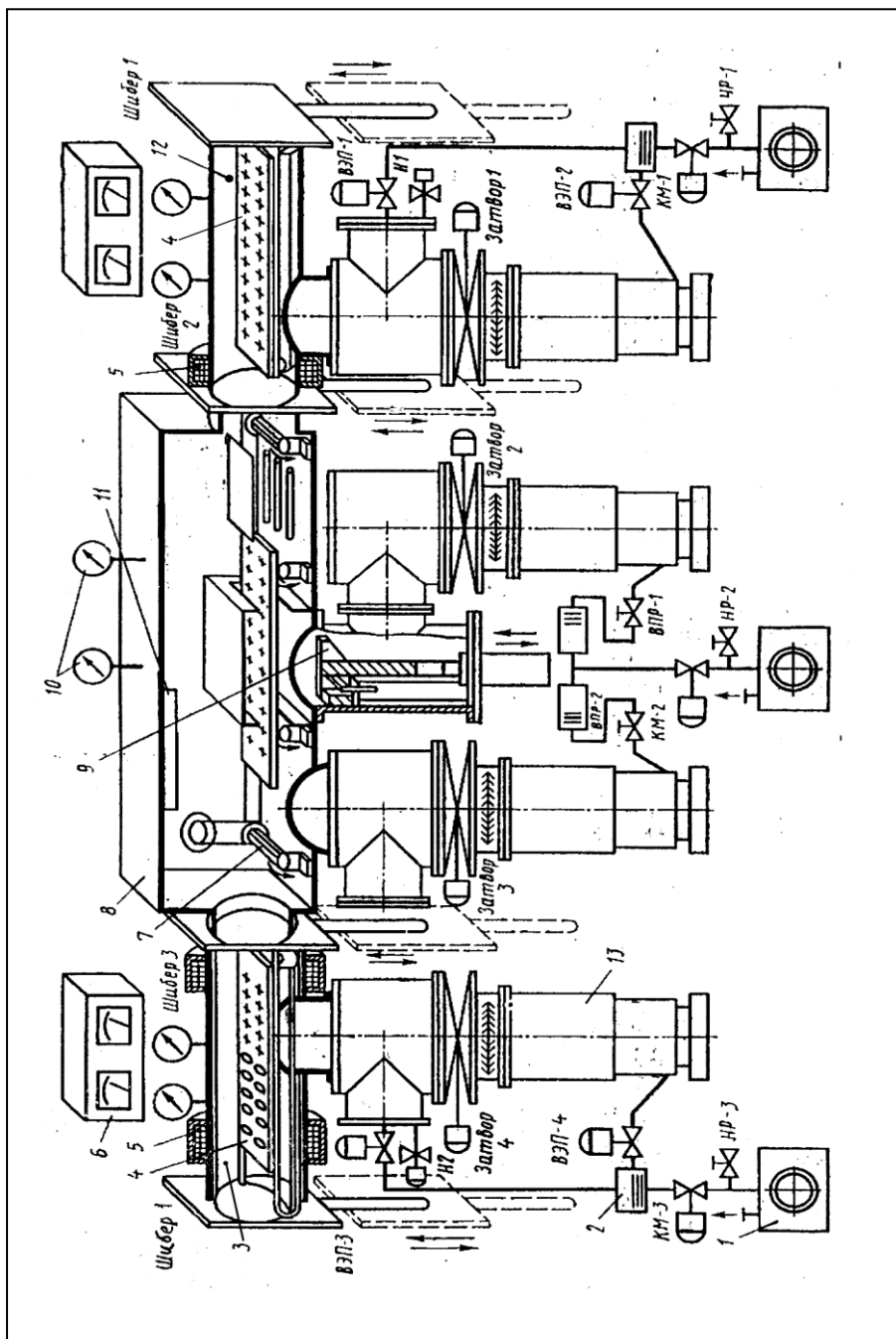


Рис.1.2.6. Схема установки полуперерывного действия для нанесения пленок: 1 – форвакуумный насос; 2 – ловушка; 3, 12 – шлюзовые камеры; 4 – плоская кассета с подложками; 5 – магнитные катушки передвигающие кассету; 6 – вакуумметр; 7 – транспортное устройство; 8 – рабочая кассета; 9 – тигель; 10 – датчик; 11 – нагреватель ИК-нагрева; 13 – высоковакуумный насос

На рис.1.2.7. представлен типовой сверхвысоковакуумный растровый электронный оже-спектрометр с послойным анализом [16].

Установка имеет в своем составе манипулятор для загрузки образцов на основе УБМВ поступательного движения и юстировочный манипулятор с вводом вращательного движения на основе УБМВ.

Производительность установки рентгенолитографии [17], вакуумно-кинематическая схема которой приведена на рис.1.2.8, зависит, в основном, от мощности источника и чувствительности рентгенорезистов.

Расчет максимальной входной мощности вращающейся мишени производится по формуле

$$W_{\max} = \frac{\pi}{2} \frac{T_m}{\sqrt{\frac{2r_{из}}{F_{из} \cdot n_{из} \cdot k_{и} \cdot C_p \cdot \gamma} \left(1 + \frac{d_{и}}{a} \sqrt{\frac{r_{из} \cdot n_{из}}{2F_{из}}} \right)}},$$

где T_m – максимальная рабочая температура поверхности излучателя; $d_{и}$ – толщина излучателя в зоне воздействия электронного пучка; $F_{из}$ – диаметр излучателя; $n_{из}$ – частота вращения излучателя; $r_{из}$ – радиус источника излучения; a^2 – температуропроводимость излучателя; C_p – удельная теплоемкость излучателя; $k_{и}$ – теплопроводность излучателя; γ – плотность материала излучателя.

Из приведенной зависимости следует, что увеличить мощность на аноде можно, лишь увеличивая его диаметр и число оборотов вращения. При разработке конструкции привода анода за основу было принято увеличение числа оборотов до 6000...10000 в минуту и диаметра излучающей дорожки в рабочей камере с давлением не хуже $6,65 \cdot 10^{-4}$ Па. Привод вращения должен давать минимальные вибрации и не загрязнять объем камеры.

Уплотнение высокооборотного вала вращающегося анода установки рентгенолитографии является наиболее ответственным узлом камеры излучения, так как от его конструкции зависит поддержание требуемой ат-

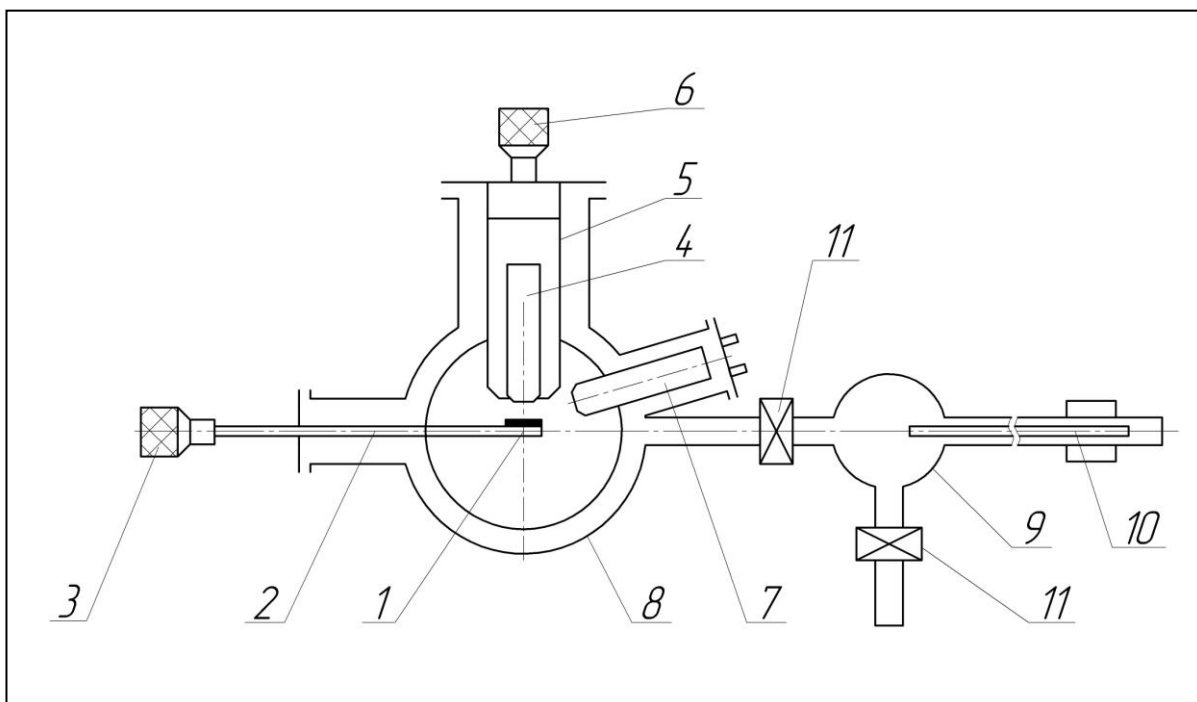


Рис.1.2.7. Сверхвысоковакуумный растровый электронный оже-спектрометр с послойным анализом: 1 – исследуемый образец; 2 – шток манипулятора юстировки образца; 3 – юстировочный манипулятор; 4 – электронная пушка; 5 – энергетический анализатор; 6 – манипулятор регулировки относительного энергетического разрешения анализатора; 7 – ионная пушка; 8 – аналитическая камера; 9 – камера загрузки; 10 –манипулятор загрузки образцов; 11 – шибберные затворы

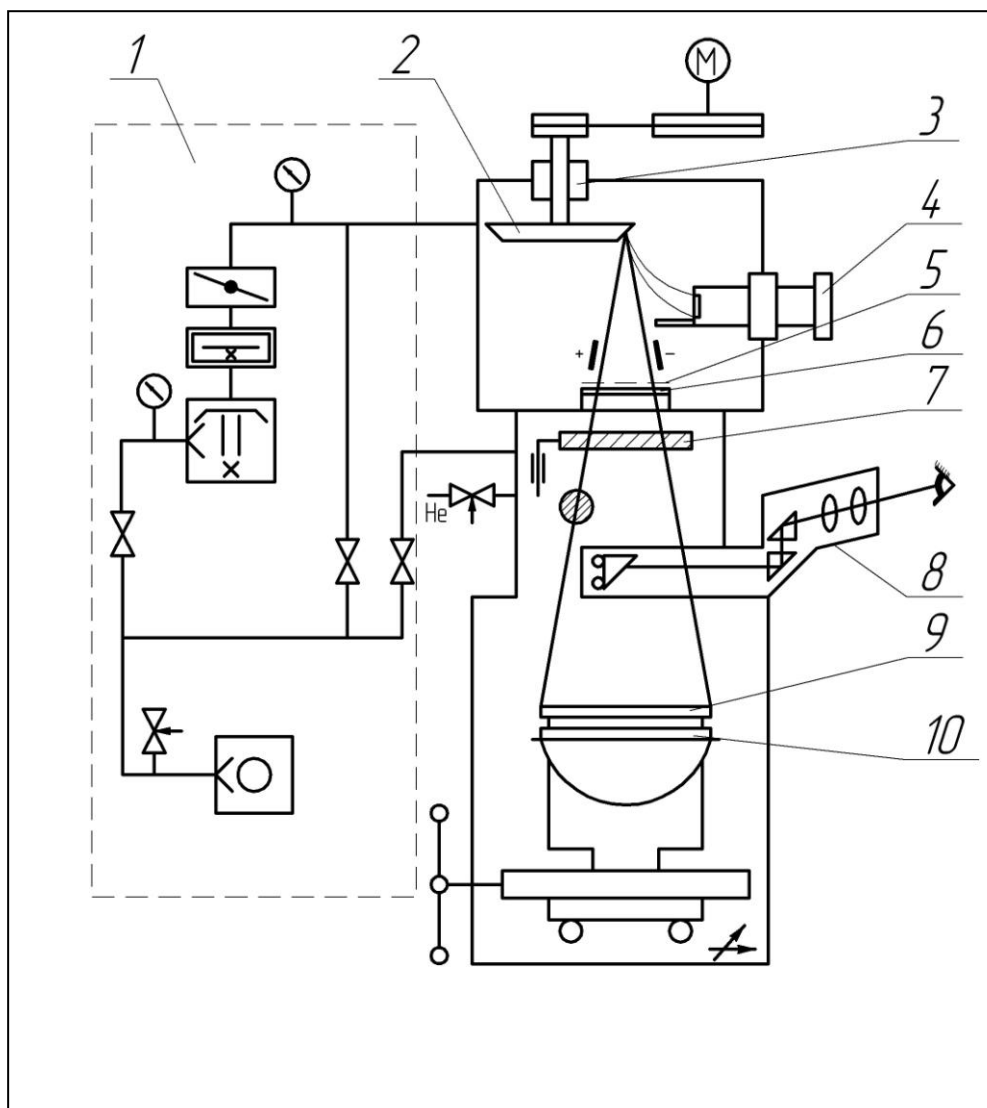


Рис.1.2.8. Вакуумно-кинематическая схема рентгенолитографической установки совмещения и экспонирования:

- 1 – вакуумная система; 2 – анод;
- 3 – магнитожидкостной ввод вращения;
- 4 – электронно-оптической система;
- 5 – сетка; 6 – мембрана; 7 – заслонка;
- 8 – микроскоп; 9 – рентгеношаблон;
- 10 – пластина

мосферы в рабочем объёме и сохранение работоспособности электронной пушки.

Конструкция вращающегося анода установки может быть выполнена как с магнитожидкостным вводом вращения, так и вводом на основе УБМВ.

На рис.1.2.9. представлена разработанная ООО «Изовак» (Республика Беларусь, г. Минск) технологическая линия горизонтального типа IzoLine H 1000 применяемая для нанесения ИТО-покрытия на стеклянные подложки методом магнетронного распыления [18].

Особенности линии:

- Отсутствие ионной очистки перед нанесением покрытий.
- Транспортная система организована на днище камеры с отсутствием трущихся частей в зоне напыления.
- Тип оборудования: in-line, т.е. движение подложек по конвейеру.
- Обработка по нескольку подложек на кассете.
- Горизонтальное расположение подложек во время обработки.
- Одноступенчатое шлюзование.
- Применение газовых затворов между технологическими станциями.
- Движение поддонов сплошной лентой.
- Модульное построение оборудования.
- Применение криогенных и турбомолекулярных насосов.
- «Чистая» транспортная система.

Технические характеристики:

- Занимаемая площадь – 21,6×3,9 м.
- Размер подложкодержателя – 625×1000 мм.
- Минимальное время цикла – 32 с.
- Распылительная система – 1 АС магнетрон 1000×100 мм, 35% использования мишени.

- Рабочее давление – $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Время достижения рабочего давления – 40 мин. (в осушенном воздухе или азоте).
- Предельный вакуум – $5 \cdot 10^{-4}$ Па (время достижения – 4 ч).

В конструкции технологической линии, среди прочих, использованы функциональные элементы с магнитным взаимодействием.

Наряду с разработкой наиболее перспективных направлений в производстве изделий высоких технологий в последнее время получили развитие направления космического производства [19].

Одним из основных направлений в области космического производства является получение высококачественных полупроводниковых материалов и полуфабрикатов изделий из них для приборов электронной техники, производство которых в космосе может оказаться наиболее рентабельно.

Также перспективным направлением является получение оптических материалов в космосе. Оптические элементы высокого качества, полученные в космических условиях, могут быть использованы для создания гибких зеркал для адаптивной оптики, элементной базы интегральной оптики, оптических элементов с однородным содержанием мелкодисперсных частиц, крупногабаритных астрономических зеркал для телескопов внеатмосферных условий эксплуатации и т.д.

Проект установки «Зона-02» [20] разработан для проведения экспериментов по зонной перекристаллизации материалов, имеющих температуру плавления до 1800°C . Установка работает в полуавтоматическом режиме. Загрузка и выгрузка образцов материалов производится космонавтом-исследователем.

Технологический блок установки разделен на два герметичных отсека (рис.1.2.10). Один отсек, в котором размещены три перемещающиеся с заданной скоростью нагреватели, вакуумируются для обеспечения лучшей теплоизоляции. Температура нагрева контролируется с помощью вольфрам-рениевых термопар, встроенных в каждый нагревательный узел. Вто-

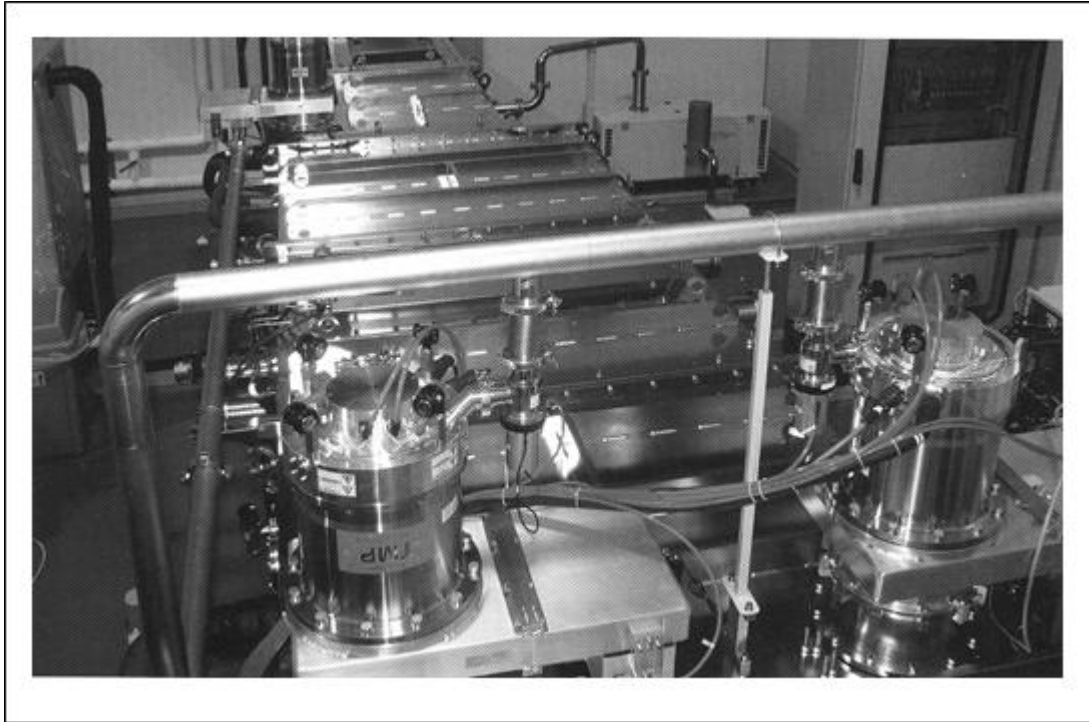


Рис.1.2.9. Технологическая линия горизонтального типа для нанесения ITO-покрытия на стеклянные подложки методом магнетронного распыления

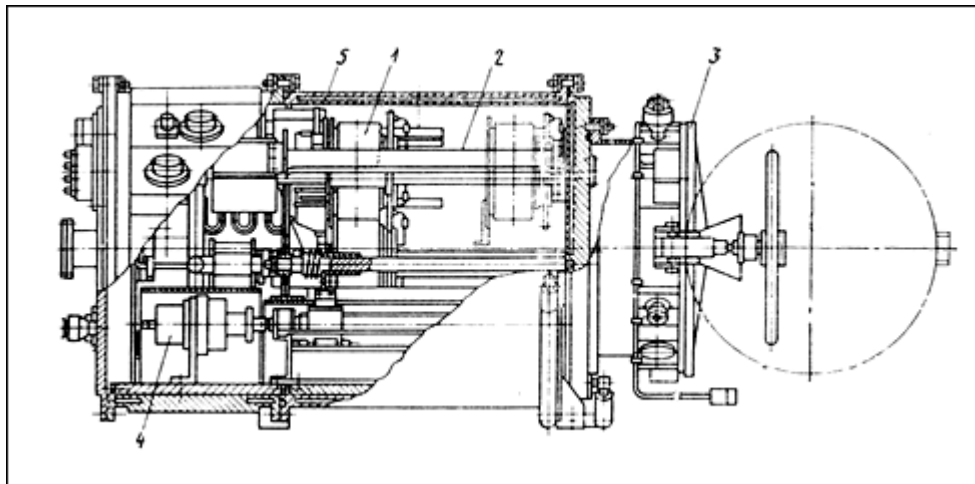


Рис.1.2.10. Схема установки «Зона-02»:

1 – нагреватель; 2 – сапфировый контейнер;
 3 – загрузочный люк; 4 – привод перемещения нагревательных узлов; 5 – рубашка водяного охлаждения

рой отсек, в который входит загрузочная камера и три рабочие, может либо вакуумироваться, либо заполняться инертным газом.

Образцы материалов имеют металлические наконечники, с помощью которых они закрепляются в рабочей камере. Стенки рабочей камеры изготовлены из прозрачных лейкосапфировых труб. Нагревательные узлы могут перемещаться вдоль рабочих камер с заданной скоростью, посредством приводов на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Основные технические характеристики установки «Зона-02»:

- Количество нагревательных узлов – 3 шт.
- Максимальная температура на нагревателе – 2000 °С.
- Потребляемая мощность – 1500 Вт.
- Диаметр обрабатываемого образца материала – до 30 мм.
- Скорость перемещения нагревателей – 0,5 ÷ 50 мм/ч.
- Ход привода перемещения – 190 мм.
- Газовая среда рабочей полости – вакуум, аргон.
- Масса – 130 кг.

Анализ современного вакуумного технологического и аналитического оборудования высоких технологий показал, что для повышения его производительности и выхода годных выпускаемых изделий необходимо создание высоконадежных, долговечных и высокоэкологических функциональных внутрикамерных устройств, обеспечивающих: критический размер образующихся микрочастиц от 0,005 до 1 мкм, газовыделение не более $10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$, частоту вращения от 0 до 10^4 об/мин; осевую нагрузку от 0,1 до 50 кН; наработку на отказ не менее 400 часов и выдержку обезгаживающего высокотемпературного прогрева. Рациональными, с этой точки зрения, являются функциональные устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Основными источниками привносимых загрязнений микрочастицами и газовыми потоками в УБМВ являются шарикоподшипники опорных узлов и тонкостенная разделительная оболочка.

Ниже, в разделе 1.3, рассмотрены конструктивные особенности внутрикамерных вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

1.3. Конструктивные особенности устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Проведенные патентно-лицензионные исследования позволили установить, что первым патентом, полученным на герметичное устройство с бесконтактным магнитным взаимодействием, является Патент США №3092763 (МПК H01d) с приоритетом от 04.06.1963 г.

В патенте предлагается устройство для передачи вращательного движения через плоскую стенку при помощи 2-х П-образных магнитов и двух соответственно расположенных магнитопроводов (рис.1.3.1).

Магнитная связь обеспечивается с помощью двух идентичных устройств, которые расположены по обе стороны стенки и состоят из П-образных магнитов и прямоугольных пластин из мягкого железа, жёстко связанных с магнитом. Пластины расположены перпендикулярно осям, соединяющим полюсы соответствующих магнитов.

Магнитный поток каждого магнита проходит через стенку и замыкается через пластину, относящуюся к другому магниту.

Вакуумный ввод вращательного движения с бесконтактным магнитным взаимодействием, представленный на рис.1.3.2 включает в себя следующие основные части [21]. Во втулке 10 на подшипниках качения установлен ведомый вал 1 с закрепленным на нём якорем 4. В качестве герметизирующего элемента использован стакан 3 из коррозионно-стойкой ста-

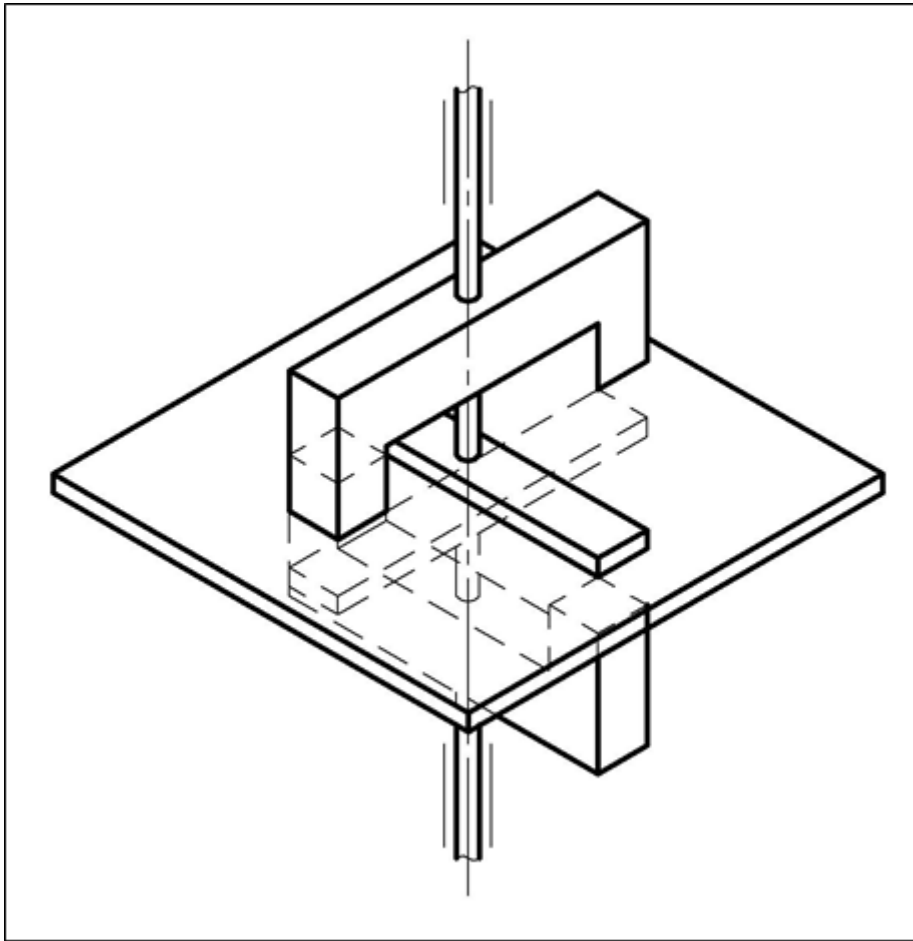


Рис.1.3.1. Устройство для передачи вращательного движения через плоскую стенку при помощи 2-х П-образных магнитов и двух магнитопроводов

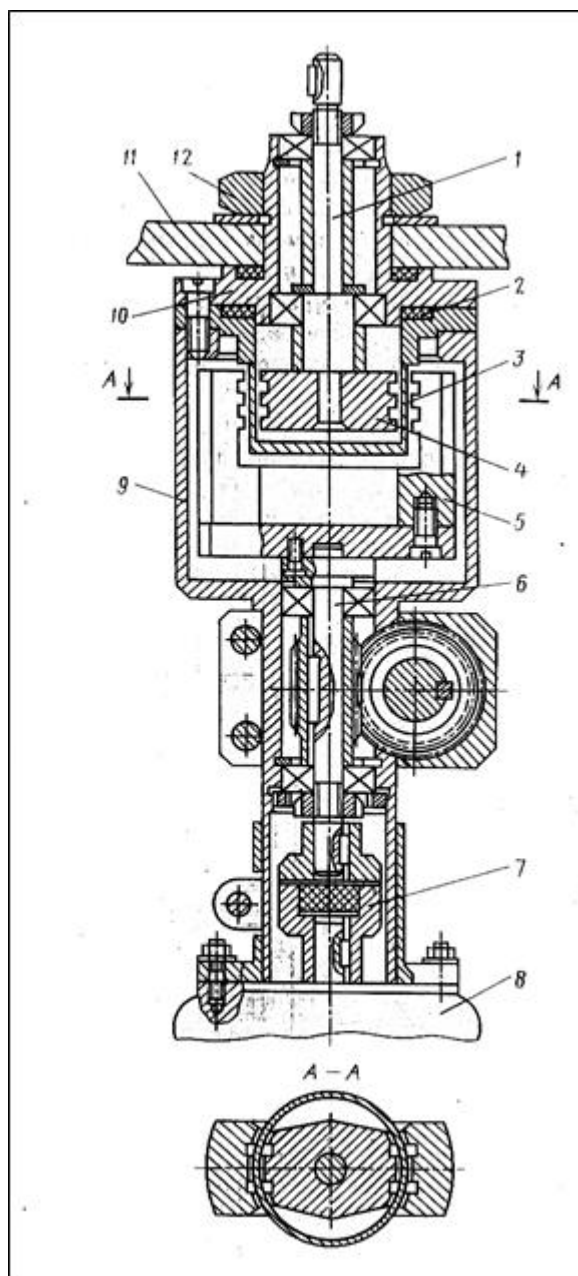


Рис.1.3.2. Вакуумный ввод вращательного движения с бесконтактным магнитным взаимодействием:
 1 – ведомый вал; 2 – прокладка; 3 – стакан; 4 – якорь; 5 – магнит; 6 – ведущий вал;
 7 – упругая муфта; 8 – электродвигатель;
 9 – корпус; 10 – втулка; 11 – стенка вакуумной камеры; 12 - гайка

ли. Толщина стенки стакана, расположенного в магнитном промежутке составляет 0,5 мм. Вакуумная полость стакана герметизирована прокладкой 2. На ведущем валу 6 закреплены башмаки постоянного магнита 5.

Ведомый вал 1 соединен упругой муфтой 7 с валом электродвигателя 8. Корпус ввода вращательного движения прикреплен к стенке 11 вакуумной камеры гайкой 12.

При передаче вращательного движения от электродвигателя 8 на магнит 5 под воздействием магнитного потока якорь 4 и, соответственно, ведомый вал 1 следуют за вращением магнита 5, обеспечивая рабочий крутящий момент на ведомом валу 1. Представленный ввод обеспечивает передачу в вакуум сравнительно небольшого крутящего момента с частотой вращения до 3000 об/мин.

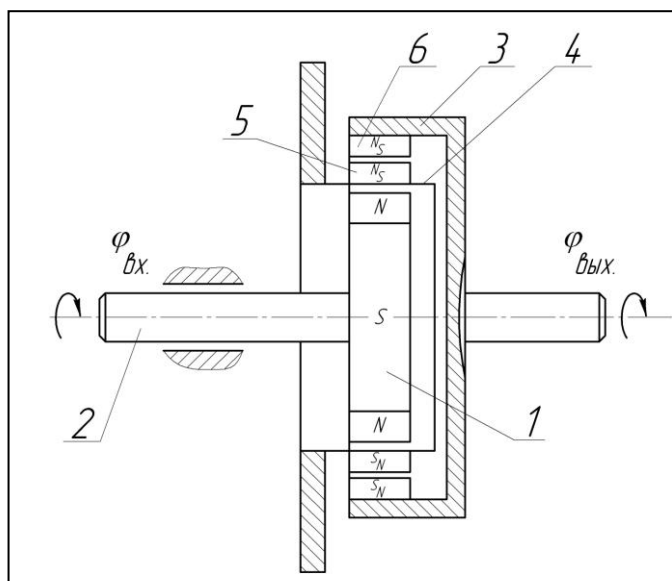
На рис.1.3.3 представлена магнитная муфта-редуктор, предназначенная для передачи вращения в герметизированный объем [22].

Магнитный поток постоянного магнита ротора 1 замыкается через постоянные магниты 5 и 6, установленные на герметизирующем стакане 4 и на зубцах обоймы 3. При этом обойма занимает положение, соответствующее максимальной магнитной проводимости, имеющей место при расположении двух постоянных магнитов 6 обоймы 3 против двух постоянных магнитов 5 стакана 4. При повороте ротора 1 на угол $\varphi_{\text{вх.}}$, равный шагу магнитов, расположенных на стакане 4, обойма 3 поворачивается на угол $\varphi_{\text{вых}}$ соответствующий разности шагов магнитов обоймы и герметизирующего стакана:

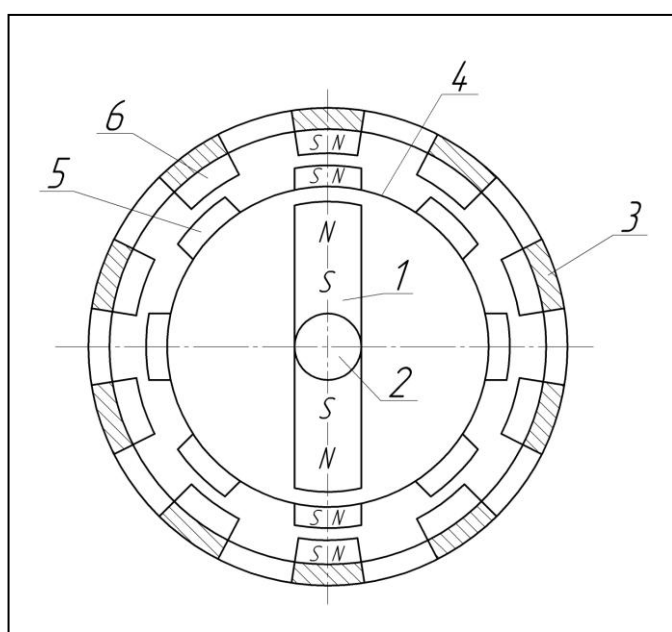
$$\varphi_{\text{вх}} = \frac{2\pi}{Z_0}; \quad \varphi_{\text{вых}} = 2\pi\left(\frac{1}{Z_c} - \frac{1}{Z_0}\right),$$

где Z_0 – число магнитов на зубцах обоймы;

Z_c – число магнитов на герметизирующем стакане.



а)



б)

Рис.1.3.3. Магнитная муфта-редуктор:

а – продольный разрез;

б – поперечное сечение:

1 – ведущий ротор; 2 – ведущий вал;

3 – обойма; 4 – герметизирующий стакан;

5, 6 – постоянные магниты

Передаточное число муфты-редуктора:

$$i = \frac{\varphi_{\text{ВХ}}}{\varphi_{\text{ВЫХ}}} = \frac{Z_0}{Z_0 - Z_c}.$$

Применение предлагаемой магнитной муфты-редуктора позволяет с высокой надежностью передавать вращение в герметизированный объем.

Вводы с постоянными магнитами могут иметь множество модификаций. Самая распространенная их них – магнитная муфта. Её статор, собранный из кольцевых постоянных магнитов, находится в атмосфере, а ротор – в вакууме. Они также разделены тонкостенной перегородкой. Для передачи движения в вакуум статор приводят во вращение. Движение ротора не синхронно статору.

Модификация ввода с постоянным магнитом для осуществления комбинированного (вращательного и поступательного) движения показана на рис. 1.3.4. Вращение или вертикальное перемещение кольцевого постоянного магнита заставляет вращаться или перемещаться шток находящийся в вакууме.

Пример конструкции ввода с электромагнитом представлен на рис. 1.3.5. Якорь, находящийся в атмосфере, при перемещении сообщает качательное движение заслонке, расположенной в вакууме. Модификации магнитных вводов движения в вакуум описаны в работе [23].

Для установок электронной и ионной спектроскопии и молекулярно-лучевой эпитаксии разработан ряд передающих манипуляторов в состав которого входят, в том числе, два типоразмера вакуумных магнитных передающих манипуляторов (рис.1.3.6) [24].

Планетарный резьбовой ввод с магнитной муфтой в качестве источника движения [25] представлен на рис.1.3.7.

Магнитная пара 6 и 5 установлена на герметичный корпус 1 механизма. В отверстии внутреннего магнита 5 размещается охватывающая гайка 4 с кольцевыми канавками. Преобразование вращательного движе-

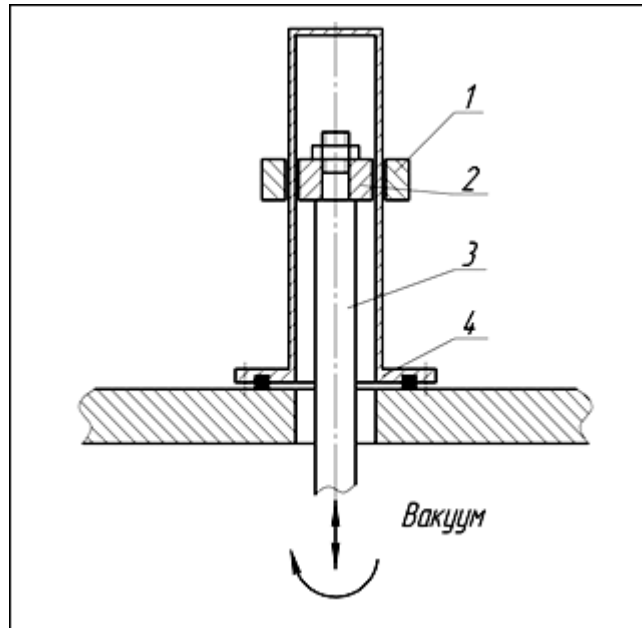


Рис.1.3.4. Бесконтактный ввод движения в вакуум с постоянными магнитами радиального типа:
 1 – наружный магнит; 2 – внутренний магнит;
 3 – ведомый вал; 4 – герметичная перегородка

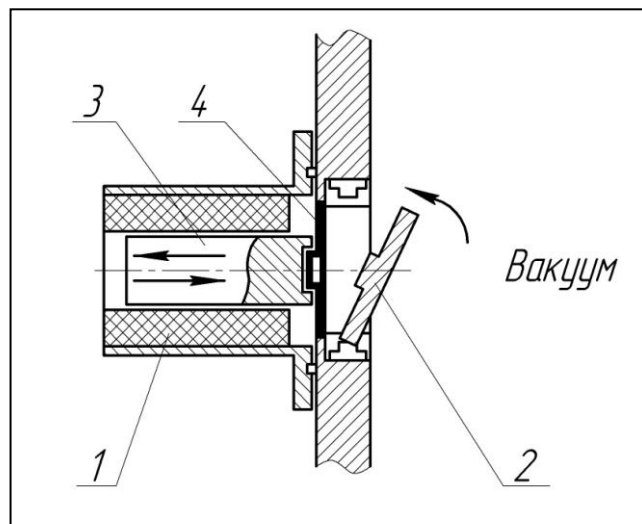


Рис.1.3.5. Бесконтактный ввод движения в вакуум соленоидного типа с якорем в атмосфере:
 1 – электромагнитная катушка соленоида;
 2 – исполнительное звено; 3 – якорь;
 4 – тонкая немагнитная диафрагма

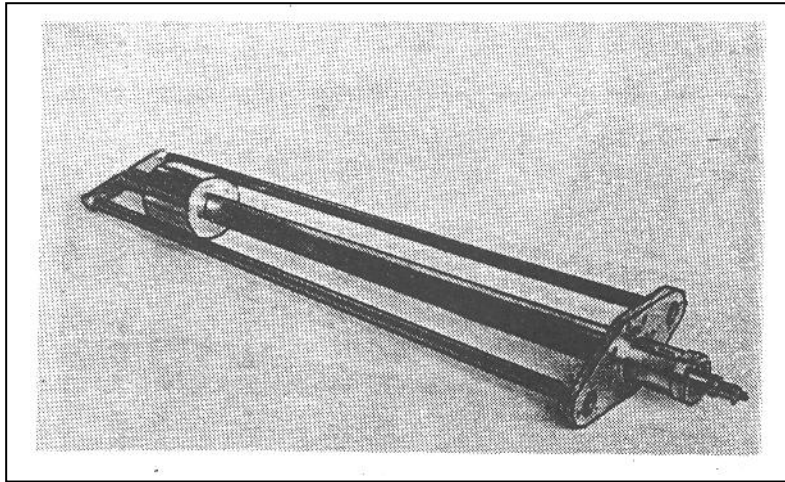


Рис.1.3.6. Вакуумный передающий манипулятор:

способ передачи движения в вакуум – магнитный;
 количество степеней подвижности – 2; ход штока
 манипулятора – 600 и 1000 мм; вращение вокруг оси –
 360°; осевое усилие – не менее 20 Н

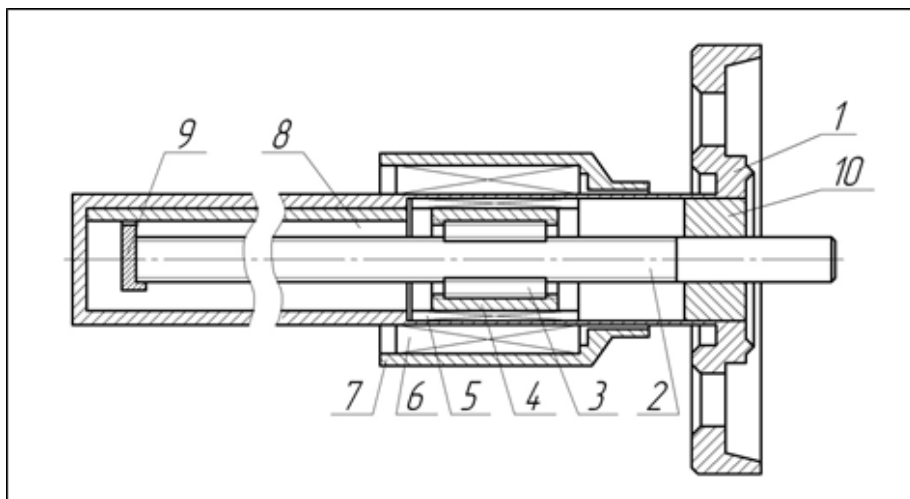


Рис.1.3.7. Планетарный резьбовой ввод движения в вакуум с магнитной муфтой:

1 – герметичный корпус; 2 – винт; 3 – ролики;
 4 – охватывающая гайка с кольцевыми канавками;
 5 – внутренний магнит; 6 – наружный магнит;
 7 – входное звено вращательного движения;
 8 – шпонка; 9 – ползун; 10 – направляющая

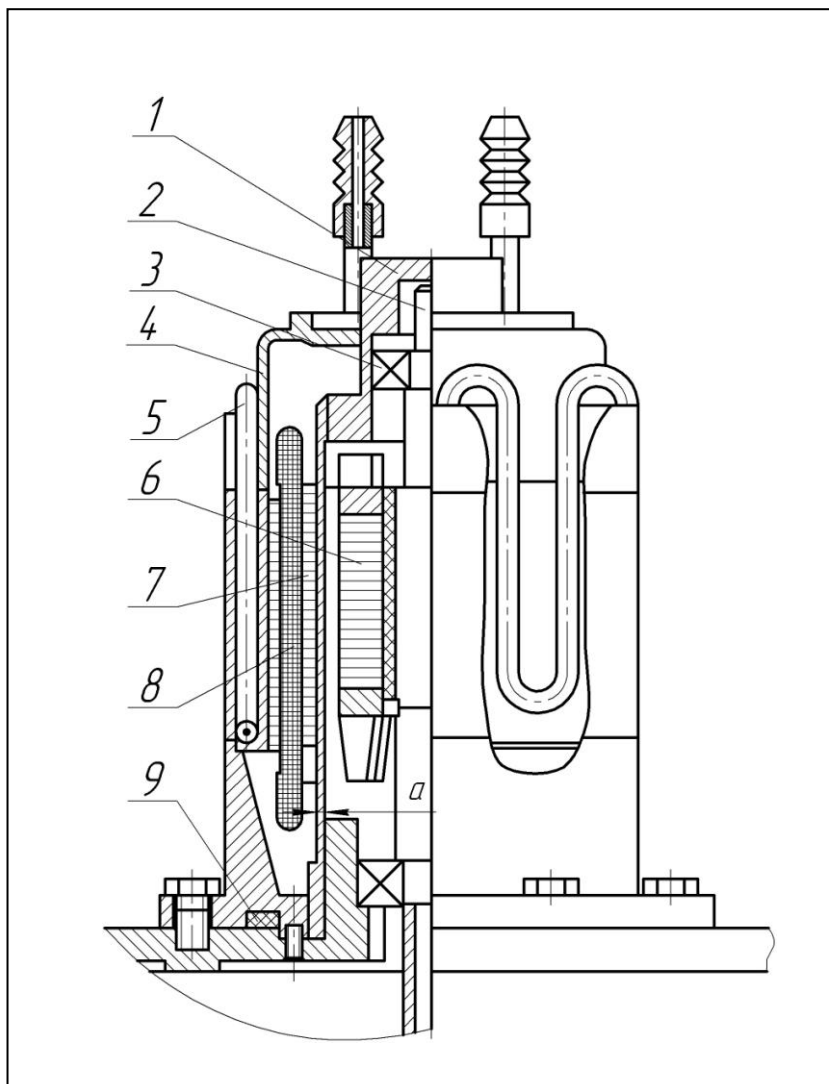


Рис.1.3.8. Электромагнитный ввод вращения в вакуум на базе асинхронного двигателя:
 1 – глухой герметичный стакан; 2 – вал двигателя; 3 – шарикоподшипник; 4 – корпус статора; 5 – трубка принудительного охлаждения; 6 – ротор; 7 – тонкая герметичная немагнитная стенка; 8 – обмотка статора; 9 – соединительное уплотнение

ния магнитов 6 и 5 и гайки 4 в поступательное перемещение винта 2 по направляющей 10 осуществляется за счет промежуточных роликов 3 с нулевой заходностью резьбы. Винт 2 фиксируется от проворота ползуном 9 и шпонкой 8.

Наличие многоточечного контакта в роликовой паре позволяет значительно повысить нагрузочную способность передачи и увеличить точность перемещения. На рис.1.3.8. показан электромагнитный ввод вращения в вакуум, представляющий собой короткозамкнутый асинхронный двигатель, у которого ротор с валом отделены от статора и атмосферы герметичной стенкой (экраном) с глухой втулкой, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, внутри расположены подшипники [26]. Охлаждение статора осуществляется водой, протекающей по трубке вмонтированной в корпус статора.

Герметизация экрана в месте соединения с вакуумной камерой достигается резиновым уплотнением. Замена резинового уплотнения металлическим позволит прогревать ввод для обезгаживания, что делает его пригодным для использования в сверхвысоковакуумных системах. Толщина герметизирующей стенки a должна быть значительно меньше глубины проникновения магнитного поля Δ в материале стенки (т.е. $a/\Delta \ll 1$), так как от соотношения этих величин зависит относительное количество энергии, теряемой на образование вредных вихревых токов.

Конструкция типового ввода вращения на основе магнитной композиции [27] показана на рис. 1.3.9. Ввод состоит из корпуса 1 с расположенным в нем на опорах валом 2, передающим крутящий момент. Герметизация вращающегося вала осуществляется магнитной композицией 3, удерживаемой в зазоре между валом и неподвижными полюсными наконечниками 4 магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом 5. Неподвижные стыки герметизируются прокладками 6 из вакуумной резины.

В качестве жидкости-носителя служит вакуумное масло ВМ-1, ВМ-5,

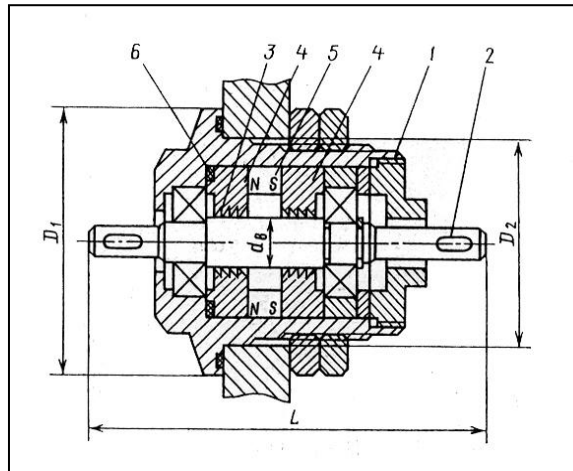


Рис.1.3.9. Конструкция типового ввода вращения на основе магнитной композиции

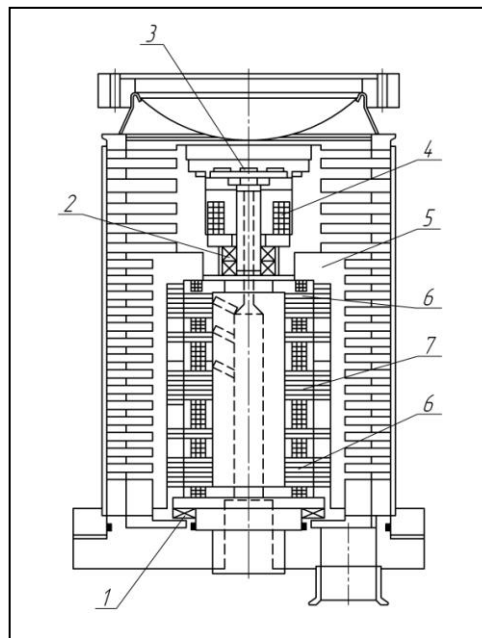


Рис.1.3.10. Конструктивная схема турбомолекулярного вакуумного насоса «Turbovac – 550M» с магнитной подвеской ротора:

1 – нижняя часть стержня; 2 – верхняя часть стержня; 3 – опорный стержень; 4 – осевой магнитный подшипник; 5 – полый ротор; 6 – радиальный магнитный подшипник; 7 – электродвигатель

ПФМС-2/5л, ПФМС-13, ФМ-1, 5Ф4Э или М-5Ф4М, а магнитные частицы игольчатой формы вводятся в жидкость в виде порошка Fe_2O_3 или CrO_2 . Поток газа через ввод вращения состоит из паров жидкости-носителя и потока газопроницаемости через магнитную композицию. Давление пара, например масла ФМ-1, при температуре 293 К составляет $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па, а масла 5Ф4Э – $1,3 \cdot 10^{-9}$ Па. Поток газонатекания через подвижный контакт практически отсутствует.

Такие вводы могут работать при скоростях скольжения вала до 15 м/с. При этом практически отсутствует износ уплотняемых поверхностей, а момент сопротивления вращению в 7÷10 раз меньше по сравнению с вводами вращения, имеющими контактное уплотнение.

Эффект бесконтактного магнитного взаимодействия может быть также использован в магнитных опорах.

Фирмой «LEYBOLD AG» (Германия) разработан промышленный образец турбомолекулярного вакуумного насоса «Turbovac – 550М» с магнитными опорами ротора (рис.1.3.10.) [28].

Ротор турбомолекулярного насоса подвешен на одной осевой и двух радиальных магнитных опорах.

Внутри полого ротора 5 расположен опорный стержень 3. Между двумя радиальными магнитными подшипниками 6 размещен электродвигатель 7. В верхней части ротора расположен осевой магнитный подшипник 4. В нижней 1 и верхней 2 частях стержня установлены шарикоподшипники с трением без смазочного материала, на которые ротор садится при остановке вакуумного насоса и аварийном отключении электропитания.

При работе турбомолекулярного вакуумного насоса, то есть при вращении ротора, между наружными кольцами шарикоподшипников и ротором устанавливается зазор примерно 0,1 мм и шарикоподшипники не работают. При остановке насоса зазор выбирается и ротор тормозится на

шарикоподшипниках.

Применение магнитных подшипников в конструкции насоса сводит к минимуму трение в опорах ротора и образование загрязняющих микрочастиц износа, снижает уровень вибраций.

К недостаткам турбомолекулярного вакуумного насоса можно отнести сложность системы управления и системы балансировки ротора, недостаточную жесткость магнитных опор, исключая произвольное размещение насоса в пространстве (допустимое отклонение от вертикали составляет не более 15°).

Ниже, в работе, приведены сведения о материалах используемых в вакуумных функциональных устройствах с бесконтактным магнитным взаимодействием.

1.4. Материалы устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Вакуумные УБМВ должны удовлетворять ряду условий, определяемых спецификой высокотехнологичного производства, а именно:

- возможностью прогрева до температуры обезгаживания;
- устойчивостью к вибрации и другим механическим воздействиям;
- устойчивостью, в ряде случаев, к излучению и радиации;
- высокими магнитными свойствами;
- высокой стабильностью магнитных свойств при наличии внешних переменных магнитных полей.

По технологическому признаку, с учётом химического состава, постоянные магниты можно разделить на следующие группы [29]:

- Ковкие, закаливаемые на мартенсит стали.

- Ковкие безуглеродистые стали на основе α -железа; железокобальтомолибденовые сплавы, имеющие коэрцитивную силу по индукции $H_{CB}=12\div 28$ кА/м и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}=10$ Тл·кА/м. Здесь B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля, кА/м.
- Литые сплавы на основе систем железо-никель-алюминий и железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты имеют максимальное энергетическое произведение до 96 Тл·кА/м.
- Сплавы с драгоценными металлами. В сплавах на основе железа и кобальта с платиной максимальное энергетическое произведение достигает 76 Тл·кА/м.
- Прессованные постоянные магниты из порошков системы железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты просты в изготовлении и не требуют механической обработки, но имеют более низкие магнитные свойства, чем литые магниты.
- Металлокерамические постоянные магниты из сплава системы железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты изготавливаются методом порошковой металлургии, и магнитные свойства их несколько хуже, чем у литых магнитов.
- Постоянные магниты на основе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами. Эти постоянные магниты имеют высокую коэрцитивную силу по индукции и по намагниченности, и максимальное энергетическое произведение до 240 Тл·кА/м.
- Магнитопласты и магнитоэласты. Они имеют низкие магнитные свойства, однако эти магниты весьма технологичны.

Все постоянные магниты, применяемые в различных УБМВ, могут быть разделены по своим магнитным свойствам на два больших класса: магниты у которых коэрцитивная сила по индукции значительно меньше

(в 4÷20) отношения $\frac{B_r}{\mu_0}$, и постоянные магниты, у которых коэрцитивная

сила по индукции приближается к отношению $\frac{B_r}{\mu_0}$.

До настоящего времени в различных магнитных системах в основном находили применение постоянные магниты первого класса, к которому можно отнести литые магниты ЮНДК25БА, ЮНДК35Т5, ЮНДК38Т7И. Эти магниты, за исключением ЮНДК38Т7И, который занимает промежуточное положение, характеризуются следующими свойствами:

- магниты имеют высокое значение остаточной индукции $B_r = 0,9 \div 1,4$ Тл;
- коэрцитивная сила по индукции $H_{св} \leq 150$ кА/м;
- коэрцитивная сила по намагниченности значительно меньше отношения

$$\frac{B_r}{\mu_0} \text{ (табл.1.4.1).}$$

- максимальное энергетическое произведение не превышает 100 Тл·кА/м;
- значение намагниченности магнита существенно зависит от напряженности магнитного поля.

Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля приводит к тому, что после снятия внешнего размагничивающего поля рабочая точка перемещается по кривой возврата. Это является одним из наиболее существенных недостатков постоянных магнитов первого класса, который приводит к неполному использованию объема магнита, так как точка отхода кривой возврата рассчитывается исходя из нестационарных режимов, например срыва магнитной муфты, при котором магниты одной из полумуфт попадают в размагничивающее поле магнитов второй полумуфты. Поэтому, при номинальной мощности, когда рабочая точка находится на кривой возврата, энергия магнита оказывается существенно ниже своего максимального значения [30].

Таблица 1.4.1

Значение коэрцитивной силы по индукции и намагниченности постоянных магнитов первого класса

Марка магнита	ЮНДК25БА	ЮНДК35Т5БА	ЮНДК38Т7И
$\frac{B_r}{\mu_0}$, кА/м	1070	890	540
$H_{св}$, кА/м	56	125	147

Несмотря на высокое значение максимального энергетического произведения (B_H) отдельных магнитов первого класса (у магнитов ЮНДК35Т5БА $B_H=96$ Тл·кА/м), не представляется возможным спроектировать УБМВ по своим массогабаритным показателям превосходящее устройства с магнитной связью и электромагнитным возбуждением.

Кардинальное решение вопроса увеличения магнитной энергии постоянных магнитов было получено при исследовании интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами, получивших название редкоземельных магнитов [31,32].

Для магнитных сплавов, достаточно широко применяемых в радиоэлектронной аппаратуре и энергомашиностроении характерны все основные особенности высококоэрцитивных редкоземельных магнитов [29].

Так для марки КС37А значения коэрцитивных сил по индукции и намагниченности: $H_{св}=560$ кА/м, $H_{сМ}=1000$ кА/м; коэрцитивная сила по индукции приближается к своему максимально возможному значению,

равному $\frac{B_r}{\mu_0}=650$ кА/м; намагниченность постоянного магнита при изменении напряженности магнитного поля от 0 до $H_{св}$ практически постоянна;

магнитная проницаемость на большей части кривой размагничивания незначительно отличается от магнитной проницаемости воздуха; магнит имеет высокое максимальное энергетическое произведение: $(B \cdot H)=130$

Тл·кА/м; кривые возврата практически совпадают с кривой размагничивания, что при проектировании магнитных устройств позволяет не принимать во внимание кратковременные увеличения размагничивающего магнитного поля.

Достоинством редкоземельных постоянных магнитов является их высокая температурная стабильность [33,34].

Из сказанного выше очевидно, что магниты второго класса имеют наиболее обоснованные предпосылки для применения в УБМВ.

В ГОСТе 21559-76 содержится информация о следующих марках интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами: КС37, КС37А, КСП37, КСП37А.

Дальнейшее совершенствование материалов постоянных магнитов связано с редкоземельными магнитами класса $R_2(Co,Fe)_n$, значение максимального энергетического произведения которых $(B \cdot H)_{max}$ может достигать 500 Тл·кА/м. Что касается сплавов альнико, имеющих теоретический предел энергетического произведения выше, чем у сплава $SmCo_5$, то ожидать значительного прогресса в улучшении их характеристик не приходится. Это обусловлено наличием немагнитной матрицы: при малой концентрации одноименных частиц в композиции остаточная индукция получается малой, а с ростом концентрации уменьшается коэрцитивная сила.

Стабильность постоянных магнитов зависит от воздействия окружающей среды, а именно от механических нагрузок, радиации, наличия внешних магнитных полей или ферромагнитных масс, температуры.

Весьма незначительное влияние на свойства высококоэрцитивных магнитов оказывают вибрации и удары. Размагничивание этих материалов за счёт механических воздействий не превышает 1%, причем чувствительность магнитов к ударам и вибрациям тем меньше, чем выше их коэрцитивная сила [35]. При необходимости увеличения механической стабильности

магниты подвергают предварительным механическим воздействиям, не превышающим максимально возможные нагрузки при эксплуатации [30].

В работах [29,25,36] показано, что облучение нейтронами с плотностью $3 \cdot 10^{17}$ нейтр./см²·с в течение 12 суток не вызывает фиксирующих изменений в структуре.

Магниты из соединений *P-Co* обладают высокой температурной стабильностью остаточной намагниченности при воздействии внешних размагничивающих полей, которая тем выше, чем больше значения таких параметров магнитов, как $H_{св}$ и $H_{см}$. С приближением технической кривой размагничивания магнитов $B(H)$ к предельной ($H_{св}=B_r$, $\mu_B = 1$ где μ_B – коэффициент возврата) внешнее магнитное поле вызывает лишь обратимое снижение индукции в момент приложения поля. Такие магниты не нуждаются в стабилизации для защиты от влияния размагничивающего поля и могут намагничиваться вне магнитной системы, так как рабочая точка такого магнита при установке его в систему поднимается по основной петле гистерезиса $B(H)$.

При кратковременных выдержках магнитов, уплотнённых спеканием, при повышенных температурах необратимые потери их индукции не превышают 2% при температуре до 500°C и резко возрастают (до 15÷20%) с повышением температуры до 600÷650°C [37]. Выдержки магнитов при повышенных температурах длительностью порядка 10000 часов и более допустимы при температуре, не превышающей 200°C.

Необратимые магнитные изменения индукции магнитов, вызванные изменением их магнитной структуры (то есть частичным размагничиванием во внутреннем магнитном поле), не восстанавливаются после возвращения температуры магнитов к исходному значению, но устраняются после повторного намагничивания магнитов при исходной температуре [34].

Необратимое изменение $H_{см}$ магнитов в процессе нагрева на воздухе можно быть следствием как поверхностного окисления магнитов, так и на-

чала эвтектоидного распада соединения $SmCo_5$ при нагреве до температуры около $600\div 650^\circ C$ [37].

Необратимые магнитные потери индукции магнитов наблюдаются после первого цикла повышения температуры и, как правило, не наблюдаются при последующих циклах. Поэтому предварительный нагрев магнитов – стабилизирующая обработка – приводит к значительному улучшению как долговременной стабильности при комнатной температуре, так и стабильности при повышенной температуре при выдержках в пределах нескольких часов.

Для стабилизации магнитов, предназначенных для использования при повышенных температурах, применяют отжиг магнитов после намагничивания до насыщения при температуре, на $50^\circ C$ превышающих рабочую температуру, в течении $1\div 2$ часов. Например, необратимые магнитные потери индукции при их использовании при температуре $150^\circ C$ в течении 3000 ч для стабилизированных магнитов в $5\div 8$ раз меньше, чем для нестабилизированных, при этом потери индукции при стабилизации составляют $3\div 8\%$ (табл.1.4.2) [38]. В перспективе [39] имеется возможность на базе PCo_5 создавать постоянные магниты с рабочей температурой до $500^\circ C$ и при кратковременном нагреве – значительно выше.

Для магнитов значения температурных коэффициентов обратно пропорционально значению точки Кюри и практически не зависят от проницаемости.

Коэрцитивная сила порошков и магнитов $SmCo_5$ обнаруживает сильную температурную зависимость, монотонно уменьшаясь при нагреве и приближаясь к нулевому значению при температуре вблизи $730^\circ K$ (примерно $460^\circ C$) (рис.1.4.1).

Из вышесказанного следует, что наиболее неблагоприятными являются такие условия работы постоянных магнитов, при которых внешнее магнитное поле действует на них одновременно с повышенной температурой, так как необратимые потери индукции магнита дополнительно возрастают по сравнению с потерями при комнатной температуре из-за

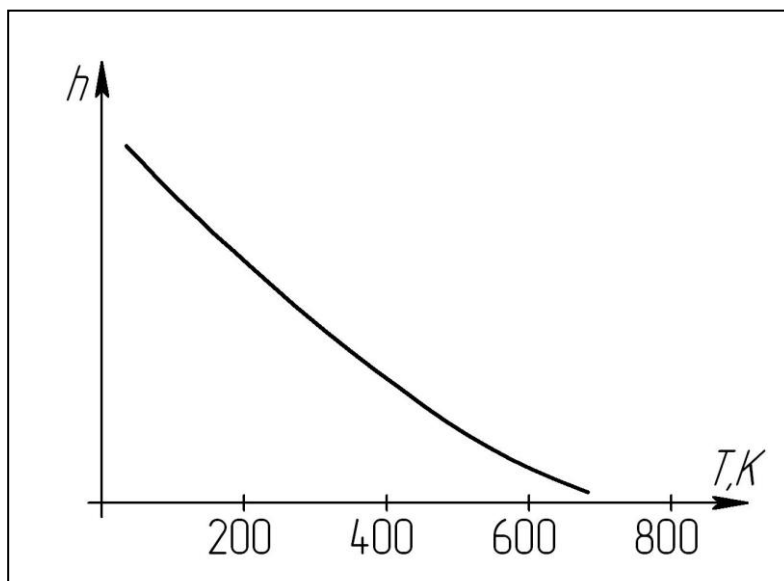


Рис.1.4.1. Температурная зависимость относительного значения H_{cM} магнитов из $SmCo_5$:

$$h = \frac{H_{cM}(T)}{H_{cM}(77K)}$$

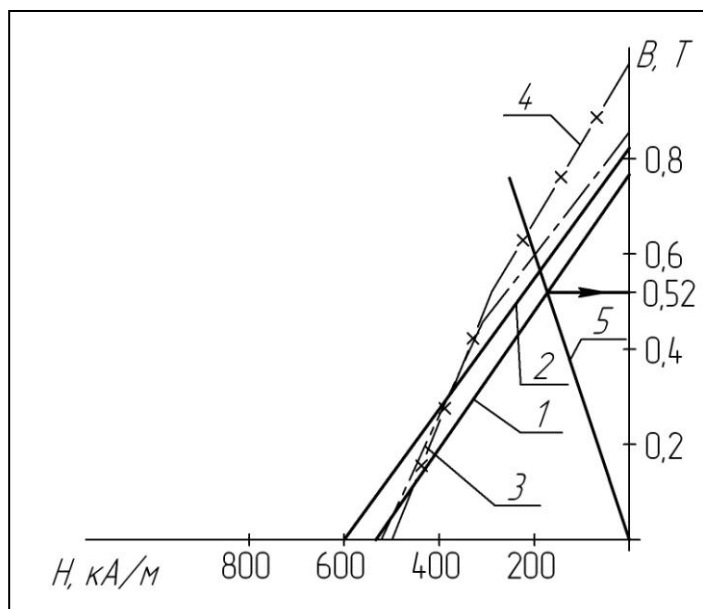


Рис.1.4.2. Характеристики размагничивания редкоземельных материалов:
 1 – КС37; 2 – КС37А; 3 – КСП37; 4 – КСП37А

Таблица 1.4.2

**Температурная стабильность постоянных магнитов
из редкоземельных материалов**

Материал магнита	$SmCo_5$	$Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_5$
Температурный коэффициент обратимых изменений индукции в интервале температур от 20 до 300°C	-0,047÷-0,051	-0,055÷-0,065

уменьшения его $H_{см}$. При этом с точки зрения обеспечения устойчивости магнитов при воздействии размагничивающего поля при повышенной температуре оптимальными являются такие их свойства, при которых сочетаются высокие значения коэрцитивной силы $H_{св}$ и отношения $\frac{H_{св}}{B_r}$, характеризующего наклон $B(H)$ во втором квадранте (рис.1.4.2).

Наиболее перспективными для вакуумного технологического и аналитического оборудования являются магниты на базе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами (КС37, КС37А, КСП37, КСП37А), как обладающих высокотемпературной стабильностью и уникальными магнитными свойствами.

1.5. Цель и задачи исследований

Анализ вакуумного оборудования высоких технологий и его внутрикамерных функциональных систем приводит к выводу о необходимости исследования устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную среду. Решению этих вопросов и посвящена настоящая монография, целью которой является разработка методов расчёта и выбора параметров устройств с

бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную среду оборудования высоких технологий и качество изготавливаемых изделий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного вакуумного технологического и аналитического оборудования высоких технологий и оценку повышения его производительности и выхода годных выпускаемых на нём изделий.

2. Разработать классификацию устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования.

3. Провести теоретические и экспериментальные исследования и моделирование вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и их элементов на загрязнения, привносимые микрочастицами и газовыми потоками.

4. Выполнить расчёты шарикоподшипников и зазоров в опорах качения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, работающих в вакууме при повышенных температурах.

5. Выбрать тип электродвигателя для приводов функциональных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

6. Разработать методику инженерного расчёта устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования.

7. Разработать конструкции функциональных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, отвечающих требованиям проведения технологического процесса в высокоэкологичном вакуумном оборудовании.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВ С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДОЙ

2.1. Классификация устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования

Большое многообразие конструктивных схем устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, различия их функциональных характеристик и особенности условий эксплуатации, позволяют создать классификацию УБМВ для вакуумного оборудования высоких технологий (рис.2.1.1).

Разработанная классификация УБМВ, в отличие от существующих [37, 38], ориентирована на применение в современном вакуумном технологическом и аналитическом оборудовании.

Анализ конструктивных схем УБМВ позволяет выделить, для построения классификации две группы существенных признаков.

Первая группа признаков определяет объекты применения, назначение, тип, конструктивные особенности и форму поверхности бесконтактного магнитного взаимодействия элементов устройства (рабочего зазора).

В вакуумном технологическом и аналитическом оборудовании высоких технологий УБМВ могут быть использованы: в вакуумных передающих и прецизионных манипуляторах; в вакуумно-транспортных системах; в вакуумных клапанах и натекателях; в вакуумных шлюзовых загрузочных

устройствах; в газовых системах вакуумного оборудования и др.

По функциональному назначению, УБМВ предназначенные для вакуумного оборудования можно подразделить на: устройства для передачи вращения в вакуум; устройства для передачи поступательного движения в вакуум; устройства для передачи качательного движения в вакуум; устройства для передачи комбинированного движения в вакуум; муфты вращения; вакуумные редукторные устройства; вакуумные устройства для преобразования одного вида движения в другой; устройства гашения колебаний в оборудовании; и предохранительные устройства от силовых перегрузок элементов оборудования.

По конструктивным признакам можно выделить следующие УБМВ: муфты вращения; редукторные устройства; винтовые устройства; устройства для преобразования одного вида движения в другой.

По форме рабочего зазора УБМВ можно подразделить на: цилиндрические, торцевые, конические, сферические и параболические муфты вращения; передачи винт-гайка, винт-гайка несоосная, винт-гайка волновая; поступательные и цилиндрические преобразователи одного вида движения в другой; рядные непланетарные с цилиндрическими колесами внешнего и внутреннего зацепления, планетарные одно- и двухрядные с цилиндрическими колесами внешнего и внутреннего зацепления, червячные с цилиндрическими и глобоидными червяками, цилиндрические шаговые прерывистого движения, цилиндрические и торцевые волновые редукторы; цилиндрические шлицевые пары раздельного поступательного и вращательного движений.

Вторая группа признаков характеризует особенности выполнения магнитных систем УБМВ и вид бесконтактного магнитного взаимодействия элементов кинематической пары сопряженных звеньев.

В зависимости от количества рабочих зазоров на пути магнитного потока УБМВ могут быть однозазорными, с однократным использованием

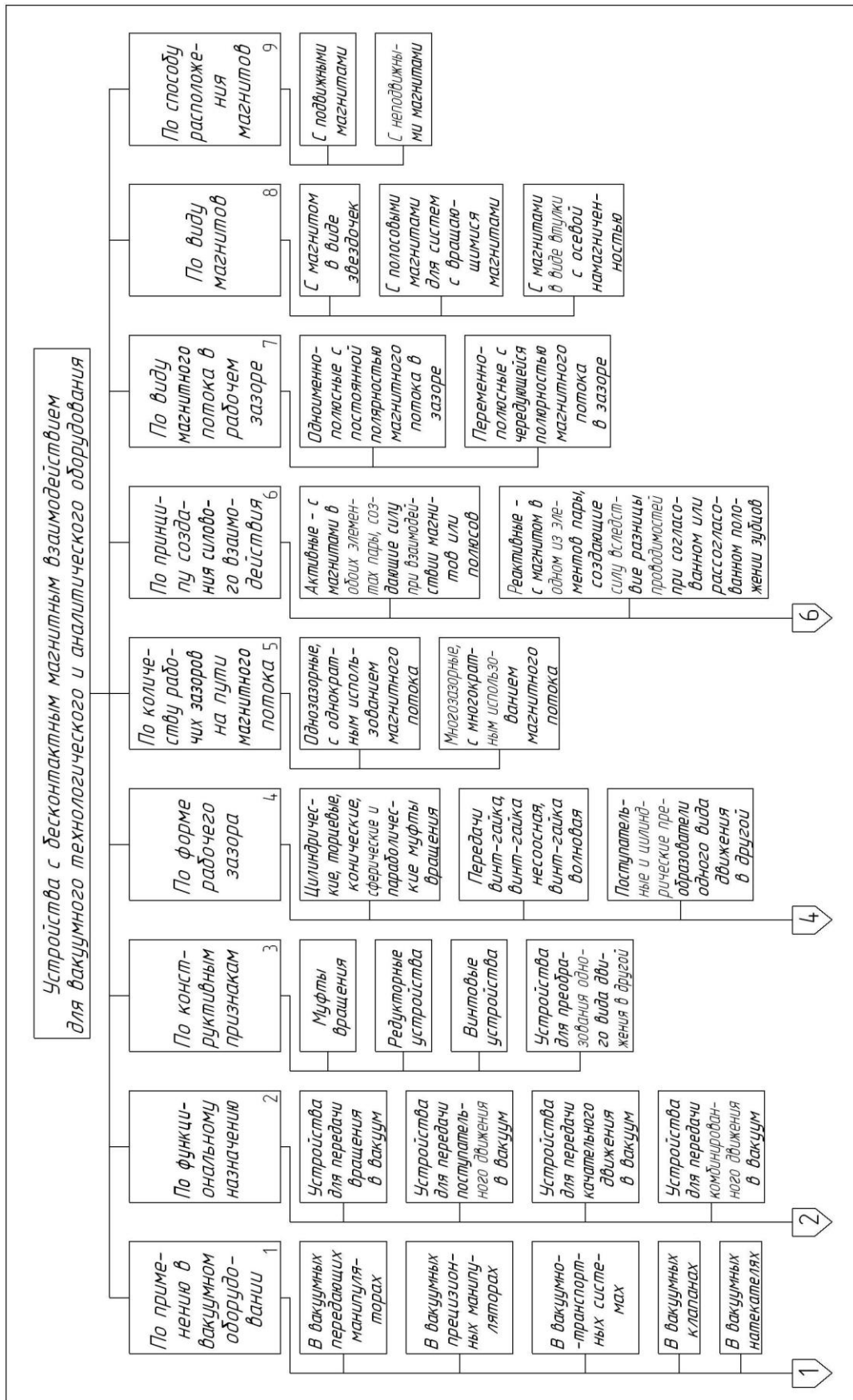


Рис.2.1.1. Классификация устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием вакуумного технологического и аналитического оборудования

магнитного потока, и многозазорными, с многократным использованием магнитного потока.

По принципу создания силового взаимодействия УБМВ можно разделить на: активные – с магнитами в обоих элементах пары, создающие силу в результате взаимодействия магнитов и полюсов; реактивные – с магнитом в одном из элементов пары, создающие силу вследствие разницы проводимостей при согласованном или рассогласованном положении зубцов, гистерезисные – с магнитом в одном из элементов пары и гистерезисным слоем в другом, в которых создается сила за счет потерь в гистерезисном слое.

В зависимости от источника магнитного потока УБМВ могут быть: литыми магнитами; с магнитами из редкоземельных элементов; с магнитами из феррита бария.

По виду магнитного потока в рабочем зазоре УБМВ могут быть одноименно-полюсными, с постоянной полярностью магнитного потока в зазоре, и переменнo-полюсными, с чередующейся полярностью магнитного потока в зазоре.

В зависимости от вида магнитов УБМВ можно разделить на устройства с магнитом в виде звездочек и устройства с полосовыми магнитами для систем с вращающимися магнитами.

По способу расположения магнитов можно выделить УБМВ с подвижными и неподвижными магнитами.

Проведенный, на основе разработанной классификации [39], анализ показал, что из возможных вариантов построения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования, практически реализуемыми являются более 70 вариантов конструкций.

Наибольшее распространение в электромеханических приводах ряда современных установок получили герметичные (экранированные) устрой-

ства с бесконтактным магнитным взаимодействием в связи с развитием вакуумной техники и технологий, химического производства, материаловедения, а также электронной и аэрокосмической техники, микро- и нанотехнологий.

2.2. Теоретические основы расчета устройств бесконтактного взаимодействия поступательного перемещения

Устройство бесконтактного взаимодействия поступательного перемещения, расчетная схема которого показана на рис. 2.2.1, состоит из магнитной системы 1, имеющей потенциала F_m , и якоря 2, установленного на валу, разделенных немагнитной герметичной перегородкой 3.

Под действием внешнего привода магнитная система 1 смещается на некоторое расстояние x , и на якорь 2 будет действовать со стороны магнитного поля сила P_x , стремящаяся вернуть устройство в начальное состояние.

Поскольку поле на протяжении большей части узкого магнитного зазора равномерно, то зону взаимодействия (условно) можно разбить на две части: при достаточно малых x (рис. 2.2.2), и в момент выхода якоря из зоны магнитной системы (рис. 2.2.2). Такое представление зон взаимодействия позволяет для определения сил взаимодействия использовать метод конформного преобразования [30].

Последнее является наиболее действенным методом аналитического определения лапласовых полей, позволяющим учесть влияние границ сложной конфигурации. В общем случае решения имеют простой вид и позволяют получить выражения для магнитной индукции и проводимости для магнитных полей, а также рассчитать картину поля. Главное ограничение метода преобразований состоит в том, что границы поля должны быть

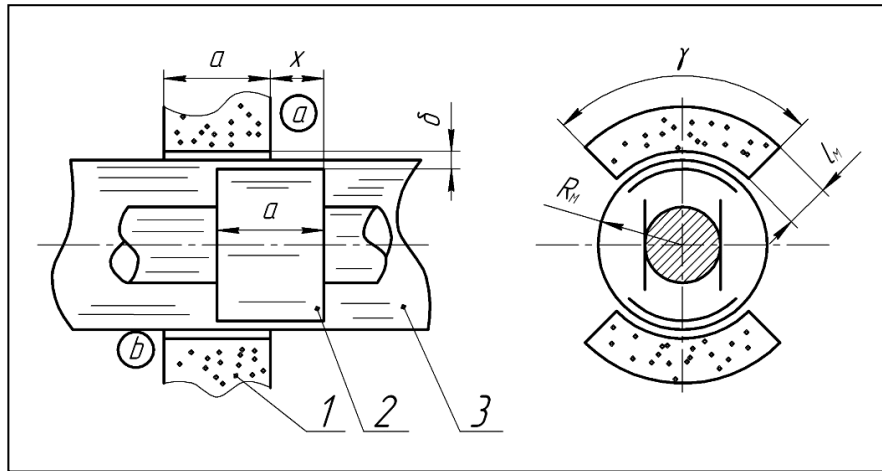


Рис.2.2.1. Расчетная схема устройства бесконтактного взаимодействия поступательного перемещения

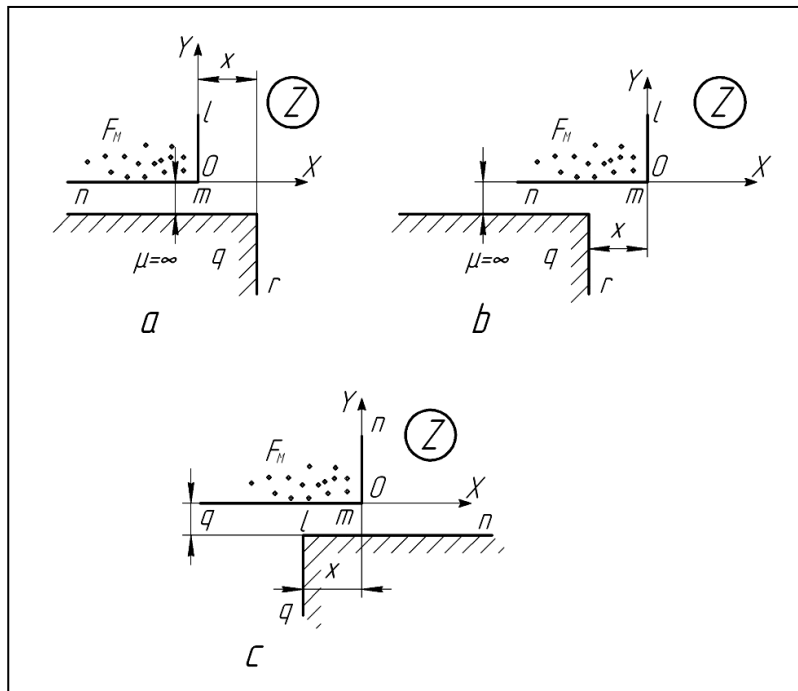


Рис. 2.2.2. Расчетные схемы для определения силы магнитного взаимодействия:

a – при малых перемещениях и $x \geq 0$

b – при малых перемещениях и $x \leq 0$;

c – при перемещениях, соизмеримых с длиной l магнитной системы.

приняты или имеющими бесконечно большую магнитную проницаемость, или совпадающими с линиями потока, или представлять собой комбинацию этих двух типов границ.

Поскольку якорь и магнитопровод выполняется из магнитомягкого материала, имеющего магнитную проницаемость в 20-40 тысяч раз большую, чем магнитная проницаемость воздуха, то условие вносит в расчеты весьма незначительную погрешность.

Относительная силы, действующая на единицу длины вертикальной поверхности якоря, определяется формулой [40].

$$P_x = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{-j\infty}^{j\infty} H^2 dZ, \quad (2.2.1)$$

где P_x - сила, отнесенная к единице длины дуги якоря, Н/м;

μ_0 - магнитная постоянная, Гн/м;

H - напряженность магнитного поля, А/м.

Отображение на области, изображение на рис.2.2.2а, рис.2.2.2б, верхней полуплоскости t осуществляется с помощью выражения Кристоффеля-Шварца вида

$$\frac{dZ}{dt} = S \frac{\sqrt{(t-\lambda)(t-1)}}{t}. \quad (2.2.2)$$

Подстановка

$$R = \sqrt{\frac{t-\lambda}{t-1}}, \quad (2.2.3)$$

позволяет выполнить интегрирование (2.2.2)

$$Z = S \left[2\sqrt{-\lambda} \operatorname{arctg} \frac{R}{\sqrt{-\lambda}} - (1+\lambda) \operatorname{arth} R + (1-\lambda) \cdot \frac{R}{R^2-1} + C \right]. \quad (2.2.4)$$

Из соответствия точек (рис. 2.2.3)

$$Z = 0, t = \lambda, R = 0$$

следует равенство нулю постоянной C .

Постоянная S определяется методом вычитов, и равно

$$S = -j \frac{\delta}{\pi \sqrt{-\lambda}}. \quad (2.2.5)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} \lambda &= -a^2, \text{ при } x > 0 \\ \lambda &= -b^2, \text{ при } x < 0 \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

где a и b – действительные числа.

Из соответствия точек

$$Z = x - j\delta, \quad t = 1, \quad R = \infty$$

определяются значения a и b , а именно

$$\begin{aligned} a^2 &= 1 + \frac{2x^2}{\delta^2} - \sqrt{\left(1 + \frac{2x^2}{\delta^2}\right)^2 - 1} \\ b^2 &= 1 + \frac{2x^2}{\delta^2} + \sqrt{\left(1 + \frac{2x^2}{\delta^2}\right)^2 - 1} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Выполнив замену переменных в (2.2.1), получим

$$P_x = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{\infty}^1 \left(\left| \frac{d\omega}{dt} \right| \right)^2 \left| \frac{dt}{dZ} \right| dt, \quad (2.2.8)$$

где ω – комплексная потенциальная функция на плоскости.

Если магнит расположен непосредственно в зазоре, то можно считать, что скалярный магнитный потенциал равномерно распределен вдоль луча $[n, m]$ на плоскости Z , что соответствует скачку потенциала F_m на участке $[m', n']$ плоскости t . Тогда поле на плоскости t описывается уравнением Шварца [41]

$$\omega = \frac{F_m}{\pi} \ln \frac{t}{t+a}. \quad (2.2.9)$$

С учетом (2.2.2) и (2.2.9) выражение (2.2.8) имеет вид:

$$\begin{aligned} P_x(a) &= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{a^5}{\delta} \frac{F_m}{\pi} \int_{\infty}^1 \frac{dt}{\left| (t+a^2)^2 t \sqrt{(t+a^2)(t-1)} \right|} \\ P_x(b) &= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{b^5}{\delta} \frac{F_m}{\pi} \int_{\infty}^1 \frac{dt}{\left| (t+b^2)^2 t \sqrt{(t+b^2)(t-1)} \right|} \end{aligned} \quad (2.2.10)$$

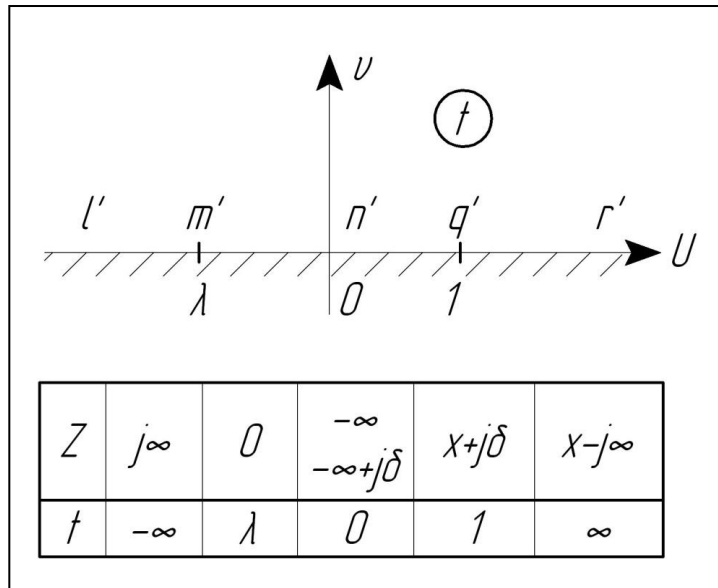


Рис. 2.2.3. Верхняя полуплоскость t и соответствующие точки плоскостей Z и t .

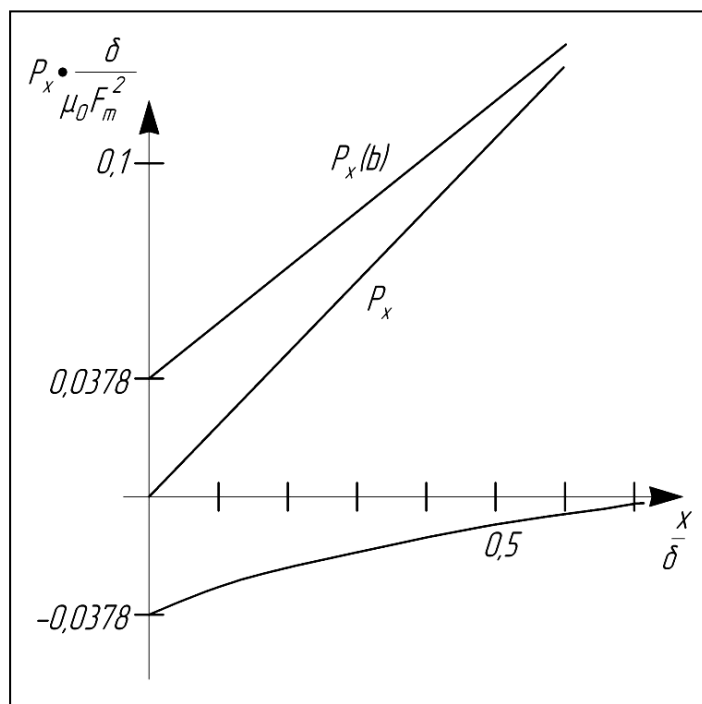


Рис. 2.2.4. Зависимость составляющих относительной силы магнитного взаимодействия якоря и магнита для системы без магнитопровода

при $\frac{x}{\delta} < 0,6$

Раскрыв модуль и выполнив интегрирование, получим

$$\begin{aligned} P_x(a) &= \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2 \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{a} - \frac{3+5a^2}{(1+a^2)^2} \frac{a}{3} \right] \text{ при } x > 0 \\ P_x(b) &= \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2 \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{b} - \frac{3+5b^2}{(1+b^2)^2} \frac{b}{3} \right] \text{ при } x < 0 \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

На рис. 2.2.4 представлены графики $P_x(a)$ и $P_x(b)$ при малых значениях $\frac{x}{\delta} \left(\frac{x}{\delta} < 0,6 \right)$. Из сравнения зависимостей $P_x(a)$ и $P_x(b)$ при $\frac{x}{\delta} \geq 0,5$ следует, что

$$P_x(a) < 0,01P_x(b), \quad (2.2.12)$$

то есть силы магнитного притяжения зоны a по абсолютной величине составляет менее 1% от значения силы магнитного притяжения силы зоны b при величине рассогласования $x \geq \frac{\delta}{2}$. При $x = 0$

$$-P_x(a) = P_x(b) = 0,0378 \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2. \quad (2.2.13)$$

Результирующая сила P_x определяется

$$\begin{aligned} P_x &= P_x(b) - P_x(a) = \\ &= \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2 \frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{1}{a} - \frac{1}{b} + \frac{1}{3} \left[a \frac{3+5a^2}{(1+a^2)^2} - b \frac{3+5b^2}{(1+b^2)^2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2.2.14)$$

при $\frac{x}{\delta} > 0,6$ по формуле

$$P_x = \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2 \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{b} - \frac{b}{3} \frac{3+5b^2}{(1+b^2)^2} \right]. \quad (2.2.15)$$

Предельное значение силы магнитного притяжения определяется по формуле

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P_x = 0,5 \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2. \quad (2.2.16)$$

В [37,42] рассматриваются устройства поступательного перемещения с магнитопроводом (рис.2.2.5).

В этом случае можно считать, что вся поверхность (n, m, l) имеет потенциал F_m , что соответствует заряженной полуоси (l', m', n') в плоскости t .

Тогда поле в плоскости t описывается уравнением Шварца [41] вида

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{F_m}{\pi} \ln t, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{F_m}{\pi} \frac{1}{t}. \end{aligned} \quad (2.2.17)$$

Тогда уравнение (2.2.8) с учетом (2.2.2) и (2.2.17), будет иметь вид

$$P_x(a) = \frac{\mu_0 F_m^2 a}{2 \pi \cdot \delta} \int_{\infty}^1 \frac{dt}{t \sqrt{(t+a^2)(t-1)}}. \quad (2.2.18)$$

Здесь знак модуля опущен, так как подынтегральное выражение действительное и положительное.

Выполнив интегрирование, получим

$$P_x(a) = \frac{\mu_0 F_m^2}{2\pi\delta} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{1-a^2}{1+a^2} \right). \quad (2.2.19)$$

Аналогично для зоны b

$$P_x(b) = \frac{\mu_0 F_m^2}{2\pi\delta} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{b^2-1}{b^2+1} \right). \quad (2.2.20)$$

Из анализа (2.2.19) и (2.2.20) следует, что при $x = 0$, $a = b = 1$

$$P_x(a) = -P_x(b) = 0,25 \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2.$$

Кроме того

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} P_x(a) &= 0,5 \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} P_x(b) &= 0 \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

Результирующая сила P_x определяется как

$$P_x = P_x(a) - P_x(b) = \frac{\mu_0 F_m^2}{2\pi\delta} \left(\arcsin \frac{1-a^2}{1+a^2} + \arcsin \frac{b^2-1}{b^2+1} \right). \quad (2.2.22)$$

Предельное значение силы магнитного притяжения определяется по формуле

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P_x = 0,5 \frac{\mu_0}{\delta} F_m^2. \quad (2.2.23)$$

Из сравнения (2.2.15) и (2.2.23) следует, что предельное значение передаваемого усилия не зависит от конструкции устройства поступательного перемещения.

С физической точки зрения этот результат объясняется тем, что в пределе, то есть при бесконечно длинном воздушном зазоре магнитное поле, в основном, равномерно, доля торцевого эффекта незначительна, следовательно усилие (равное производной магнитной энергии, запасенной в зазоре по перемещению x) не зависит от величины рассогласования.

На рис. 2.2.6 представлены графики зависимостей $P_x(a)$ и $P_x(b)$, для конструкции с магнитопроводом, из анализа которых следует, что на начальном участке рассогласования x вклад каждой области a и b практически равноценны, таким образом, результирующая сила P_x будет стремиться к предельному значению гораздо медленнее, чем в случае расположения магнита непосредственно в зазоре (рис. 2.2.6).

Рассмотрим изменения силы магнитного притяжения в момент выхода якоря из зоны взаимодействия (рис. 2.2.2с).

Представив (2.2.24) в удобном для интегрирования виде, запишем

$$Z = S \int_1^t \left[\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{(t-1)(t-\lambda)}} - \frac{1+\lambda}{\sqrt{(t-1)t(t-\lambda)}} + \frac{\lambda}{\sqrt{(t-1)t^3(t-\lambda)}} \right] dt + C \quad (2.2.25)$$

В силу соответствия точек $Z = 0$ и $t = 1$ постоянная интегрирования C равна нулю.

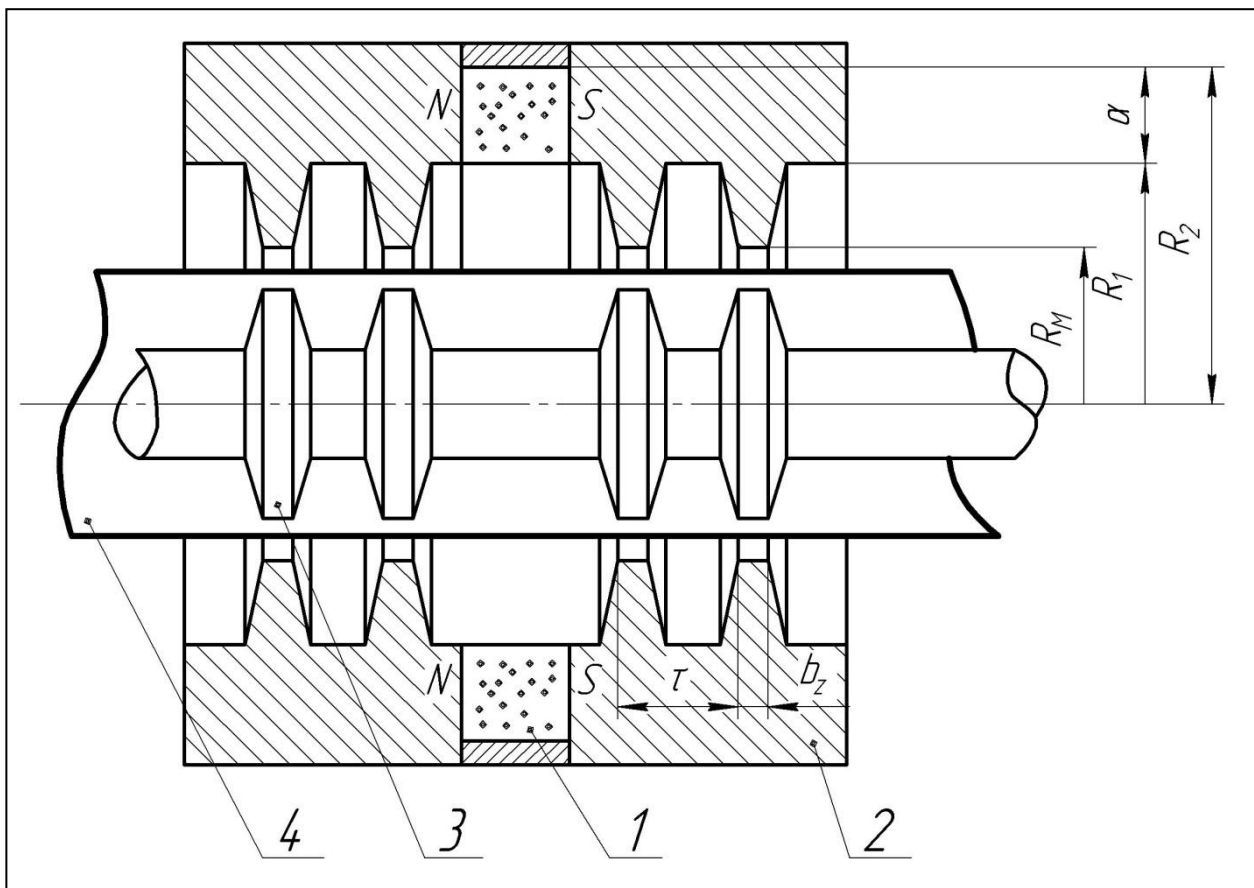


Рис. 2.2.5. Устройство поступательного перемещения с магнитопроводом:

- 1 – постоянный магнит;
- 2 – магнитопровод;
- 3 – якорь;
- 4 – герметичная оболочка.

При интегрировании (2.2.25) получается сумма эллиптических интегралов Ленсандра первого и второго рода и неинтегрального члена, имеющего полюсы в точках $t = 1$ и $t = \lambda$, соответствующих бесконечно удаленным вершинам на плоскости Z . Поэтому для определения постоянной S вычисляется интеграл по замкнутому контуру ζ (рис. 2.2.7), представляющему замкнутую кривую на двулистной римановой поверхности квадратного корня. В этом случае неинтегральный член исчезает (по теореме Коши о вычетах [43]), путь интегрирования для всех слагаемых объединяется в один контур ζ_1 , обходящий прямолинейный разрез $[\lambda, 0]$ в положительном направлении (рис. 2.2.7). В результате интегрирования по замкнутому контуру получим удвоение расстояния x .

Таким образом

$$S = \frac{x \cdot k'}{2[2E(k) - K(k)]}, \quad (2.2.26)$$

где $k = \sqrt{\frac{-\lambda}{1-\lambda}}$ — основной и дополнительный модули эллиптических интегралов.

где $k' = \frac{1}{\sqrt{1-\lambda}}$ — основной и дополнительный модули эллиптических интегралов.

Для определения λ в (2.2.25) подставим значения соответствующих точек $Z = x + j\delta$ и $t = \lambda$

$$x + j\delta = S \left[\int_1^\lambda \frac{\sqrt{t} dt}{\sqrt{(t-1)(t-\lambda)}} - \int_1^\lambda \frac{(1+\lambda) dt}{\sqrt{(t-1)t(t-\lambda)}} + \int_1^\lambda \frac{\lambda dt}{\sqrt{(t-1)t^3(t-\lambda)}} \right]$$

и обозначим каждый интеграл через J_1, J_2, J_3 .

Тогда

$$J_i = -J_i = J_i + J_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.2.27)$$

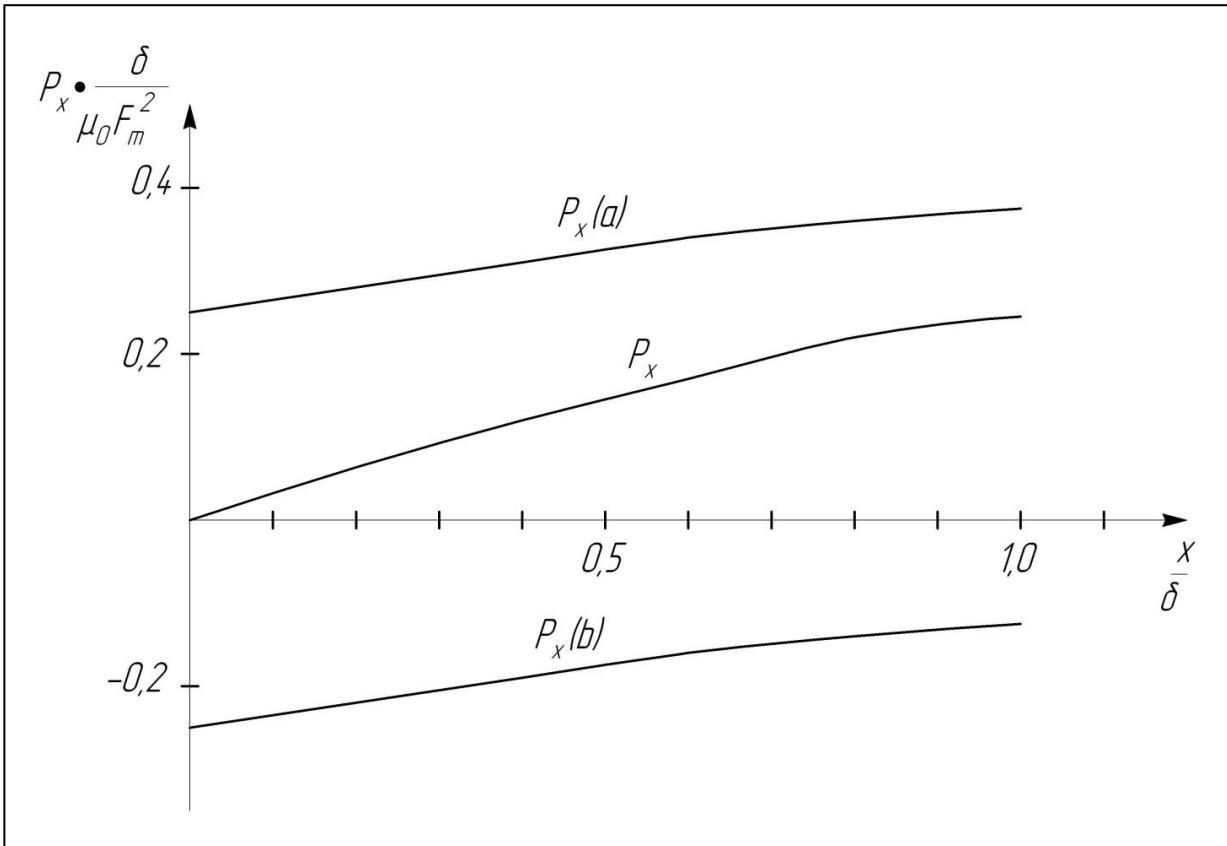


Рис. 2.2.6. Зависимость составляющих относительной силы магнитного взаимодействия якоря и магнитопровода при $\frac{x}{\delta} < 1,0$

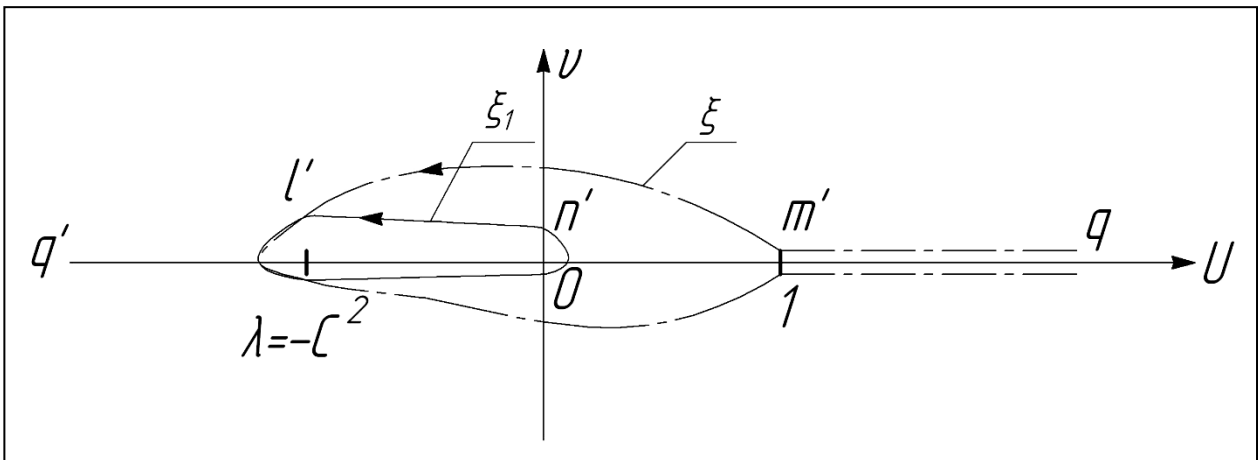


Рис.2.2.7. Пути интегрирования на плоскости t

в интервале $[\lambda, 0]$ получим

$$J_{\lambda}^0 - J_{\lambda}^0 + J_{\lambda}^0 = \frac{2}{k'} [2E(k) - K(k)] + 2j \sqrt{\frac{(1-t)(t-\lambda)}{t}} \Big|_{t=0}, \quad (2.2.28)$$

в интервале $[0, 1]$:

$$J_{\lambda}^0 - J_{\lambda}^0 + J_{\lambda}^0 = -2j \frac{1}{k'} [2E(k') - K(k')] - 2j \sqrt{\frac{(1-t)(t-\lambda)}{t}} \Big|_{t=0}. \quad (2.2.29)$$

При сложении (2.2.28) и (2.2.29) неинтегральные члены исчезают в силу тождественного равенства их модулей (интегрирование по окружности бесконечно малого радиуса с центром в полюсе $t = 0$).

Следовательно

$$x + j\delta = \frac{2S}{k'} [2E(k) - k(k)] - j \frac{2S}{k'} [2E'(k) - K'(k)]. \quad (2.2.30)$$

Или

$$\frac{x}{\delta} = -\frac{2E(k) - k(k)}{2E'(k) - K'(k)}, \text{ где } \delta < 0. \quad (2.2.31)$$

Таким образом, λ зависит только от отношения $\frac{x}{\delta}$. С учетом (2.2.31)

выражение (2.2.26) запишем в виде

$$S = \frac{\delta k'}{2[2E'(k) - K'(k)]}. \quad (2.2.32)$$

При определении сил магнитного взаимодействия рассмотрим, в первую очередь, случай распределения магнитного потенциала вдоль луча $[l, g]$, что соответствует схеме с магнитом, расположенным непосредственно в зазоре. В этом случае поле в плоскости t записывается уравнением

$$\omega = \frac{F_m}{\pi} \ln(t-1). \quad (2.2.33)$$

Тогда

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{F_m}{\pi} \cdot \frac{1}{t-1}. \quad (2.2.34)$$

С учетом (2.2.2) и (2.2.34) выражение (2.2.8) записывается как

$$P_x = \frac{\mu_0}{2} \frac{F_m^2}{\pi^2} \frac{1}{S} \int_{\lambda}^{-\infty} \left| \frac{t\sqrt{t}}{(t-1)^2 \sqrt{(t-1)(t-\lambda)}} \right| dt \quad (2.2.35)$$

причем в данном случае целесообразно интегрировать по вертикальной поверхности якоря.

Интегрирование (2.2.35) производится с помощью подстановки

$$R = \sqrt{\frac{t+C^2}{t-1}}, \quad (2.2.36)$$

где $C^2 = -\lambda$.

Тогда

$$t = \frac{R^2 + C}{R^2 - 1}$$

$$dt = -\frac{2R(1+C^2)}{(R^2-1)^2} dR,$$

$$t = -\infty \text{ и } R = 1; \quad t = \lambda \text{ и } R = 0$$

С учетом (2.2.36) после раскрытия знака модуля (2.2.35) приобретает вид:

$$P_x = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{F_m^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{S} \int_0^1 \frac{2}{(1+C^2)^2} \left[\sqrt{(1-R^2)(R^2+C^2)} - (1+C^2) \sqrt{\frac{R^2+C^2}{1-R^2}} \right] dR$$

и, окончательно, с учетом (2.2.32), имеем

$$P_x = \frac{2}{3} \mu_0 \frac{F_m^2}{\delta} \frac{1}{\pi^2} [2E'(k) - K'(k)] [2E'(k) + K'(k)(1-k')^2] \quad (2.2.37)$$

При $x \rightarrow -\infty$ $k' = 0$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P_x = \frac{\mu_0 F_m^2}{\delta} 0,5. \quad (2.2.38)$$

Обобщенный график зависимостей (2.2.14) и (2.2.37) представлен на рис.2.2.8.

В заключении рассмотрим процесс выхода якоря из зоны магнитного поля для конструкции с магнитопроводом. В этом случае поверхность (g, l, n) имеет потенциал F_m , и поле в плоскости t записываются уравнением (2.2.16), в результате выражение (2.2.8) запишется как

$$P_x = \frac{\mu_0 F_m^2}{2 \pi^2 S} \int \frac{dt}{\sqrt{(t-1)t(t-\lambda)}}. \quad (2.2.39)$$

После выполнения интегрирования (2.2.39) получим

$$P_x = 2\mu_0 \frac{F_m^2}{\delta} \cdot \frac{1}{\pi^2} (2E'(k) - K'(k)) \cdot K'(k). \quad (2.2.40)$$

Предельное значение силы P_x в конструкции с магнитопроводом при $x \rightarrow \infty$ $\left(E(k') = K(k') = \frac{\pi}{2} \right)$ равно

$$\lim P_x = 0,5 \frac{\mu_0 F_m^2}{\delta}. \quad (2.2.41)$$

Обобщенные графики зависимостей (2.2.14) и (2.2.37), а также (2.2.22) и (2.2.40) показаны на рис. 2.2.8.

Анализ полученных зависимостей (рис. 2.2.8) позволяет определить основные силовые и геометрические параметры устройств поступательного перемещения с магнитной связью.

Начиная с некоторого значения величины относительного рассогласования кривые 1,2 (рис. 2.2.8) весьма медленно стремятся к предельному значению. Например, при изменении величины относительного рассогласования от 10 до 20 о.е. величины передаваемого усилия P_x увеличится на 4%.

Таким образом, при проектировании магнитной системы целесообразно создать в качестве оптимального усилия, равно

$$P_{\text{хопт.}} = (0,95 \dots 0,97) \cdot 0,5 \frac{\mu_0 F_m^2}{\delta}. \quad (2.2.42)$$

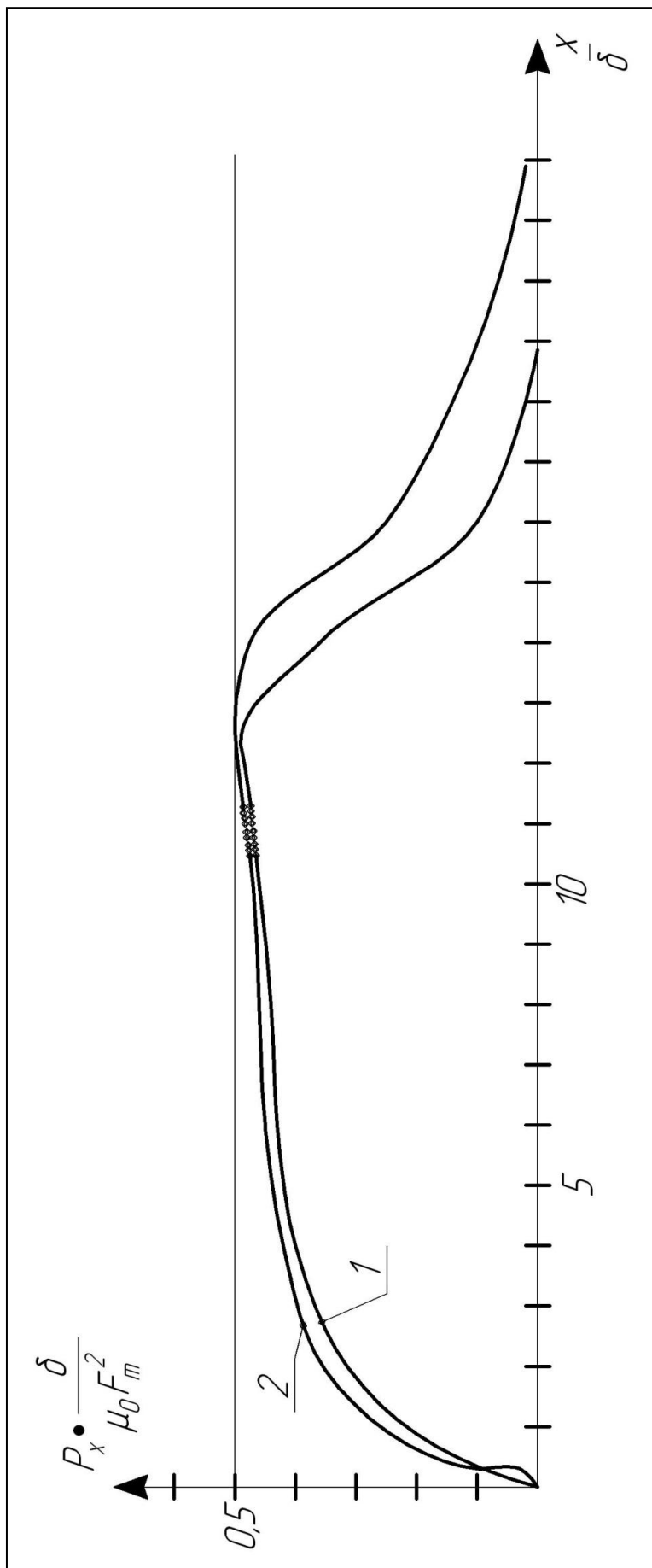


Рис. 2.2.8. Графики зависимости относительной силы магнитного взаимодействия от величины относительного рассогласования для:

1 Система с магнитом, расположенным в зазоре.

2 Система с магнитопроводом.

При этом относительная длина магнитной системы (рис.1) лежит в пределах

$$10 \leq \frac{a}{\delta} \leq 12. \quad (2.2.43)$$

Для увеличения передаваемого усилия устанавливаются последовательно ещё одна или несколько магнитных систем, причем ось якоря перпендикулярна оси первичной системы, расстояние между магнитными системами равно 15δ .

Как отмечалось выше, формулы (2.2.14, 2.2.22, 2.2.37, 2.2.40) служат для определения относительной силы взаимодействия P_x . Усилие, передаваемое устройством бесконтактного взаимодействия поступательного перемещения определяется для схемы без магнитопровода (рис. 2.2.1) по формуле

$$P_x^I = 2 \int_{-\gamma/2}^{\gamma/2} P_x \cdot R_M^I d\gamma = 2P_x R_M^I \gamma, \quad (2.2.44)$$

где R_M^I - внутренний радиус магнита.

Поле в зазоре δ можно считать равномерным при $\gamma = \frac{\pi}{2}$. Таким образом,

$$P_x^I = \pi \cdot R_M^I P_x^I. \quad (2.2.45)$$

Очевидно, что для устройства бесконтактного взаимодействия с магнитопроводом (рис. 2.2.5), усилие P_x (для двух зубцов) будет определяться по формуле

$$P_x^{II} = 4\pi \cdot R_M^{II} P_x^{II}. \quad (2.2.46)$$

где R_M^{II} - внутренний радиус магнитопровода.

Сравним основные характеристики этих устройств, присваивая индекс I параметрам, относящимся к устройству без магнитопровода, а индекс II – к устройству с магнитопроводом.

Поскольку в устройстве с магнитопроводом возможно конструктивное решение с числом зубцов не менее двух, то устройство без магнитопровода будем рассматривать с двумя магнитными системами.

Тогда

$$P_x^I = 2\pi \cdot R_M^I P_x^I. \quad (2.2.47)$$

Геометрические размеры берутся в относительных единицах ($\delta = 1$).

Для схемы без магнитопровода примем основные размеры согласно (2.2.43).

Рассчитаем устройство поступательного перемещения по методике, предложенной Л.Б. Ганзбургом [37,42]. Однако, это сделать не так просто, ибо в [42] автор в качестве оптимального дает соотношение

$$\tau = 6,65, \quad (2.2.48)$$

а в [3] предлагает уже считать

$$\tau = 8,35. \quad (2.2.49)$$

где τ – расстояние между зубцами,

b_z – ширина зуба [37,42] которая определяется

$$b_z = (0,35...0,45)\tau, \quad (2.2.50)$$

или с учетом (2.2.47, 2.2.48)

$$b_z = 2,33...3,76. \quad (2.2.51)$$

По графику зависимости относительной силы P_x от величины от величины относительного рассогласования (рис. 2.2.8) с учетом процесса выхода системы из зоны магнитного взаимодействия и выражения (2.2.42), получим

$$P_x^{II} = (0,6...0,8)P_{\text{хонт.}}. \quad (2.2.52)$$

То есть предложенные в [37,42] геометрические соотношения не обеспечивает достижения оптимального значения относительной силы

P_x^{II} .

Для сравнения устройств поступательного перемещения без магнитопровода (рис. 2.2.1) и магнитопроводом (рис. 2.2.5) выберем две конструкции, геометрические размеры которых определяются по (2.2.43) и передаваемое усилие, соответственно конструктивной схеме, по (2.2.47) и (2.2.46). Будем считать, что объем магнитотвердого материала в обоих случаях одинаков. При этих условиях за критерий сравнения примем усилие P_x , передаваемое устройством.

При выборе оптимальной формы магнита рабочая точка на характеристике размагничивания совпадает с точкой максимума удельной энергии.

Поскольку магнит в устройстве без магнитопровода не имеет полюсных наконечников и находится в непосредственной близости к рабочему зазору, то согласно [29]

$$l_M^I = \delta. \quad (2.2.53)$$

Таким образом объем магнитотвердого материала обеспечивающий максимально возможное усилие P_x и приходящийся на две магнитные системы, равен

$$V_M^I = 2\pi a l_M^I (2R_M + \delta). \quad (2.2.54)$$

Из анализа магнитной цепи устройства поступательного перемещения с магнитопроводом (рис. 2.2.5) очевидно, что сопротивления воздушных зазоров «включены» последовательно, следовательно суммарная проводимость магнитной цепи определяется

$$\lambda_g = \frac{\lambda_\delta}{2}, \quad (2.2.55)$$

где λ_δ – проводимость кругового воздушного зазора шириной δ .

Таким образом, эквивалентный зазор $\delta_\mathcal{E}$ рассматриваемого устройства равен

$$\delta_\mathcal{E} = 2\delta\sigma, \quad (2.2.56)$$

где σ – коэффициент рассеяния материала магнитопровода.

Согласно [37] $\sigma = 2$.

Тогда с учетом (2.2.53)

$$l_M'' = \delta_{\sigma} = 4\delta. \quad (2.2.57)$$

Внешний и внутренний диаметры (рис. 2.2.5) магнита соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_M + a \\ R_2 &= R_M + 2a \end{aligned} \right\}, \quad (2.2.58)$$

и объем магнита составляет

$$V_M'' = 2\pi l_M'' a (2R_M + 3a), \quad (2.2.59)$$

или, с учетом (2.2.43)

$$V_M'' = 2\pi l_M'' a (2R_M + 31\delta). \quad (2.2.60)$$

Относительное превышение объема устройства с магнитопроводом (с учетом соотношения $R_M \gg \delta$) составляет

$$\frac{V_M''}{V_M'} = 4 + \frac{60\delta}{R_M}. \quad (2.2.61)$$

Если в устройстве принять $R_M \approx 60\delta$, и учитывая (2.2.46, 2.2.47), при равных геометрических размерах для создания усилия P_x в устройстве с магнитопроводом необходимо установить магнит по объему в 2,5 раза больший, чем в конструкции без магнитопровода.

2.3. Влияние магнитного поля на поведение микрочастиц в вакууме

Как отмечалось выше, одним из перспективных направлений развития внутрикамерных устройств вакуумного оборудования является разработка и создание устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, что позволяет значительно снизить количество узлов трения в вакууме, и в целом повысить надёжность оборудования. Кроме этого, УБМВ

являются естественными ловушками для микрочастиц износа опор качения в вакууме, так как ротор устройства создает переменное магнитное поле.

Индукция \vec{B} и напряженность \vec{H} магнитного поля связаны [45]

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}, \quad (2.3.1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – магнитная проницаемость среды в долях μ_0 .

Из соотношения (2.3.1) видно, что векторы \vec{B} и \vec{H} аналогичны векторам электрического поля \vec{D} и \vec{E} . Следуя аналогии магнитного и электрического полей, определим скалярный магнитный потенциал F_m в произвольной точке, как работу, совершаемую при переносе полюса с единичной магнитной массой из бесконечности в данную точку, т.о.

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}F_m) = \rho_m / \mu \cdot \mu_0,$$

где ρ_m – плотность магнитной массы.

Тогда

$$\operatorname{div}\vec{B} = \rho_m;$$

$$\vec{H} = -\operatorname{grad}F_m.$$

Проведенный анализ предполагает существование свободных полюсов, однако, в действительности магнитные полюсы существуют только попарно, как диполи и результирующий поток, пересекающий любую поверхность, равен нулю:

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0;$$

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}F_m) = 0.$$

Таким образом, магнитный потенциал F_m удовлетворяет уравнению Лапласа.

Магнитный момент магнитного диполя \vec{p}_m – векторная величина для магнитного диполя, равная

$$\vec{p}_m = q_m \cdot \vec{l} . \quad (2.3.2)$$

Магнитный момент тела – векторная величина, равная сумме магнитных диполей в данном теле.

Магнитная восприимчивость χ_m – величина, характеризующая свойство вещества намагничиваться в магнитном поле, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля намагниченности к модулю напряженности магнитного поля, и тензорная для анизотропного вещества.

Магнитная восприимчивость вещества связана с его магнитной проницаемостью соотношением [46]

$$\mu = 1 + \chi_m .$$

В силу аналогии электрического и магнитного полей можно развить полную теорию магнитных зарядов. При этом все формулы и законы магнитостатики можно получить из соответствующих формул электростатики, заменив в них электрические заряды q магнитными зарядами q_m , напряженность электрического поля \vec{E} – напряженностью магнитного поля \vec{H} , электрическое смещение \vec{D} – магнитной индукцией \vec{B} и диэлектрическую проницаемость ε – магнитной проницаемостью μ .

В литературе часто заменяют термин «фиктивный магнитный заряд q_m » на термин «магнитная масса m_s », поэтому эти понятия встречаются достаточно часто.

Рассмотрим границу, отделяющую магнитную частицу с бесконечно большой магнитной проницаемостью от вакуума. Если сдвинуть элемент dl этой поверхности в направлении потока (перпендикулярно поверхности) на расстояние dp , то изменение запаса энергии dW на единицу длины в объеме, через который проходит элемент, будет определяться выражением

$$dW = \frac{1}{2} \mu_0 H_p^2 dl dp .$$

Однако сила F_p , действующая на элемент dl в направлении p , равна $\frac{dW}{dp}$, следовательно,

$$F_p = \frac{1}{2} \mu_0 H_p^2 dl,$$

в связи с чем, составляющая силы, действующей на участок границы, определяется выражением

$$\frac{1}{2} \mu_0 \int H_p^2 dl,$$

где интегрирование производится в пределах рассматриваемого участка границы. Сила, действующая на каждый участок, находится в результате интегрирования квадрата напряженности поля (которая направлена по нормали к поверхности) в пределах участка, а её направление, конечно, совпадает с направлением вектора напряженности поля.

Выражение (2.3.2) позволяет определить силу, действующую на границу частицы достаточно простой формы.

В остальном выводы по движению ферромагнитной частицы в магнитостатическом поле аналогичны выводам, для движения частиц в электростатическом поле, а именно:

- магнитные диполи изменяют направление движения только вблизи ребер магнита;
- частицы, имеющие магнитную массу (или магнитный заряд) будут отталкиваться от одноименного полюса магнита и притягиваться к полюсу магнита противоположного знака, если магнитное поле переменное;
- перераспределение масс в магнитном поле происходит аналогично перераспределению масс в электрическом поле.

Рассмотрим принципиальную возможность расчета силы магнитного притяжения, действующей на ферромагнитную частицу. В основном она

определяется нормальной составляющей вектора магнитной индукции и может быть найдена на основании известного соотношения Максвелла [47]:

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (2.3.3)$$

где P – сила, действующая на единицу поверхности ферромагнитного тела; B – нормальная составляющая магнитной индукции на поверхности ферромагнитного тела; μ_0 – магнитная постоянная.

Таким образом, задача сводится к определению B , то есть к расчету магнитного поля в рабочем зазоре устройства с бесконтактным взаимодействием. В качестве примера, рассмотрим УБМВ с аксиально намагниченным магнитом. Очевидно, что магнитное поле данного устройства обладает осевой симметрией, то есть оно плоскопараллельно.

Расчет магнитного поля в рабочем зазоре этого устройства выполняется при следующих допущениях:

- магнитная проницаемость стали магнитопроводов бесконечно велика по сравнению с магнитной проницаемостью вакуума;
- магнитное поле описывается уравнением Лапласа;
- ферромагнитные микрочастицы, в силу своей малости, не искажают магнитное поле в области рабочего зазора УБМВ.

Комплексная потенциальная функция для скачка магнитного потенциала $F_m = const$ на интервале $(-\infty, 0)$ имеет вид [48]:

$$w' = \frac{F_m}{\pi} \ln t. \quad (2.3.4)$$

Подставляя (2.3.4) в (2.3.3) и выполнив интегрирование по поверхности ферромагнитного тела, имеем,

$$P = \frac{1}{\mu_0} \frac{F_m^2}{2\pi^2} \frac{1}{|S|} \int_S \frac{dt}{\sqrt{|G(t)|}}, \quad (2.3.5)$$

где S – масштабный коэффициент.

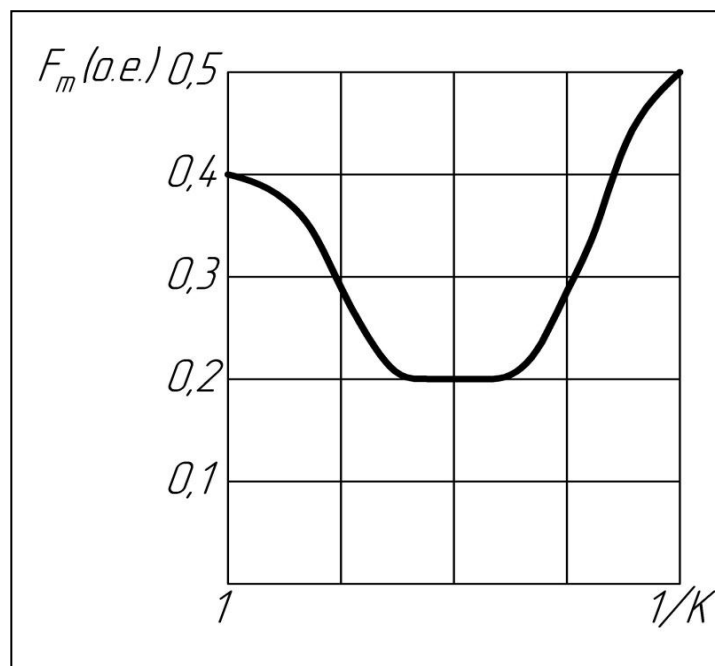


Рис.2.3.1. Зависимость силы притяжения F_m , действующей на микрочастицы со стороны магнитного поля вдоль магнита при отношении его длины к расстоянию между магнитами $K = 8$

На рис.2.3.1 представлена зависимость силы притяжения F_m , действующей на микрочастицы со стороны магнитного поля вдоль магнита при отношении его длины к расстоянию между магнитами равном 8.

Выражение (2.3.5) определяет силу магнитного притяжения, действующую на ферромагнитную частицу, в зависимости от ее размеров и положения в пространстве, а также режима работы устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

2.4. Газовыделение из вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Процесс газовыделения при взаимодействии в вакууме сопряженных тел сложен и неоднозначен [49]. Количественная оценка суммарного газового потока в опорном узле УБМВ может быть выполнена на основе рассмотрения физического механизма образования каждой из составляющих суммарного потока, поступающих при работе функционального устройства манипулятора в вакуумный объём.

Условие баланса газовых потоков в зоне контактирования сопряженных тел представляется выражением [50]

$$q_{\Sigma} = -q_{\text{исп}} - q_{\text{изн}} + q_{\text{диф}} + q_{\text{кон}},$$

где q_{Σ} – суммарный газовый поток;

$q_{\text{исп}}$ – поток испарения, образованный термической десорбцией;

$q_{\text{изн}}$ – поток, образованный износом контактирующих поверхностей материалов;

$q_{\text{диф}}$ – поток, образованный диффузией газов в объём материала;

$q_{\text{кон}}$ – поток, образованный конденсацией в результате адсорбции молекул газа на поверхности материала.

Поток, образованный износом контактирующих поверхностей, определяется исходя из следующих допущений [51]:

1. Поверхность контакта смоделирована в виде сферических сегментов одинаковой высоты.

2. В момент фрикционного контактного взаимодействия на поверхности контакта не происходит осаждение молекул.

3. За одно контактное взаимодействие происходит «срезание» всех адсорбированных молекул, осажденных на поверхности контакта.

4. Износ поверхностей происходит в зоне вершин микронеровностей.

Коэффициент диффузии (в м²/с) определяется

$$D = D_0 \exp[-Q_D / (nRT)],$$

где D_0 – коэффициент пропорциональности, не зависящий от температуры;

Q_D – энергия активации при диффузии;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/К·моль;

T – температура;

n – число атомов в молекуле газа.

Относительная поверхность контакта определяется

$$\theta = \frac{A_B}{A_r},$$

где A_B – площадь поверхности контакта единичной микронеровности, $A_B = \pi \cdot b^2$;

A_r – площадь сегментной модели,

$$A_r = \pi(2R \cdot R_{\max} - R_{\max}^2).$$

Время адсорбции (в с) рассчитывается [52]

$$\tau_a = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_a}{RT}\right),$$

где τ_0 – минимальное время пребывания молекулы в адсорбированном состоянии, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с;

Q_a – энергия активации при адсорбции, Дж/моль. Ориентировочно принимается равной энергии активации при диффузии, то есть $Q_a \approx Q_D$.

Время (в с), в течение которого происходит процесс “срезания” всех адсорбированных молекул определяется

$$t_a = \frac{2b}{v_{\text{ск}}},$$

где b – радиус фрикционного пятна контакта;

$v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения во фрикционном контакте.

Скорость конденсации (в $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) рассчитывается как

$$\mu = 0,1 \cdot p \cdot \sqrt{2\pi \cdot m \cdot k \cdot T},$$

где p – остаточное давление в вакуумной камере;

m – масса молекулы;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Параметр (в $1/\text{с}$), учитывающий процессы конденсации и адсорбции в зоне трения определяется

$$B = \frac{1-\theta}{\tau_a} + \frac{\theta}{t_a} + \frac{\mu}{a_m},$$

где a_m – количество молекул, образующий монослой на единице поверхности.

Концентрация газов (в $1/\text{м}^3$), растворенных в материале, рассчитывается

$$S = S_0 \cdot p^{1/n} \exp[Q_s / (n \cdot R \cdot T)],$$

где S_0 – постоянный коэффициент, определяется из справочных материалов [53];

Q_s – энергия активизации при растворении.

Параметр (в $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$), учитывающий процессы конденсации и растворимости газов, определяется

$$F = \mu - S \cdot v_{\text{ск}} \cdot I_h,$$

где I_h – средняя линейная интенсивность изнашивания.

Газовый поток (в $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) из опорного узла из зоны трения определяется

$$q = - \left[D \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{l} \right)^2 + B \right] \times \left[S \cdot d - \frac{(\mu - S \cdot v_{\text{ск}} \cdot I_h)}{B} \right],$$

где l – толщина твердого тела;

d – диаметр молекулы газа.

Знак минус перед формулой показывает, что газовый поток идет из зоны трения.

Рассматривая диффузионный процесс как достаточно медленный, то есть полагая, что изменение концентрации газа по объёму тела мало, можно положить, что $D \frac{d^2 a}{dx^2} \rightarrow 0$, а поток из зоны трения равен нулю, тогда количество молекул адсорбированных на единицу поверхности тела можно определить исходя из формулы

$$-(1-\theta) \frac{a}{\tau_a} - \theta \frac{a}{t_a} - S \cdot v_{\text{ск}} \cdot I_h + \mu \left(1 - \frac{a}{a_m}\right) = 0,$$

откуда, принимая во внимание то, что поверхность контакта по микронеровностям составляет лишь часть общей поверхности модели шероховатости, количество молекул, адсорбированных на единицу поверхности тела, будет равно:

$$a = \frac{t_a \cdot a_m \cdot (1-\theta) + \tau_a \cdot a_m \cdot \theta + \tau_a \cdot t_a \cdot \mu}{\tau_a \cdot t_a \cdot a_m \cdot (\mu - S \cdot v_{\text{ск}} \cdot I_h)}.$$

Максимальное значение $a \leq a_m$.

В противном случае молекулы будут удаляться с поверхностей, то есть

$$a \leq \frac{t_a \cdot a_m \cdot (1-\theta) + \tau_a \cdot a_m \cdot \theta + \tau_a \cdot t_a \cdot \mu}{\tau_a \cdot t_a \cdot a_m \cdot (\mu - S \cdot v_{\text{ск}} \cdot I_h)}.$$

Отсюда

$$I_h \leq \frac{\tau_a \cdot t_a \cdot a_m^2 \cdot \mu - t_a \cdot a_m (1-\theta) - \tau_a \cdot a_m \cdot \theta - \tau_a \cdot t_a \cdot \mu}{\tau_a \cdot t_a \cdot a_m^2 \cdot S \cdot v_{\text{ск}}}.$$

Полученная формула позволяет определить максимальную интенсивность изнашивания материала при которой газовый поток, из опорного узла устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, равен нулю.

По разработанной модели составлен алгоритм и программа расчёта газовой выделенности из вакуумных УБМВ. Программа защищена Свидетельством РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ [54].

Наряду с сведением к минимуму газового потока из опорного узла УБМВ, необходимо снижать газовую выделенность с поверхностей устройства, обращённых в вакуумный объём.

С этой точки зрения УБМВ, как внутрикамерные устройства обладающие малыми и средними передаваемыми усилиями, целесообразно конструировать в бескорпусном исполнении.

На рис.2.4.1 и 2.4.2 представлены бескорпусное редукторное устройство с бесконтактным магнитным взаимодействием и редуктор в традиционном корпусном исполнении (закрытый редуктор) соответственно.

Проведенный анализ показывает, что в конструкциях

$$S_2 / S_1 = 4 \div 5,$$

где S_1 – площадь редукторного УБМВ, расположенного в вакууме;
 S_2 – площадь закрытого редуктора, расположенного в вакууме.

Применение устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием в бескорпусном исполнении позволяет в 4 и более раз уменьшить газовую выделенность с его поверхности.

2.5. Расчёт и выбор шарикоподшипников для вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Анализ устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием вакуумного оборудования электронной техники показывает, что их надёжность в значительной степени определяется надёжностью шарикоподшипников, работающих в условиях прогреваемого вакуума в диапазоне оста-

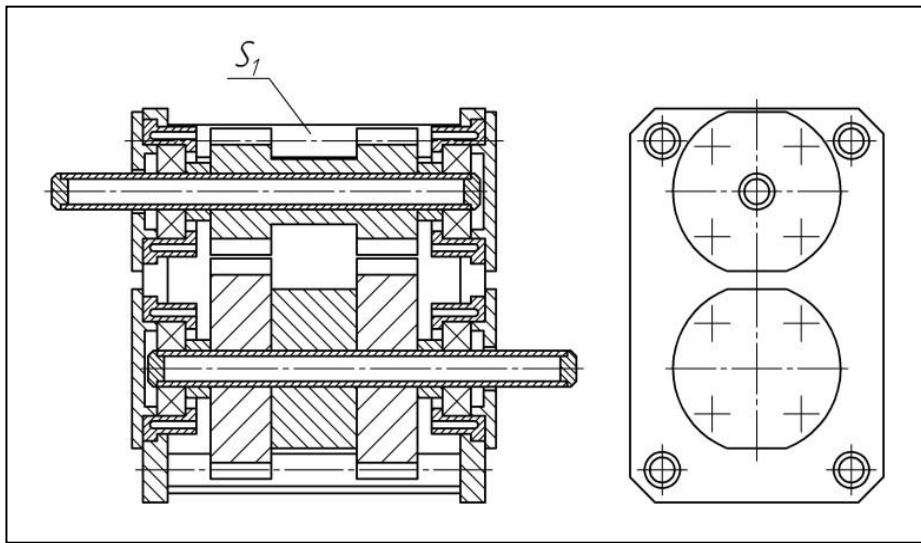


Рис.2.4.1. Бескорпусное внутрикамерное устройство с бесконтактным магнитным взаимодействием

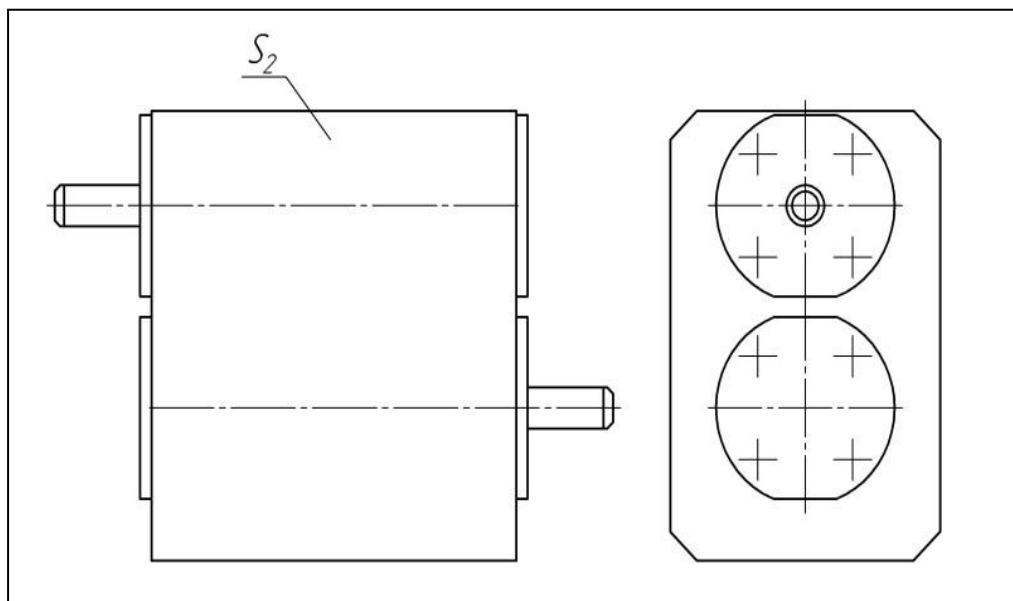


Рис.2.4.2. Закрытый редуктор

точных давлений $10^1 \dots 10^{-8}$ Па и температуры до 800°C .

На рис.2.5.1 представлен опорный узел УБМВ.

В связи с этим стандартная методика ISO ТК-4 [55] не может быть перенесена для проектного и поверочного расчётов шарикоподшипников вакуумного оборудования, в том числе для вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, где необходимо учитывать влияние вакуума, смазки и температуры.

Динамическая грузоподъемность (в Н) однорядных радиальных шарикоподшипников определяется

$$C_p = L^{1/3} \cdot P_r, \quad (2.5.1)$$

где L – номинальная долговечность шарикоподшипника (в млн.об);

P_r – эквивалентная нагрузка.

Номинальная долговечность шарикоподшипника рассчитывается

$$L = \frac{60n \cdot L_h}{10^6}, \quad (2.5.2)$$

где n – частота вращения шарикоподшипника;

L_h – номинальная долговечность шарикоподшипника (в ч).

Эквивалентная нагрузка (в Н) для шарикоподшипника вычисляется

$$P_r = (X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a) K_B \cdot K_T \cdot K_V \cdot K_C, \quad (2.5.3)$$

где X – коэффициент радиальной нагрузки;

V – коэффициент вращения;

F_r – радиальная нагрузка на шарикоподшипник;

Y – коэффициент осевой нагрузки;

F_a – осевая нагрузка на шарикоподшипник;

K_B – коэффициент безопасности;

K_T – температурный коэффициент;

K_V – коэффициент вакуума;

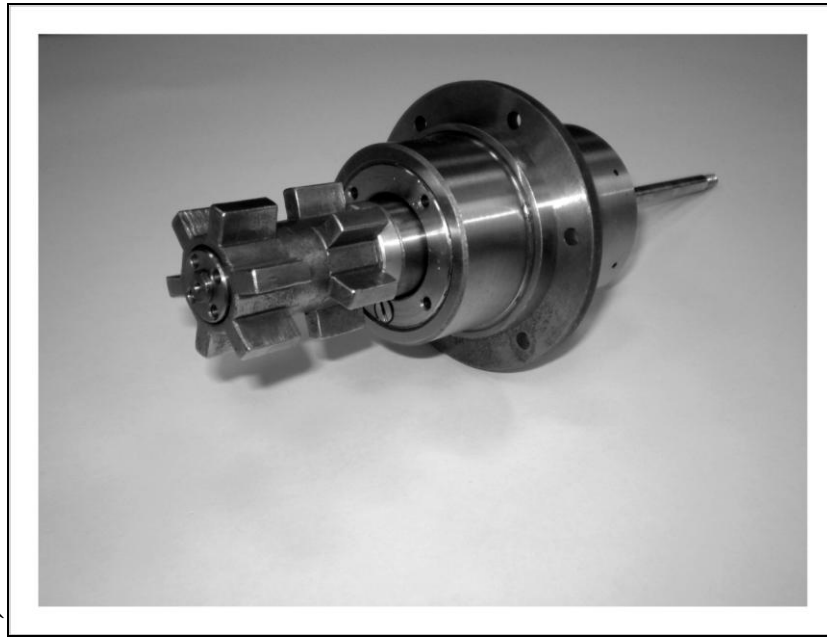


Рис.2.5.1. Опорный узел устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием

Таблица 2.5.1

Зависимость коэффициента K_B от остаточного давления p в вакуумной камере

$p, \text{Па}$	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2
K_B	9,85	8,37	6,86	5,53	4,37	3,37	2,48	1,89	1,53	1,34

Таблица 2.5.2

Зависимость коэффициента K_C от коэффициента трения f в контакте шарик – сепаратор

f	0,02	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
K_C	0,94	0,95	1,56	2,35	3,21	4,01	4,79	5,69	6,51	8,22

K_C – коэффициент смазки или покрытия.

Критерием выбора коэффициентов X и Y является безразмерный параметр e – коэффициент осевого нагружения, который определяется

$$e = \frac{F_a}{V \cdot F_r}. \quad (2.5.4)$$

При $e < 19$ имеем $X = 1,0$ и $Y = 0$.

Если $0,19 \leq e \leq 0,44$, то $X = 0,56$, а Y находится по справочным материалам [56].

При $e > 0,44$ имеем $X = 0,56$ и $Y = 1,0$.

Коэффициент вращения V определяется в зависимости от того, какое из колец шарикоподшипника вращается: внутреннее или наружное.

При вращении внутреннего кольца $V = 1,0$. Для наружного $V = 1,2$.

Значения радиальной F_r и осевой F_a нагрузок являются исходными данными к расчёту.

Коэффициент безопасности K_B определяется в зависимости от динамического режима работы шарикоподшипника и степени точности изготовления вакуумного УБМВ [57].

Температурный коэффициент K_T определяется в зависимости от температурного режима работы шарикоподшипника по справочнику [57].

Коэффициент вакуума K_V учитывает влияние вакуума на работоспособность шарикоподшипника и определяется в зависимости от остаточного давления p в вакуумной камере по табл. 2.5.1.

Коэффициент смазки или покрытия K_C учитывает влияние смазки на работоспособность шарикоподшипника и определяется в зависимости от коэффициента трения f в контакте шарик-сепаратор по табл. 2.5.2.

Значения коэффициентов вакуума K_V и смазки или покрытия K_C получены по результатам компьютерной обработки данных экспериментальных исследований, выполненных на кафедре «Технологические системы электроники» МИЭМ.

Подставив численные значения выражений (2.5.2) и (2.5.3) в выражение (2.5.1), находим расчётную величину динамической грузоподъемности C_p (в Н), по которой выбирается необходимый типоразмер шарикоподшипника из каталога, например, [56].

Причём $C \geq C_p$,

где C – табличное значение динамической грузоподъемности шарикоподшипника, выбранного по каталогу.

Поверочный расчёт заключается в определении номинальной долговечности шарикоподшипника по табличному значению его динамической грузоподъемности.

Параметр e определяется по формуле (2.5.4):

$$e = \frac{F_a}{V \cdot F_r}.$$

Эквивалентная нагрузка P_r рассчитывается по формуле (2.5.3):

$$P_r = (X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a) K_B \cdot K_T \cdot K_V \cdot K_C.$$

Номинальная долговечность шарикоподшипника L_h , (в ч), определяется

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P_r} \right)^3.$$

Разработанная методика позволяет производить расчёт и выбор шарикоподшипников для вакуумных УБМВ с учётом влияния вакуума, смазки (или покрытия) [58] и температуры.

В следующем разделе монографии рассмотрен расчёт зазоров в опорах качения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, работающих в условиях вакуума при повышенных температурах.

2.6. Расчёт зазоров в опорах качения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, работающих в вакууме при повышенных температурах

Радиальные и осевые зазоры в подшипниках качения входят во все расчетные формулы, по которым определяются погрешности за счет опор. Величину этих зазоров следует рассчитывать с приложением теории вероятностей, так как ни один из зазоров не может считаться детерминированным параметром: он получается при сборке минимум двух деталей.

Рассмотрим расчёт зазоров различных видов, возникающих в опорах качения УБМВ, работающих в вакууме при повышенных температурах.

Определение необходимой величины теплового компенсационного зазора в УБМВ

При сборке УБМВ валы с элементами передач и другими деталями монтируются в корпуса. Как правило, корпуса и валы выполняются из разных материалов, имеющих неодинаковые коэффициенты линейного расширения. При изменении температуры корпус и вал будут иметь неодинаковые термические деформации. Если тепловое расширение элементов устройства в конечном счёте ликвидирует первоначальный осевой зазор, то произойдет заклинивание подшипников. В то же время, слишком большие осевые люфты нежелательны из-за снижения точности функционального устройства.

Для предотвращения заклинивания в размерную цепь вала УБМВ вводится, как самостоятельное звено, тепловой зазор S_T (рис.2.6.1). Характерной особенностью этого звена является его зависимость от температуры.

Проанализируем эту зависимость на примере схемы, представленной на рис.2.6.1. Предположим, что коэффициент линейного расширения материала корпуса α_K больше, чем у материала вала α_B (что чаще всего и бывает). Тогда при нормальной температуре (температура в момент изготовления и сборки) размеры A_K и A_B принимают значения $A_{KНОРМ}$ и $A_{ВНОРМ}$, а тепловой зазор – $S_{ТНОРМ}$ (рис.2.6.2). При повышении температуры происходит увеличение зазора до $S_{Тmax}$, а при понижении – уменьшение до $S_{Тmin}$. Опасность с точки зрения заклинивания в данном случае представляет понижение температуры. В этой критической ситуации осевой зазор должен быть все же больше нуля, хотя с точки зрения повышения прецизионности устройства именно нулевой зазор наиболее выгоден.

Из схемы, представленной на рис.2.6.2, видно, что в любом случае

$$S_T = A_K - A_B.$$

Вычислим разность

$$S_{Тmax} - S_{Тmin}.$$

При этом учтем, что

$$\Delta A = \Delta t \cdot A \cdot \alpha. \quad (2.6.1)$$

$$S_{Тmax} = A_{Kmax} - A_{Вmax};$$

$$S_{Тmin} = A_{Kmin} - A_{Вmin};$$

$$S_{Тmax} - S_{Тmin} = (A_{Kmax} - A_{Kmin}) - (A_{Вmax} - A_{Вmin}) = \quad (2.6.2)$$

$$= \Delta A_K - \Delta A_B = A_K \alpha_K (t_{max} - t_{min}) - A_B \alpha_B (t_{max} - t_{min}).$$

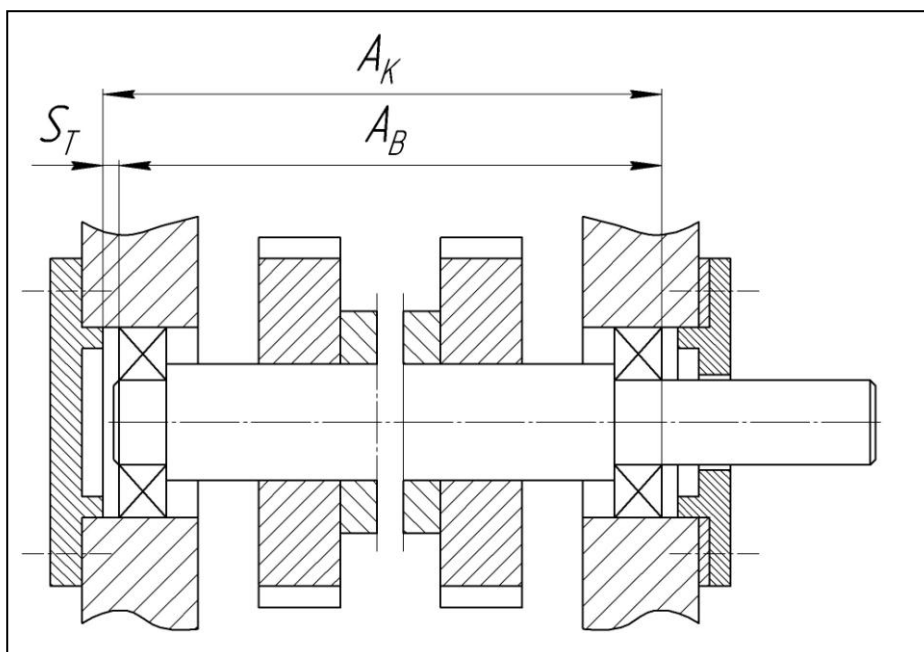


Рис.2.6.1. Схема теплового компенсационного зазора в опорах качения УБМВ

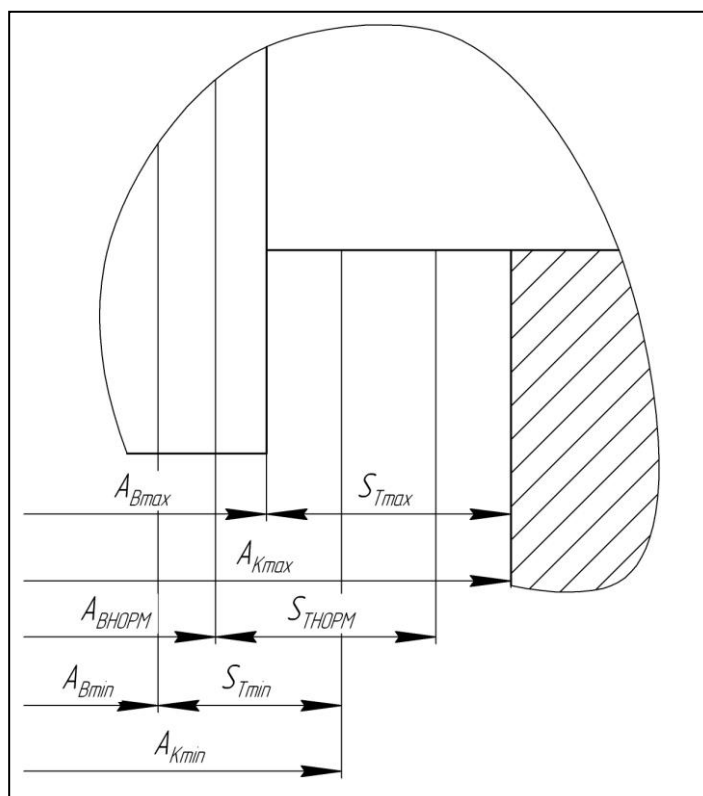


Рис.2.6.2. Схема изменения теплового зазора при повышении температуры

В связи с весьма малой разницей полагаем $A_K \approx A_B = A$.

Тогда

$$S_{T_{\max}} - S_{T_{\min}} = A(t_{\max} - t_{\min})(\alpha_K - \alpha_B). \quad (2.6.3)$$

Обобщая формулу (2.6.3) на случай, когда $\alpha_B > \alpha_K$, имеем

$$S_{T_{\max}} - S_{T_{\min}} = A(t_{\max} - t_{\min})|\alpha_K - \alpha_B|, \quad (2.6.4)$$

где t_{\max}, t_{\min} – температурные пределы эксплуатации узла (с учетом знака).

По формуле (2.6.4) можно определить требуемую предельную разность тепловых зазоров при экстремальных температурах. Величину $S_{T_{\min}}$, учитывая наличие возможного разброса коэффициентов линейного расширения материалов, рекомендуется принимать [59]

$$S_{T_{\min}} = (0,1 \div 0,2)(S_{T_{\max}} - S_{T_{\min}}). \quad (2.6.5)$$

С учётом выражений (2.6.1÷2.6.5), для любого температурного перепада можно записать

$$S_T = A \cdot \Delta t [\alpha_K - \alpha_B]. \quad (2.6.6)$$

Из формулы (2.6.6) видно, что тепловой зазор линейно зависит от температуры. При $t = t_{\min}$; $S_T = S_{T_{\min}}$. При $t = t_{\max}$; $S_T = S_{T_{\max}}$. График зависимости теплового зазора от температуры в общем виде представлен на рис.2.6.3.

Из рис. 2.6.3 по чисто геометрическим соображениям очевидно

$$S_{T_{\text{НОРМ}}} = S_{T_{\min}} + (S_{T_{\max}} - S_{T_{\min}}) \cdot \frac{t_{\text{НОРМ}} - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (2.6.7)$$

Формула (2.6.7) позволяет подсчитать необходимый номинальный тепловой зазор при температуре сборки.

Таким образом, для расчета теплового зазора необходимо сначала определить его предельную величину при температуре, которая соответствует максимальному увеличению люфтов (формула 2.6.4), затем найти минимальный зазор при температуре, способствующей уменьшению люф-

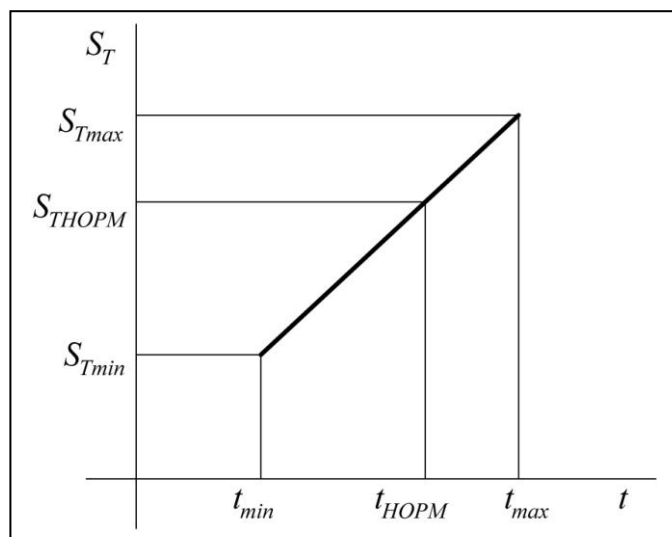


Рис.2.6.3. Зависимость теплового зазора от температуры

тов (формула 2.6.5), после чего подсчитать номинальную величину теплового зазора при температуре сборки (формула 2.6.7). Верхнее отклонение теплового зазора лучше брать равным нулю, а нижнее – равным S_{Tmin} (по формуле 2.6.5). В этих условиях фактическое значение S_{Tmin} в крайнем случае будет равно нулю. Если такой допуск будет слишком узким, то можно отклонения на S_{THOPM} назначить в пределах $\pm S_{Tmin}$.

Для того, чтобы выдержать заданный допуск теплового зазора, необходимо допуски и отклонения размеров, входящих в данную размерную цепь, выдерживать в определенных пределах. В качестве замыкающего размера рекомендуется принимать длину вала по заплечикам. Допуск и отклонение этого размера определяется по методике, принятой в настоящее время при расчёте размерных цепей (см. например [60]).

Если допуск длины вала по заплечикам получается неприемлемым по условиям технологии производства, то в размерную цепь вводят звенья – компенсаторы. Чаще всего эту роль выполняют регулировочные прокладки, монтируемые под крышки подшипников качения. С их помощью искусственно регулируют тепловой зазор до необходимой величины.

При расчёте погрешностей во всех случаях, когда в определении ошибки участвуют осевой люфт, необходимо учитывать, что тепловой зазор зависит от температуры и что наибольшая погрешность может быть получена не при температуре сборки, а при одном из экстремальных значений этого параметра.

Расчет осевой игры в подшипниках качения УБМВ

Осевая игра в опорах качения возникает из-за того, что шарики под действием осевой нагрузки имеют возможность смещаться по дорожкам качения в осевом направлении вместе с одним из колец. Величину осевой игры для радиальных однорядных шарикоподшипников можно определить на основании формулы, приведённой в работе [61]

$$S_0 = e \sqrt{\frac{4D_w}{e} (2x - 1) - 1}, \quad (2.6.8)$$

где e – радиальный зазор в шарикоподшипнике;

D_w – диаметр шарика.

Отношение x равно

$$x = \frac{r_k}{D_w}, \quad (2.6.9)$$

где r_k – радиус дорожки качения.

Для стандартных шарикоподшипников $x = 0,515$ и формула (2.6.8) несколько упрощается

$$S_0 = e \sqrt{\frac{0,12D_w}{e} - 1}. \quad (2.6.10)$$

Расчёт по соотношению (2.6.10) показывает, что осевая игра в 7÷12 раз превышает радиальный зазор.

В формулах по определению погрешностей обычно фигурирует средневероятная осевая игра \bar{S}_0 и допуск осевой игры δS_0 . Их также мож-

но подсчитать на основании формулы (2.6.10), если известны максимальное и минимальное значение радиального зазора e_{\max} и e_{\min} .

Тогда

$$S_{0\max} = e_{\max} \sqrt{\frac{0,12D_w}{e_{\max}} - 1}; \quad (2.6.11)$$

$$S_{0\min} = e_{\min} \sqrt{\frac{0,12D_w}{e_{\min}} - 1}; \quad (2.6.12)$$

$$\delta S_0 = S_{0\max} - S_{0\min}; \quad (2.6.13)$$

$$S_0 = 0,5\delta S_0. \quad (2.6.14)$$

Расчёт радиальных зазоров в подшипниках качения УБМВ

Подшипники качения, выпущенные заводом-изготовителем, имеют начальный радиальный зазор e_0 . Его величина определяется разбросом размеров шариков и колец в подшипнике качения и нормируется в определенных пределах.

При монтаже подшипника в узле начальный зазор изменяется. Натяг внутреннего кольца, смонтированного на вал, увеличивает диаметр по дорожке качения и уменьшает начальный зазор. Аналогично действует натяг наружного кольца, если оно ставится в корпусе устройства с отрицательным зазором. Приложение нагрузки вследствие появления монтажных деформаций наоборот увеличивает начальный зазор. Нагрев или охлаждение приводят к тепловым деформациям шариков и колец, и в зависимости от знака температурного градиента могут увеличивать, либо уменьшать начальный зазор.

В общем виде

$$e = e_0 - e_{\Pi} + e_{\text{H}} \pm e_{\text{ТЕМП}}, \quad (2.6.15)$$

где e_0 – начальный зазор;
 e_{Π} – посадочный зазор;
 e_{H} – нагрузочный зазор;
 $e_{\text{ТЕМП}}$ – термический зазор.

В формуле (2.6.15) только нагрузочный натяг является детерминированным параметром: остальные слагаемые имеют разброс и определяются с помощью соотношений теории вероятностей [62].

Средневероятный радиальный зазор в подшипнике составляет

$$e = \bar{e}_0 + \bar{e}_{\Pi} - e_{\text{H}} \pm e_{\text{ТЕМП}} . \quad (2.6.16)$$

Штрихами сверху отмечены средневероятные значения соответствующих параметров.

Максимальное и минимальное вероятное отношения радиального зазора будут равны

$$\varepsilon(e)_{\max} = \varepsilon(e)_{\min} = \sqrt{[\varepsilon(e_0)]^2 + [\varepsilon(e_{\Pi})]^2 + [\varepsilon(e_{\text{ТЕМП}})]^2} . \quad (2.6.17)$$

Максимальный и минимальный вероятные радиальные зазоры

$$e_{\max} = \bar{e} + \varepsilon(e)_{\max} ; \quad (2.6.18)$$

$$e_{\min} = \bar{e} - \varepsilon(e)_{\min} . \quad (2.6.19)$$

Наименьшую долю в общий радиальный зазор вносит, как правило, слагаемое e_{H} . Учитывать влияние контактных деформаций рационально лишь при наличии больших внешних нагрузок. В УБМВ такой случай маловероятен, хотя и не исключен.

Для радиальных однорядных шарикоподшипников величину e_{H} определяют по формуле, получаемой на базе теории контактных напряжений Герца [63]

$$e_{\text{H}} = 2,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_{\text{r}}^2}{Z^2 d_{\text{ш}}}} , \quad (2.6.20)$$

где F_{r} – радиальная нагрузка;

Z – число шариков;

$d_{ш}$ – диаметр шарика.

Для определения посадочного зазора задаются типами посадок колец на валик и в корпус, подсчитываются средневероятные натяги и их отклонения, а также максимальный и минимальный вероятный натяг.

Затем определяют средневероятное давление в посадке кольца на вал (или в корпус)

$$\bar{P}_{ВК} = 105 \frac{1 - \left(\frac{4d}{D + 3d} \right)^2}{d} \cdot \bar{\Delta}; \quad (2.6.21)$$

$$\bar{P}_{НК} = 105 \frac{1 - \left(\frac{3D + d}{4D} \right)^2}{d} \cdot \bar{\Delta}, \quad (2.6.22)$$

где D – наружный диаметр подшипника;

d – внутренний диаметр подшипника;

$\bar{\Delta}$ – средневероятный натяг.

Подставляя в соотношения (2.6.21) и (2.6.22) вместо средневероятного натяга его максимальное (Δ_{\max}) и минимальное (Δ_{\min}) значения, находят P_{\max} и P_{\min} – максимальное и минимальное давление посадки, а затем переходят к расчёту посадочных деформаций.

Средневероятное увеличение диаметра внутреннего кольца подшипника по дорожке качения

$$\bar{e}_{ПВК} = \frac{P_{ВК} d^2}{10^2 d_{ЖВ} \left(1 - \frac{d^2}{d_{ЖВ}^2} \right)}. \quad (2.6.23)$$

Аналогично, уменьшение диаметра наружного кольца при посадке в корпус

$$\bar{e}_{\text{ПНК}} = \frac{P_{\text{БК}} d_{\text{ЖН}}}{10^2 \left(1 - \frac{d_{\text{ЖН}}^2}{D^2} \right)}. \quad (2.6.24)$$

Обозначения и размерность величин – как в формулах (2.6.21) и (2.6.22).

Диаметры колец по желобам – внутреннего $d_{\text{ЖВ}}$ и наружного $d_{\text{ЖН}}$ определяются из геометрических соображений

$$d_{\text{ЖВ}} = \frac{D+d}{2} - D_{\text{W}}; \quad (2.6.25)$$

$$d_{\text{ЖН}} = \frac{D+d}{2} + D_{\text{W}}. \quad (2.6.26)$$

Подставляя в формулы (2.6.23) и (2.6.24) вместо средневероятного давления посадки \bar{P} его предельные значения P_{max} и P_{min} можно подсчитать максимальный и минимальный вероятный посадочный зазор.

После этого можно определить отклонение посадочного зазора

$$\varepsilon(e_{\text{П}}) = e_{\text{Пmax}} - \bar{e} = \bar{e} - e_{\text{Пmax}}. \quad (2.6.27)$$

Несколько сложнее обстоит дело с определением температурного зазора в подшипнике качения. При нагреве тепловое расширение внутреннего кольца $e_{\text{БК}}$ и шариков $e_{\text{Ш}}$ уменьшает зазор, а аналогичная деформация наружного кольца $e_{\text{НК}}$ его увеличивает.

Считая уменьшение зазора со знаком минус, можно записать

$$e_{\text{ТЕМП}} = -e_{\text{БК}} + e_{\text{НК}} - e_{\text{Ш}}. \quad (2.6.28)$$

В то же время

$$e_{\text{БК}} = d_{\text{ЖВ}} \alpha_{\text{БК}} \Delta t_{\text{БК}}; \quad (2.6.29)$$

$$e_{\text{НК}} = d_{\text{ЖН}} \alpha_{\text{НК}} \Delta t_{\text{НК}}; \quad (2.6.30)$$

$$e_{\text{Ш}} = 2D_{\text{W}} \alpha_{\text{Ш}} \Delta t_{\text{Ш}}, \quad (2.6.31)$$

где $\alpha_{\text{БК}}$, $\alpha_{\text{НК}}$, $\alpha_{\text{Ш}}$ – коэффициенты линейного расширения материалов внутреннего, наружного кольца и шариков;

$\Delta t_{\text{БК}}$, $\Delta t_{\text{НК}}$, $\Delta t_{\text{Ш}}$ – перепады температур внутреннего, наружного кольца и шариков по сравнению со средой.

Для стандартных подшипников материалы всех деталей одинаковы $\alpha_{\text{БК}} = \alpha_{\text{НК}} = \alpha_{\text{Ш}}$. При равномерном прогреве подшипника $\Delta t_{\text{БК}} = \Delta t_{\text{НК}} = \Delta t_{\text{Ш}}$.

Подставляя в формулу (2.6.28) соотношения (2.6.29)÷(2.6.31), а диаметры внутреннего и наружного колец по желобам выражая через (2.6.25)÷(2.6.26) получим:

$$e_{\text{ТЕМП}} = \left(\frac{D+d}{2} + D_{\text{W}} \right) \alpha \Delta t - \left(\frac{D+d}{2} - D_{\text{W}} \right) \alpha \Delta t - 2D_{\text{W}} \alpha \Delta t = 0.$$

При равномерном прогреве и одинаковых материалах деталей температурный зазор в подшипнике равен нулю. Говорить об изменении радиального люфта в опоре качения можно лишь при условии неравномерного прогрева, но в этом случае задача заметно усложняется, поскольку должно быть известно температурное поле внутри подшипника, а это весьма сложная теоретическая задача. Ограничимся приближенным решением, имеющим точность достаточную для инженерных расчетов.

Определим величину температурного зазора при условии одинаковых материалов деталей подшипников и неравномерного прогрева:

$$e_{\text{ТЕМП}} = \left(\frac{D+d}{2} + D_{\text{W}} \right) \alpha \Delta t_{\text{НК}} - \left(\frac{D+d}{2} - D_{\text{W}} \right) \alpha \Delta t_{\text{БК}} - 2D_{\text{W}} \alpha \Delta t_{\text{Ш}}.$$

Раскрывая скобки и преобразуя, получим

$$e_{\text{ТЕМП}} = D_{\text{CP}} \alpha (\Delta t_{\text{НК}} - \Delta t_{\text{БК}}) + D_{\text{W}} \alpha (\Delta t_{\text{НК}} + \Delta t_{\text{БК}} - 2\Delta t_{\text{Ш}}), \quad (2.6.32)$$

где D_{CP} – средний диаметр подшипника.

Перепады температуры выразим через разности:

$$\Delta t_{\text{HK}} = t_{\text{HK}} - t_{\text{CP}};$$

$$\Delta t_{\text{BK}} = t_{\text{BK}} - t_{\text{CP}};$$

$$\Delta t_{\text{Ш}} = t_{\text{Ш}} - t_{\text{CP}},$$

где t_{CP} – температура среды.

Тогда

$$\Delta t_{\text{HK}} - \Delta t_{\text{BK}} = t_{\text{HK}} - t_{\text{BK}};$$

$$\Delta t_{\text{HK}} + \Delta t_{\text{BK}} - 2\Delta t_{\text{Ш}} = t_{\text{HK}} + t_{\text{BK}} - 2t_{\text{Ш}}. \quad (2.6.33)$$

Если предположить, что температура шарика есть среднеарифметическое температур колец, то

$$t_{\text{Ш}} = \frac{t_{\text{HK}} + t_{\text{BK}}}{2};$$

$$t_{\text{HK}} + t_{\text{BK}} - 2 \frac{t_{\text{HK}} + t_{\text{BK}}}{2} = 0.$$

Предположение это должно быть близко к истине, так как в условиях вакуума тепловой поток передается в основном через шарики теплопроводностью от более нагретого кольца к менее нагретому. Такой случай распределения температур примем как наиболее вероятный.

Для средневероятного температурного зазора соотношение (2.6.32), с учетом равенства нулю второго слагаемого (2.6.33) запишется

$$\bar{e}_{\text{ТЕМП}} = D_{\text{CP}} \alpha (t_{\text{HK}} - t_{\text{BK}}). \quad (2.6.34)$$

Вычислим вероятную ошибку, если температурное поле подшипника иное.

Предположим, что $t_{\text{Ш}} = t_{\text{HK}}$, тогда

$$t_{\text{HK}} + t_{\text{BK}} - 2t_{\text{HK}} = t_{\text{BK}} - t_{\text{HK}};$$

$$e_{\text{ТЕМПmin}} = \alpha (D_{\text{CP}} - D_{\text{W}}) (t_{\text{HK}} - t_{\text{BK}}). \quad (2.6.35)$$

Разделив (2.6.35) на (2.6.34), имеем

$$\frac{e_{\text{ТЕМПmin}}}{e} = 1 - \frac{D_W}{D_{\text{CP}}}.$$

Аналогично, полагая $t_{\text{Ш}} = t_{\text{БК}}$, получим

$$\frac{e_{\text{ТЕМПmax}}}{e} = 1 + \frac{D_W}{D_{\text{CP}}}.$$

Таким образом, ошибка расчёта теплового зазора в предельном случае пропорциональна отношению $\frac{D_W}{D_{\text{CP}}}$.

Тогда

$$\varepsilon(e_{\text{ТЕМП}}) = \bar{e}_{\text{ТЕМП}} \cdot \frac{D_W}{D_{\text{CP}}} = \frac{D_W}{D_{\text{CP}}} \cdot D_{\text{CP}} \alpha(t_{\text{НК}} - t_{\text{БК}}). \quad (2.6.36)$$

В итоге поставленная задача решена. Средневероятный тепловой зазор определяется по формуле (2.6.34), а его вероятное отклонение – по формуле (2.6.36).

2.7. Выбор типа электродвигателя для приводов функциональных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Для применения в приводах функциональных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим (загрязняющим) воздействием на вакуумную среду оборудования высоких технологий, электродвигатель не должен иметь коллектора со щётками, то есть, как и УБМВ быть бесконтактным.

Это требование обусловлено тем, что:

- щёточный контакт является одним из наиболее интенсивных источников генерации загрязняющих микрочастиц [64];

- контакт щёток значительно сокращает ресурс работы электродвигателя, усложняет его обслуживание, загрязняет внутренние поверхности электродвигателя графитовыми микрочастицами износа, снижающими электрическую прочность изоляции, ухудшает стабильность параметров электродвигателя и т.д. [65];
- щёточный контакт при нормальных условиях работы, наряду с изоляцией и подшипниковыми узлами вызывает наибольшее число отказов в работе электрических машин (в среднем до 25 % отказов машин постоянного тока происходит из-за выхода из строя щеточно-коллекторного узла);
- контакт щёток создаёт дополнительные механические и электрические потери, является источником помех и шумов.

В настоящее время создано большое количество бесконтактных электрических машин различных типов.

Исследование бесконтактных электрических машин посвящено большое число работ отечественных и зарубежных учёных [66 ÷ 70].

Приводы для функциональных УБМВ должны быть также безредукторными, так как трущиеся узлы редуктора, генерирующие загрязняющие микрочастицы износа, хотя и расположены вне вакуума (на атмосфере), но как показывают проведённые экспериментальные исследования [71] оказывают дестабилизирующее (загрязняющее) воздействие на вакуумную среду, попадая в неё при загрузке объектов обработки и контроля.

Благодаря устранению редуктора в системе привода, он приобретает хорошую линейность рабочих характеристик, в заданном диапазоне нагрузок. Это позволяет существенно улучшить динамические и точностные характеристики УБМВ. Применение безредукторного привода способствует уменьшению массы и габаритных размеров функциональных УБМВ и повышению общей надёжности вакуумного технологического и аналитиче-

ского оборудования, в котором он применяется. Безредукторные приводы УБМВ позволяют упростить управление в системе с обратной связью.

Так как высокие удельные характеристики электродвигателя очень важны для получения его хороших массогабаритных параметров, то наиболее перспективным для применения в функциональных устройствах с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим (загрязняющим) воздействием на вакуумную среду оборудования высоких технологий, следует считать шаговые электродвигатели.

Шаговыми называют синхронные электродвигатели, преобразующие команду, заданную в виде импульсов, в заданный угол поворота вала или его фиксированное положение без датчиков обратной связи. Принцип действия шаговых электродвигателей основан на дискретном изменении состояния магнитного поля в зазоре за счёт импульсного возбуждения или переключения обмоток [72, 73].

В шаговых электродвигателях, с целью снижения скорости вращения и уменьшения угла шага, используется принцип электромагнитного редуцирования скорости.

Принципы электрического дробления шага, шаговых электродвигателей, позволили синтезировать общее движение из отдельных, сколь угодно малых его интервалов, не зависящих от конструктивных параметров электродвигателя (число полюсов, характеристик обмоток и т.п.).

Использование микропроцессоров и микроЭВМ даёт возможность оперировать большим числом электрических состояний (интервалов) и формировать, тем самым, токи в обмотках электродвигателя по заданному закону. Это обеспечивает максимальное приближение действительных траекторий движений функционального УБМВ к требуемым.

Несмотря на высокий крутящий момент, простоту конструкции и возможность точного позиционирования, без усилителей мощности, шаговые электродвигатели не обеспечивают требуемых, для большинства тех-

нических применений, динамических характеристик. Так же, под влиянием помех или механических воздействий они могут выходить из заданного режима работы, причем возникает постоянная погрешность в системе [74, 75].

Для снижения стоимости правильного эксплуатирования шаговых электродвигателей, целесообразно использовать способ управления с обратной связью, который позволяет исключить влияние колебаний скорости и мощности на точность позиционирования [76].

Таким образом, шаговые электродвигатели являются наиболее перспективными для применения в приводах функциональных УБМВ. Они обеспечивают приемлемые динамические характеристики УБМВ, хорошую управляемость и плавность движений, высокую точность позиционирования при сравнительно низкой стоимости.

При решении вопроса о точности позиционирования УБМВ, то есть устройства с нежесткой магнитной связью, целесообразно использовать принцип оптимального автоматического управления, независящего от интенсивности случайных воздействий на систему.

На рис.2.7.1 представлена разработанная функциональная схема оптимального поворотного устройства [77].

На рисунке:

О – объект управления, представляет собой электродвигатель постоянного тока с обратной связью;

φ_0 – требуемое конечное значение угла поворота;

d/dt – блок дифференцирования регулируемой величины $\varphi(t)$. Реализуется с помощью операционного усилителя с обратной связью;

X – блок перемножения электрических сигналов $\alpha(t)$ и $x(t)$;

МУ – блок моделирующего устройства. Предназначен для формирования требуемого закона изменения $\alpha(t)$, полученного путем численного

решения уравнения Беллмана. Блок МУ реализуется средствами аналоговой или цифровой вычислительной техники.

С учетом влияния вакуумной технологической среды датчиками положения могут служить, индуктосины [78].

Индуктосин – бесконтактная информационная машина без магнитопровода с печатными первичной и вторичной обмотками, возбуждаемую однофазным напряжением. Выходное напряжение индуктосина является функцией углового положения ротора. Конструктивно индуктосин представляет собой два диска (ротор и статор) из изоляционного материала (керамика, стекло) (рис.2.7.2.). Один из дисков соединяется с валом, угловое положение которого подлежит изменению, второй неподвижен. На торцевых поверхностях, обращенных друг к другу, диски несут печатные обмотки.

Применение индуктосина решает вопрос о точности позиционирования функционального устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, то есть устройства с нежёсткой кинематической связью.

2.8. Исследование возможности проведения масштабирования при переходе от размера 125×125 мм к размеру 1000×1000 мм в вакуумном оборудовании нанесения тонких плёнок с магнитными системами

Особенностью современного уровня развития работ по получению тонкоплёночных структур является создание вакуумного технологического оборудования, в котором габаритные размеры обрабатываемых поверхностей достигают 300 мм и более. При этом изменяются внутрикамерные устройства, как в количественном, так и в качественном отношении, в том

числе и в вакуумных технологических установках нанесения тонких плёнок с магнитными системами.

Анализ вакуумного оборудования нанесения тонких плёнок [79] показал, что такой параметр как плотность мощности N_S лежит на уровне $20 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$. Это предельное значение плотности мощности, выше которого возникает проблема дополнительного охлаждения всего объектодержателя, а ниже этого уровня процесс нанесения плёнок идёт достаточно медленно.

Длительность процесса (в с) нанесения тонких плёнок определяется зависимостью

$$t = \frac{h}{v_p} \left(\frac{b_{II}}{b_M} + 1 \right),$$

где h – толщина нанесённого слоя;

v_p – скорость роста плёнки;

b_{II}, b_M – ширина подложки и магнитной системы соответственно.

Скорость нанесения тонких плёнок (скорость роста плёнки) в установках с магнитными системами составляет $v_p = 15 \div 40$ нм/с и может достигать 100 нм/с.

Площадь магнитной системы определяется

$$S_M = l_M \cdot b_M,$$

где l_M – длина магнита (системы);

b_M – ширина магнита (системы).

Как показал проведённый анализ вакуумных технологических установок нанесения тонких плёнок с магнитными системами [80], длительность процесса не превышает $t = 60$ с.

Максимальная величина энергии процесса составляет

$$Q_{\max} = N \cdot t = 6000 \cdot 60 = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Дж},$$

где $N = 6000$ Вт – максимальное значение мощности установок с магнитными системами.

Определим максимальную площадь одновременно обрабатываемой поверхности, исходя из того, что $Q_{max} = 3,6 \cdot 10^5$ Дж, площадь поверхности S_{II} и площадь магнитной системы S_M равны, т.е. $S_{II} = S_M$.

Магнитная система находится под обрабатываемой поверхностью и является неподвижной:

$$Q_{max} = N_S \cdot S_M \frac{h}{v_p};$$

$$N = N_S \cdot S_M,$$

где $\frac{h}{v_p} = t$ – время нанесения тонких плёнок для неподвижных магнитных систем.

Откуда,

$$S_{II} \leq \frac{Q_{max} \cdot v_p}{N_S \cdot h}.$$

Принимая во внимание, что $Q_{max} = 3,6 \cdot 10^5$ Дж; $v_p = 100$ нм/с; $N_S = 20$ Вт/см²; $h = 6000$ нм (6 мкм) получим

$$S_{II} = \frac{Q_{max} \cdot v_p}{N_S \cdot h} = \frac{3,6 \cdot 10^5 \cdot 100}{20 \cdot 6000} = 3 \cdot 10^2 \text{ см}^2.$$

Таким образом, максимальная площадь одновременно обрабатываемой поверхности составляет

$$S_{II} = 300 (17,1 \times 17,1) \text{ см}^2.$$

Если площадь поверхности S_{II} больше, чем 300 см^2 , следует проектировать подвижную магнитную систему.

Скорость перемещения (в см/с) подвижной магнитной системы будет составлять

$$v_M = \frac{b_M \cdot v_p}{h}.$$

Тогда время перемещения (в с) подвижной магнитной системы будет определяться

$$t_M = \frac{b_{II} + b_M}{v_M} = \frac{b_{II} + b_M}{b_M} \cdot \frac{h}{v_p}.$$

Результаты теоретических исследований применения магнитной системы в оборудовании нанесения тонких плёнок представлены на рис.2.8.1 ÷ 2.8.3.

На рис.2.8.1 представлена зависимость предельной ширины магнита b_M от площади обрабатываемой поверхности S_{II} . На рис.2.8.2 – зависимость длительности процесса нанесения плёнки t_M от площади поверхности S_{II} . На рис.2.8.3 – зависимость скорости перемещения магнита v_M от площади обрабатываемой поверхности S_{II} .

Таким образом, размер обрабатываемой поверхности $17,1 \times 17,1$ см является максимальным, при котором возможно применение стационарной неподвижной магнитной системы. В вакуумном оборудовании нанесения тонких плёнок, при $S_{II} > 300$ ($17,1 \times 17,1$) см^2 следует переходить на подвижную магнитную систему.

Для реализации больших перемещений магнита в технологической системе вакуумного оборудования целесообразно использовать разрабатываемые и исследуемые, в настоящей монографии, устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную среду.

Что касается влияния магнитного поля УБМВ на магнитную систему, расположенную в вакуумной технологической среде, то расчёт проведенный в работе [81] показал, что напряженность магнитного поля убывает обратно пропорционально квадрату расстояния и для высококоэрцитивных магнитов оптимальной длины, напряженность магнитного поля на рассто-

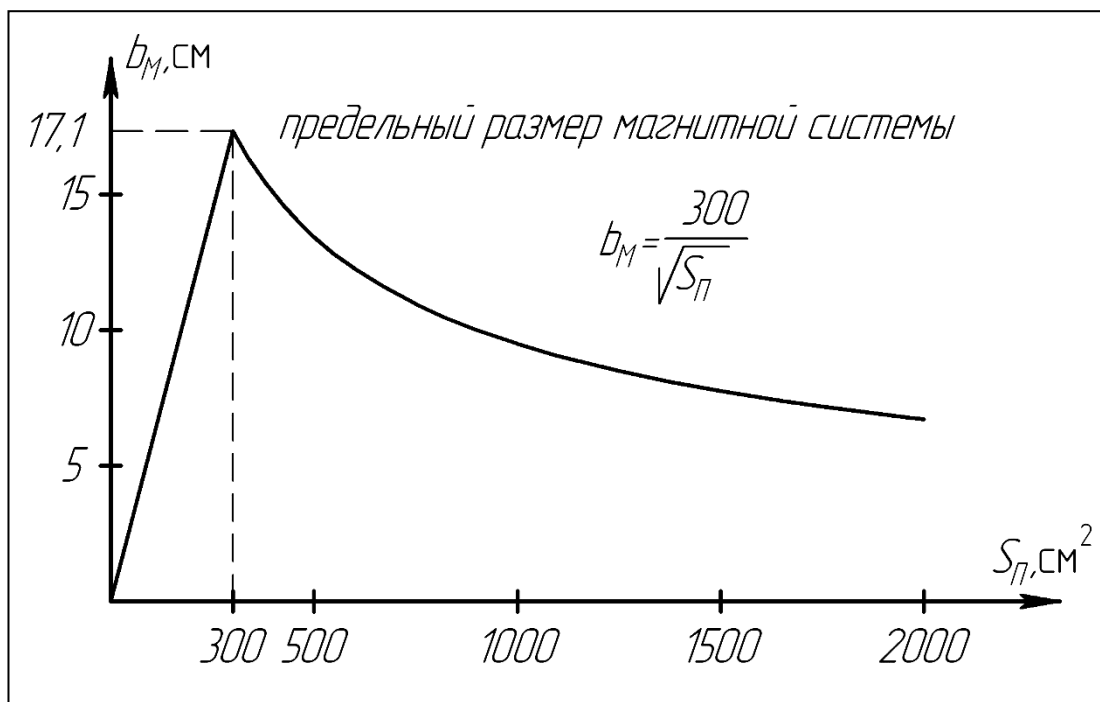


Рис.2.8.1. Зависимость предельной ширины магнитной системы b_M от площади обрабатываемой поверхности S_{Π}

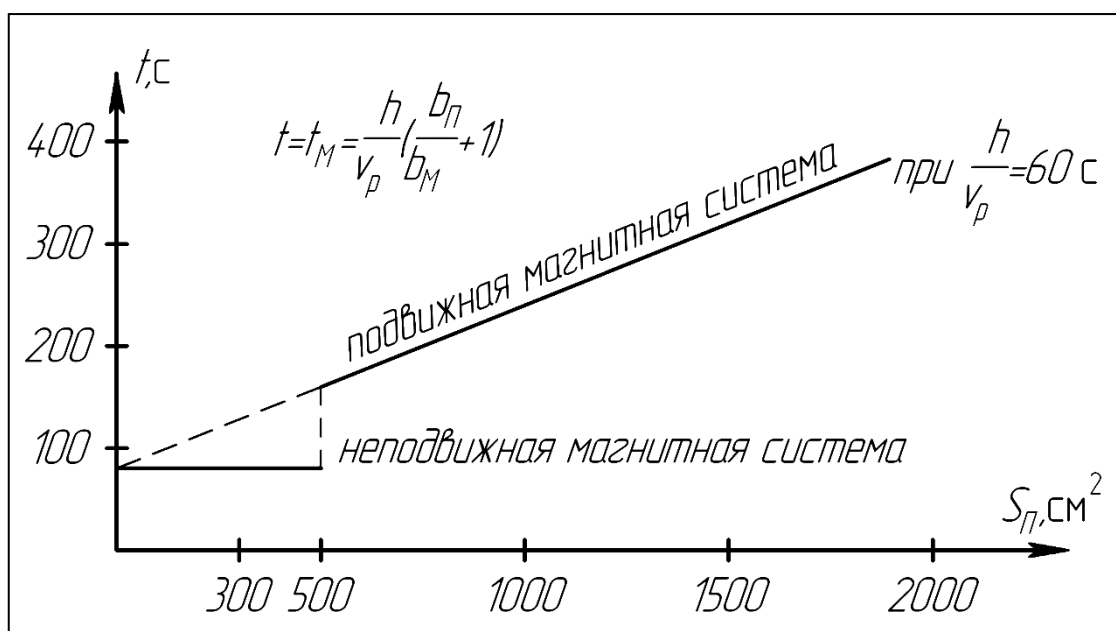


Рис.2.8.2. Зависимость длительности процесса нанесения тонкой плёнки t_M от площади обрабатываемой поверхности S_{Π}

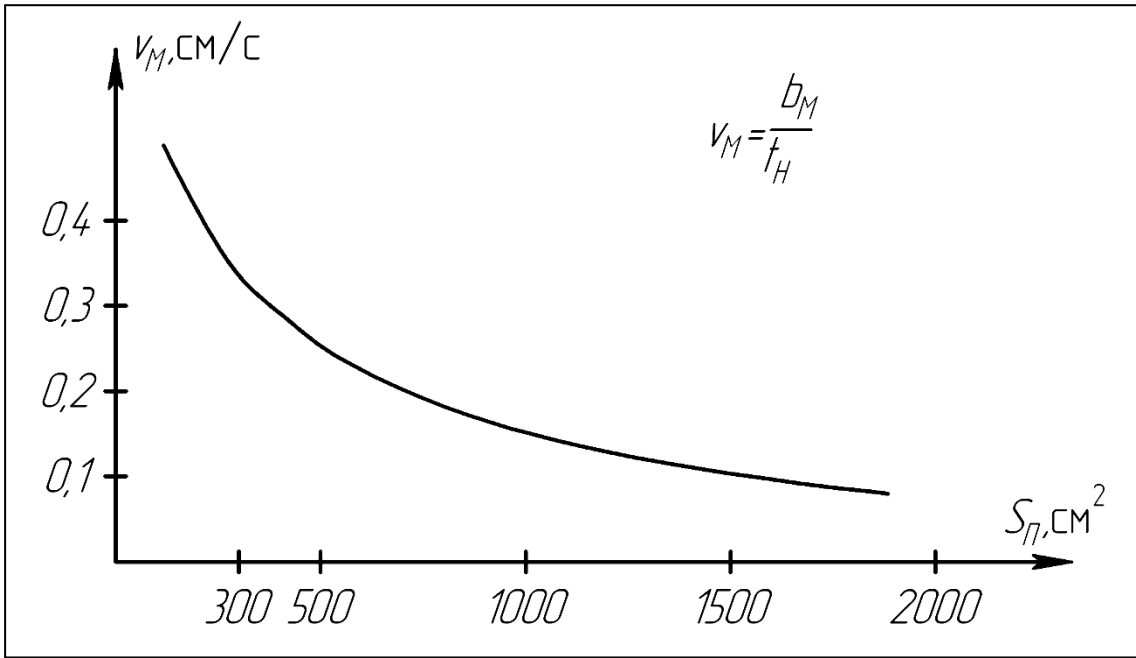


Рис.2.8.3. Зависимость скорости перемещения магнита v_M от площади обрабатываемой поверхности S_{Π}

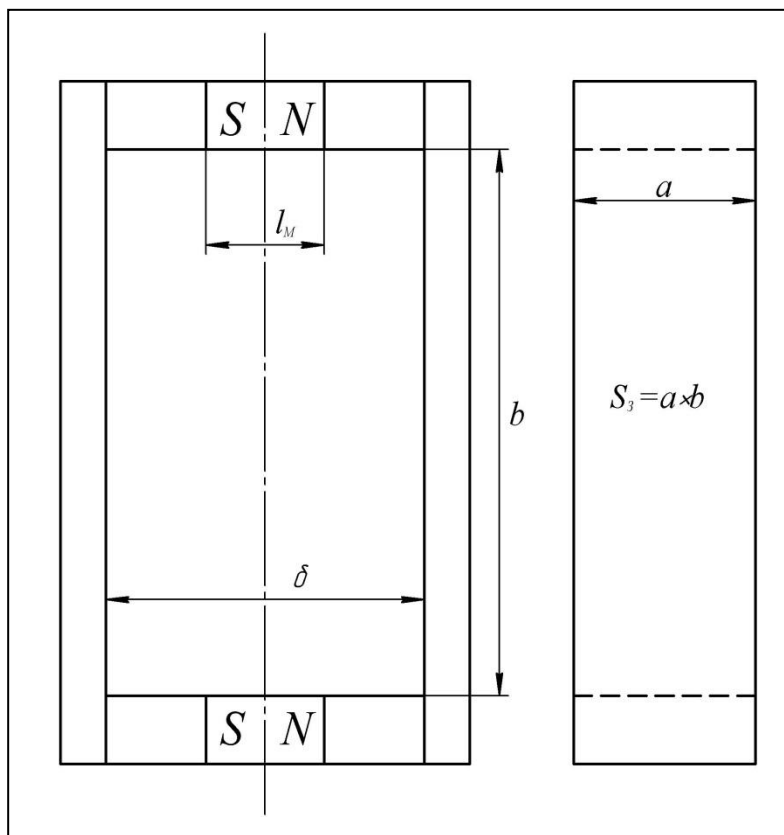


Рис.2.8.4. Расчетная схема магнитной системы

янии 80 мм равна напряженности магнитного поля Земли, то есть не влияет на обрабатываемые объекты. Этот факт достаточно легко учесть при проектировании магнитных систем вакуумного технологического оборудования.

Для сравнения габаритных размеров УБМВ и магнитных систем, представлен расчёт магнитных систем вакуумного технологического оборудования нанесения тонких плёнок.

Исходными данными для расчёта магнитных систем вакуумного технологического оборудования нанесения тонких плёнок являются [82]: рабочая индукция в зазоре B_3 , Тл; величина рабочего зазора δ , м (рис.2.8.4); площадь рабочего разора S_3 , м²; материал магнита; параметры H_α и B_α .

Расчёт магнитных систем ведётся последовательно.

Напряженность в рабочем зазоре (в А/м) определяется

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Длина магнита рассчитывается

$$l_M \geq \frac{1,5 \cdot H_3 \cdot \delta}{H_\alpha}.$$

Предварительная площадь нейтрального сечения магнита определяется

$$S_H \geq \frac{20B_3 \cdot S_3}{B_\alpha}.$$

Геометрическая проводимость зазора определяется

$$G = \frac{S_3}{\delta}.$$

Приведенная геометрическая проводимость зазора рассчитывается

$$\Lambda = \frac{l_M \cdot G}{S_M}.$$

Рабочая точка магнитной системы определяется

$$\alpha = \arctg \Lambda ,$$

с соответствующим определением координат рабочей точки H_p и B_p по справочным материалам [83]. При этом, рабочая точка системы находится графически как точка пересечения луча, проведенного из начала координат под углом α (отсчет ведется от оси H).

Расхождения H_α и H_p , B_α и B_p определяются

$$\Delta_H = \frac{H_\alpha - H_p}{H_\alpha} \cdot 100\% ; \quad \Delta_B = \frac{B_\alpha - B_p}{B_\alpha} \cdot 100\% .$$

Если расхождения Δ_H и Δ_B составляют более 10%, то производится корректировка расчета: изменяется l_M или S_M , или l_M и S_M одновременно и производится повторный расчет.

Индукция поля в рабочем зазоре рассчитывается

$$B'_3 = \frac{B_p \cdot S_M}{20S_3} .$$

Далее производится сравнение заданной B_3 и расчётной B'_3 индукции поля в рабочем зазоре.

В случае необходимости производится корректировка расчёта.

Габариты нейтрального сечения магнита: $c \times c = S_M$.

В случае необходимости количество магнитов может быть увеличено.

Габариты нейтрального сечения: $c' \times c' = S_M/n$, где n - число магнитов.

По разработанной методике, составлены алгоритмы и программы расчёта. Программы защищены Свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ [84, 85].

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИВНОСИМЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ И ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ

3.1. Экспериментальное оборудование

Одним из основных требований, предъявляемых к вакуумному оборудованию, необходимому для проведения экспериментальных исследований, является выбор откачных средств. Средства откачки должны обеспечивать широкий диапазон разрежений и определённый состав остаточной газовой среды.

На рис.3.1.1 и 3.1.2 представлены внешний вид и принципиальная схема высоковакуумной установки для исследования устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Основные технические характеристики экспериментальной высоковакуумной установки:

1. Предельное остаточное давление 1×10^{-5} Па.
2. Рабочий диапазон давлений $1 \times 10^5 \div 5 \times 10^{-5}$ Па.
3. Максимальная температура прогрева 300°C .
4. Напряжение в сети переменного тока 220 В.
5. Частота переменного напряжения 50 Гц.
6. Общая потребляемая мощность 8,7 кВт.

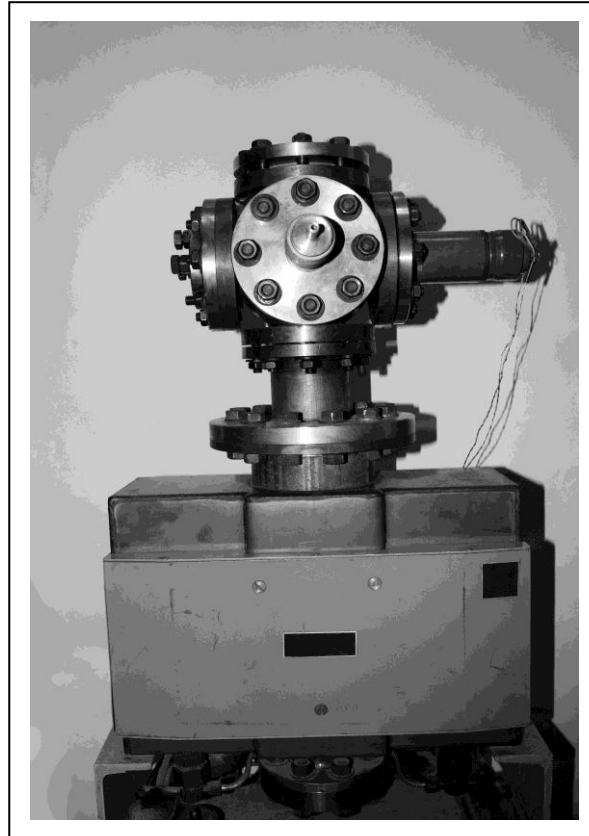


Рис.3.1.1. Внешний вид вакуумной установки для исследования УБМВ

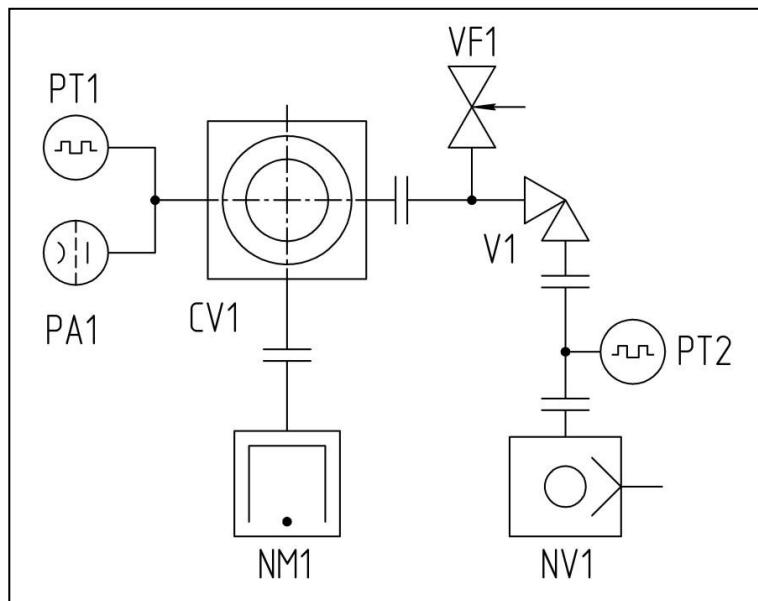


Рис.3.1.2. Принципиальная схема вакуумной установки для исследования УБМВ

7. Габаритные размеры:

длина 435 мм.
ширина 340 мм.
высота 1110 мм.

8. Масса 97 кг.

Основным критерием, которым руководствовались при разработке экспериментальной установки, является требование безмаслянного спектра остаточных газов в вакуумном объеме, характерного для вакуумного оборудования высоких технологий.

Экспериментальная установка выполнена на основе магниторазрядного насоса НОРД-100 и механического насоса ЗНВР-1Д.

Прогрев установки производится с помощью наружного нагревателя из нихромовой спирали, изолированной стеклотканью; температура на поверхности экранирующей герметичной оболочки УБМВ измеряется с помощью термопары; вращение осуществляется от электродвигателя; нагружающим устройством является механическая передача, расположенная внутри вакуумной камеры. В конструкции вакуумной камеры имеется смотровое окно, расположенное сверху. Напуск газа осуществляется натекателем игольчатого типа. Конструкция установки описана в работе [86].

Установка предназначена для исследования количества и размеров микрочастиц, генерируемых из опорного узла УБМВ, а также влияния температуры прогрева на характеристики магнитных материалов и исследования наработки на отказ устройства при повышенных температурах.

Испытуемое герметичное УБМВ представлено на рис. 3.1.3.

Также для экспериментальных исследований количества и размеров микрочастиц применялись микроскопы МБС-9, МИМ-7 и растровый электронный микроскоп EVO 40 фирмы Zeiss.



а)



б)

Рис.3.1.3. Герметичное УБМВ: а – внешний вид;
б – якорь устройства

При исследовании работоспособности УБМВ в условиях повышенных температур в вакууме, при включенном электродвигателе, производился нагрев экранирующей оболочки устройства последовательно до температур 50...300°C с интервалом 50°C. После достижения необходимого значения температуры включался электродвигатель и визуально наблюдалось вращение устройства нагружения, которое работало при температуре 25÷30°C, в следствии локализации области нагрева УБМВ.

3.2. Моделирование количества и размеров микрочастиц, образующихся во внутрикамерном устройстве с бесконтактным магнитным взаимодействием

В настоящем разделе представлены результаты компьютерного моделирования среднего количества и размеров микрочастиц, образующихся во внутрикамерных устройствах с бесконтактным магнитным взаимодействием. Моделирование выполнено по расчётным зависимостям, полученным авторами [87,88].

На рис. 3.2.1 ÷ 3.2.4 показаны результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие изменение среднего количества N образующихся во внутрикамерном устройстве с бесконтактным магнитным взаимодействием микрочастиц в зависимости от скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и их микротвёрдости HV для различных шероховатостей поверхностей R . При проведении исследований принято, что в расчёт принимается микротвёрдость HV менее твёрдого материала рассматриваемой пары.

Проведённые исследования показывают, что наименьшее количество N микрочастиц образуется при наибольших значениях параметров R

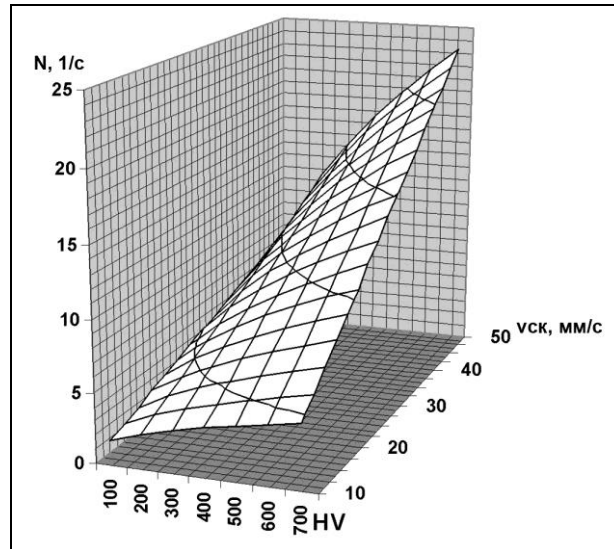


Рис.3.2.1. Зависимость среднего количества N образующихся микрочастиц от скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 10$ мкм

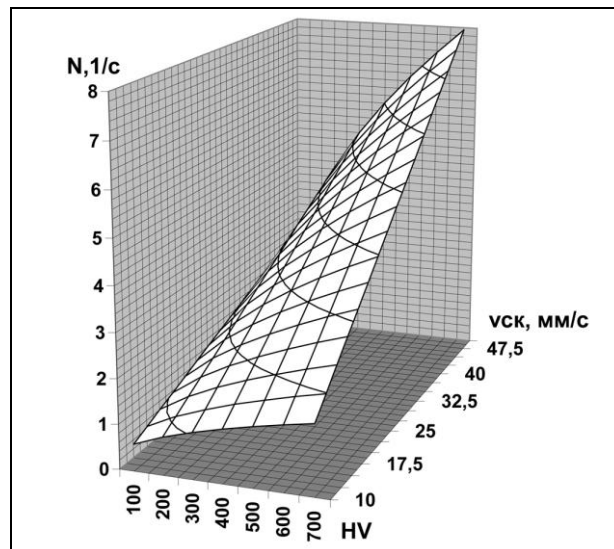


Рис.3.2.2. Зависимость среднего количества N образующихся микрочастиц от скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 20$ мкм

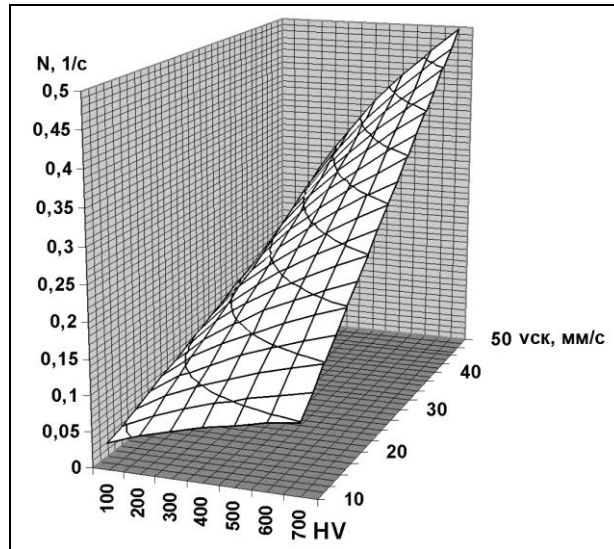


Рис.3.2.3. Зависимость среднего количества N образующихся микрочастиц от скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 200$ мкм

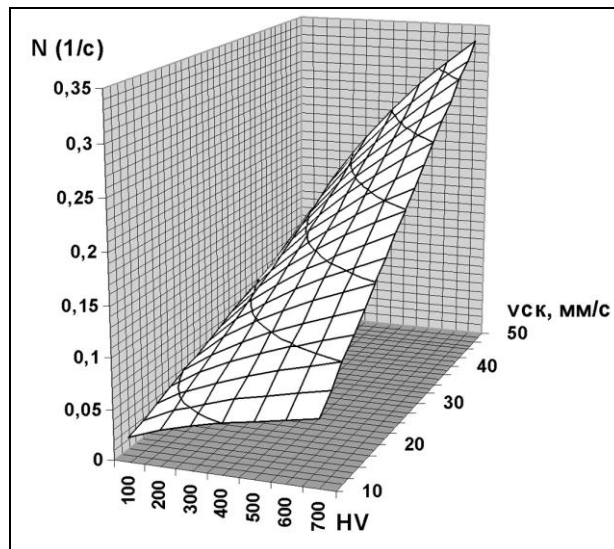


Рис.3.2.4. Зависимость среднего количества N образующихся микрочастиц от скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 400$ мкм

шероховатости поверхности, соответствующих такому виду обработки, как полирование.

Следует отметить, что среднее количество N образующихся микро-частиц прямо пропорционально скорости скольжения $v_{ск}$ контактирующих поверхностей и экспоненциально зависит от микротвердости HV .

Результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие изменение среднего размера d образующихся микрочастиц в зависимости от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвердости HV для различных шероховатостей поверхностей R , представлены на рис. 3.2.5 ÷ 3.2.10. Также как и при исследовании среднего количества N образующихся микрочастиц, при исследовании среднего размера d в расчёт принимается микротвёрдость менее твёрдого материала рассматриваемой пары.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что наименьшие размеры d имеют микрочастицы, получаемые при минимальных значениях параметров R шероховатости поверхности.

Также следует отметить, что величина среднего размера d образующихся микрочастиц экспоненциально зависит от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей, и экспоненциально зависит от микротвёрдости HV материалов.

Программа, по которой выполнено компьютерное моделирование, защищена Свидетельством Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ [44].

В реальных условиях эксплуатации УБМВ, количество генерируемых микрочастиц уменьшается, так как образующиеся микрочастицы не сразу выходят из зоны контакта, а происходит их адгезионно-механическое сцепление и образование кластеров.

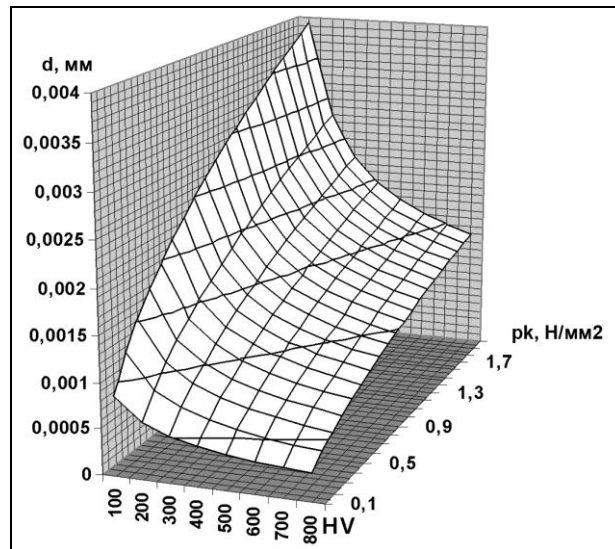


Рис.3.2.5. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 10$ мкм

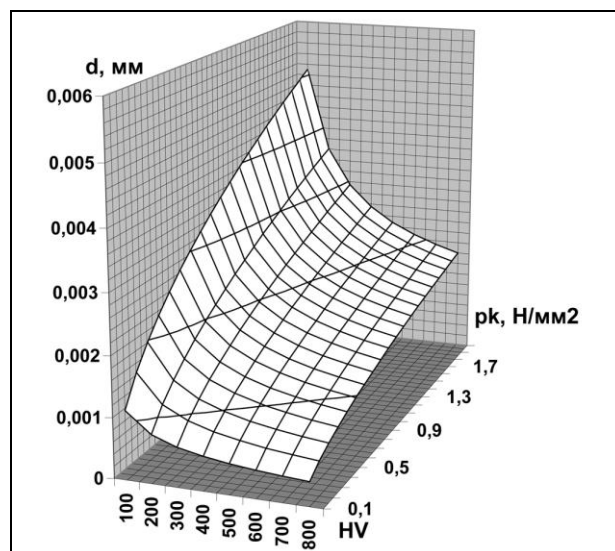


Рис.3.2.6. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 20$ мкм

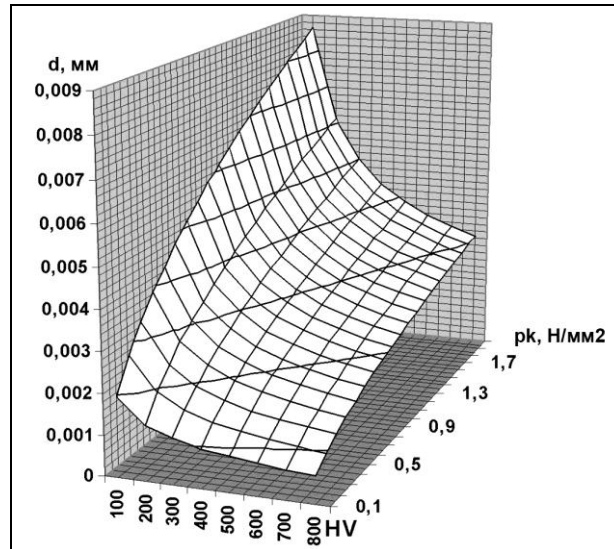


Рис.3.2.7. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 200$ мкм

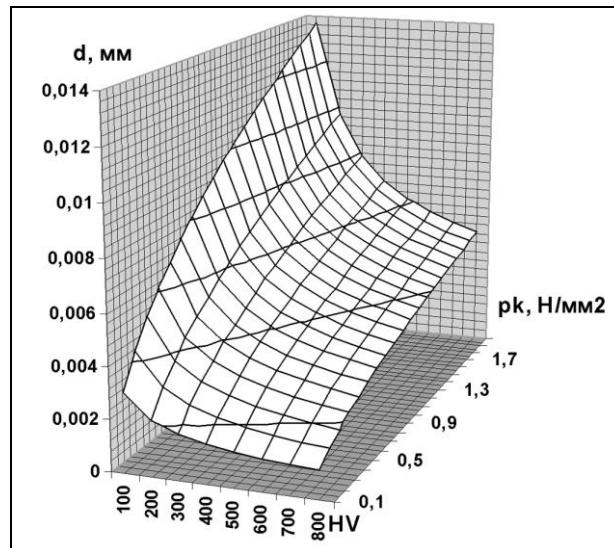


Рис.3.2.8. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 400$ мкм

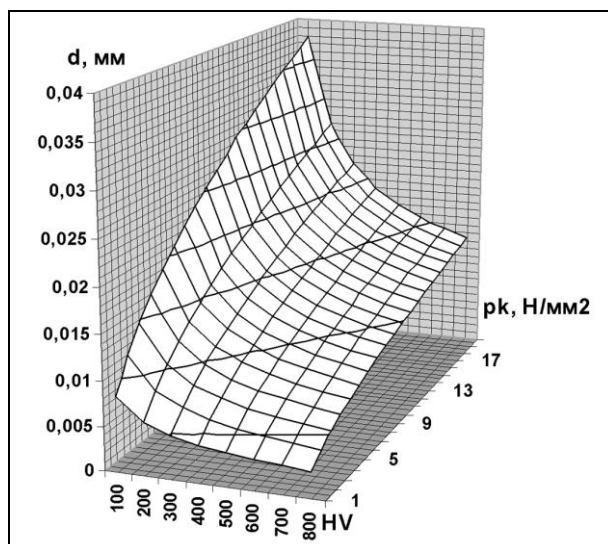


Рис.3.2.9. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 200$ мкм

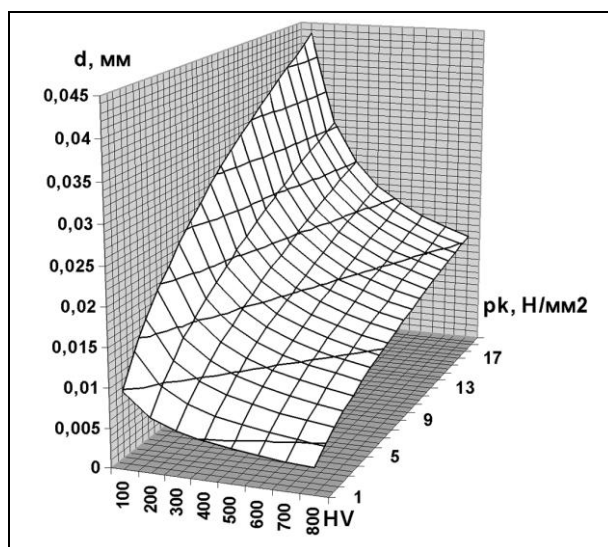


Рис.3.2.10. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k взаимодействующих поверхностей и их микротвёрдости HV для шероховатости поверхности $R = 400$ мкм

Необходимо отметить, что магнитные системы УБМВ являются естественными ловушками для образующихся микрочастиц, осаждают их на себе (см. раздел 2.3).

Принимать окончательные решения по выбору режимов эксплуатации устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, с точки зрения привносимых загрязнений, необходимо по задаваемым разработчиками оборудования высоких технологий допустимых величин количества и критических размеров микрочастиц.

Полученные результаты компьютерного моделирования [89,90] подтверждаются исследованиями микрочастиц, представленными в [91].

3.3. Экспериментальные исследования и моделирование газовой выделенности из внутрикамерного устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием

Использование УБМВ в вакуумном технологическом и аналитическом оборудовании приводит не только к появлению магнитных полей, но и введению в вакуумную среду новых, с точки зрения вакуумного оборудования, конструкционных материалов – высококоэрцитивных магнитов и электротехнических сталей, которые становятся источниками дополнительных газовых потоков.

Таким образом, исследование газовой выделенности из УБМВ при различных давлениях является необходимой задачей.

На рис.3.3.1 ÷ 3.3.4 представлены спектры остаточных газов в объеме вакуумной камеры с УБМВ при различных степенях разрежения и температурах [92]. Спектрограмма А получена при неработающем УБМВ и характеризует только газовую выделенность с внутрикамерных поверхностей вакуумной камеры. Спектрограмма Б соответствует работающему УБМВ.

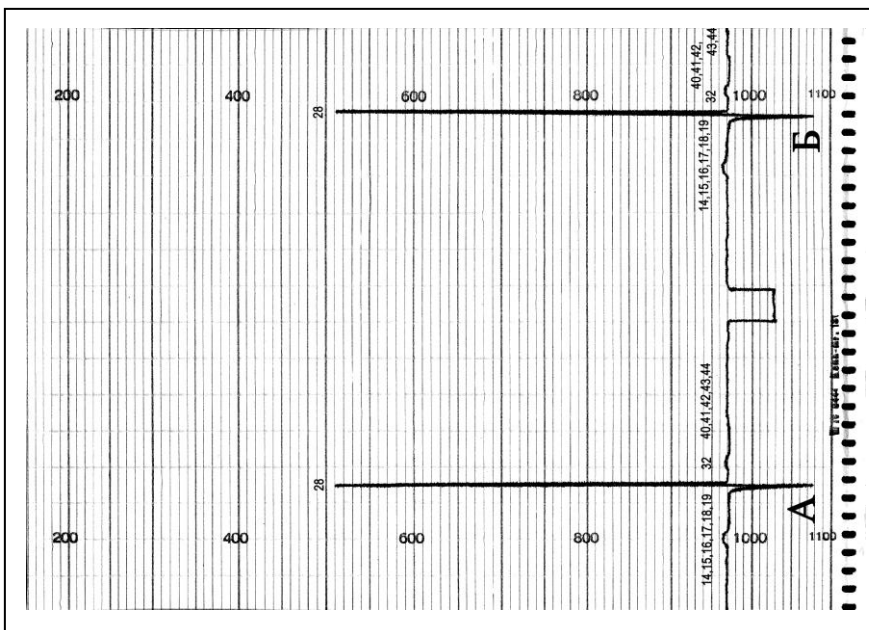


Рис.3.3.1. Спектр остаточных газов в объёме вакуумной ка-

меры:

А – УБМВ выключено;

Б – УБМВ включено;

$p = 6,65 \cdot 10^{-2}$ Па;

$T = 298$ К;

шкала – $3 \cdot 10^{-10}$ А;

фон – $0,55 \cdot 10^{-10}$ А

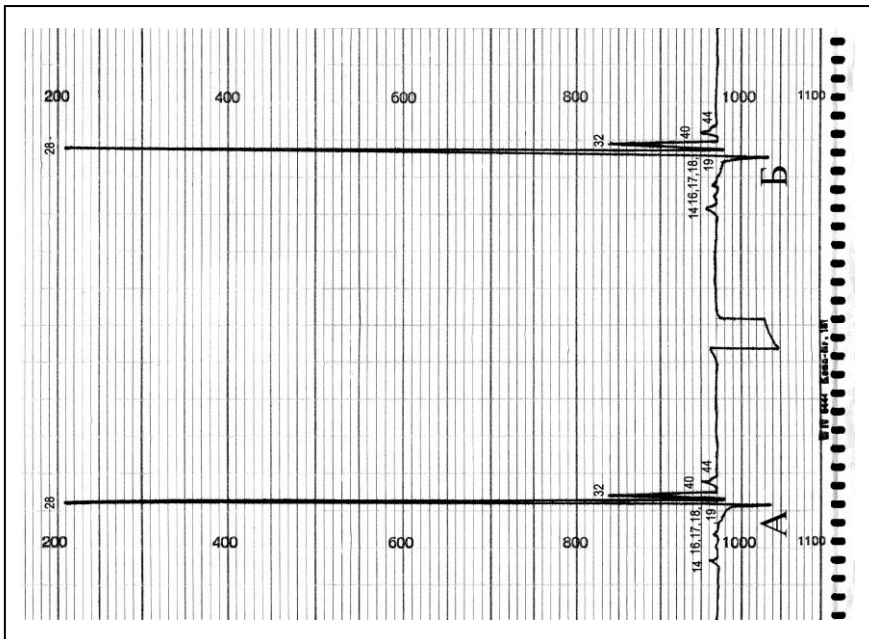


Рис.3.3.2. Спектр остаточных газов в объёме вакуумной ка-

меры:

А – УБМВ выключено;

Б – УБМВ включено;

$p = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па;

$T = 298$ К;

шкала – $1 \cdot 10^{-10}$ А;

фон – $0,06 \cdot 10^{-10}$ А

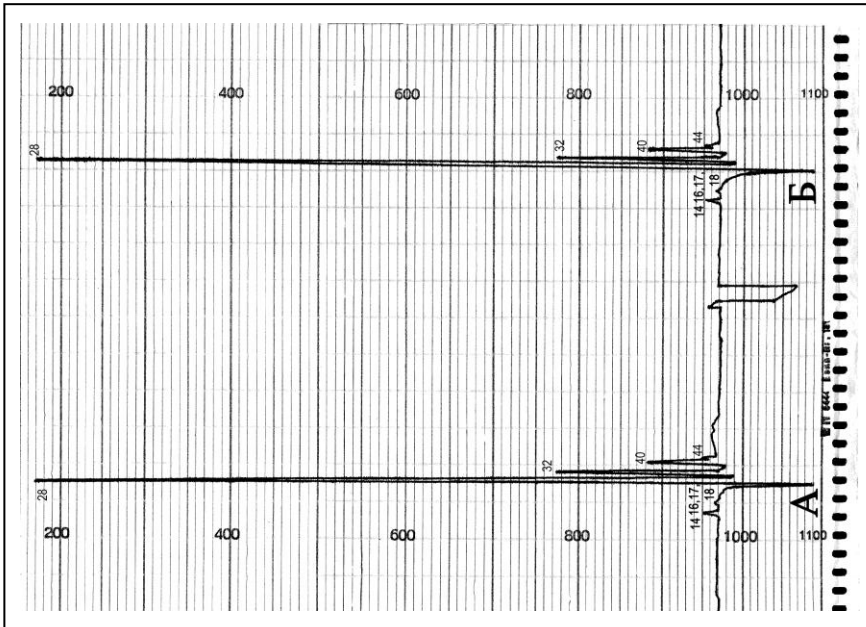


Рис.3.3.3. Спектр остаточных газов в объёме вакуумной камеры:

меры:

А – УБМВ выключено;

Б – УБМВ включено;

$p = 6,65 \cdot 10^{-4}$ Па;

$T = 298$ К;

шкала - $3 \cdot 10^{-12}$ А;

фон – $0,5 \cdot 10^{-12}$ А

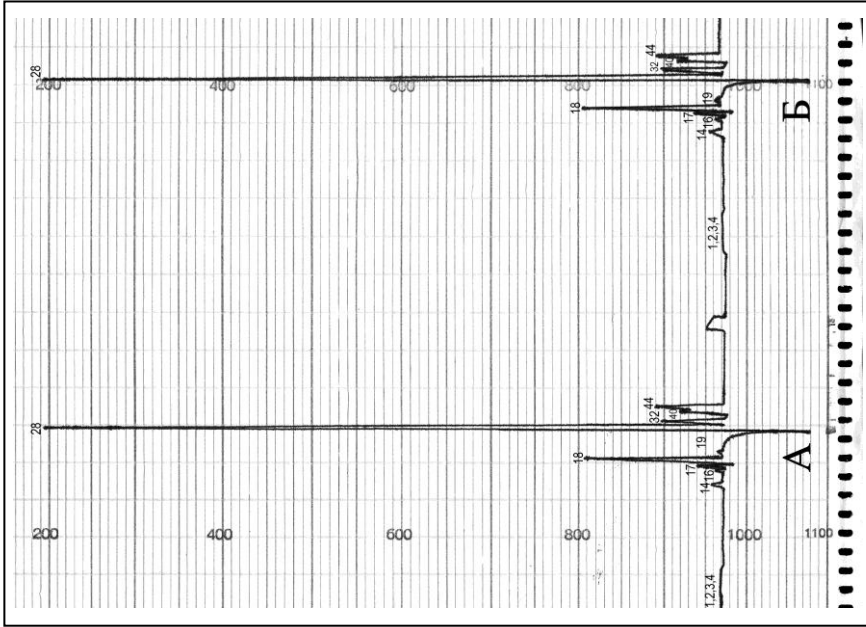


Рис.3.3.4. Спектр остаточных газов в объёме вакуумной камеры:

меры:

А – УБМВ выключено;

Б – УБМВ включено;

$p = 6,65 \cdot 10^{-4}$ Па;

$T = 498$ К;

шкала - $1 \cdot 10^{-12}$ А;

фон – $0,05 \cdot 10^{-12}$ А

Расшифровка спектра газовой выделенной:

1 ÷ 4 – изотопы водорода; 14 – радикал CH_2 ; 16 – атомарный кислород; 17 – радикал OH ; 18 – вода; 19 – радикал CH ; 28 – молекулярный азот и OH ; 32 – O_2 ; 40 – аргон; 44 – CO_2 .

Наличие метановых производных, полученных при расшифровке спектрограмм, характерно для работы магнитного электроразрядного насоса, при функционировании которого производится диссоциация сложных молекул на более простые, например CH_2^+ (массовое число 14).

Минеральные масла вакуумного механического насоса создают гамму пиков углеводородных соединений, начиная с метановых производных до молекулярной массы самих рабочих жидкостей. Наибольшие по амплитуде – соответствуют этан-пентановым производным 23 ÷ 26, 30, 37, 38 массы.

Появление аргона (массовое число 40) объясняется сложностью его откачки высоковакуумным магнитным электроразрядным насосом. Инертные газы, такие как аргон, криптон и ксенон, откачиваются благодаря адсорбции ионов титановым электродом магнитного электроразрядного насоса. Ввиду больших молекулярных размеров диффузии этих газов в материал катода затруднена, и первоначальная высокая быстрота действия магнитного электроразрядного насоса по этим газам затем резко уменьшается.

Присутствие кислорода (массовое число 32) в спектре остаточных газов свидетельствует о неполной герметичности высоковакуумной системы исследовательской установки. Это приводит к появлению резонансных пиков воды (массовые числа 17 и 18), параллельному росту пика азота и CO (массовое число 28) и появлению пика аргона и пика CO_2 (массовое число 44).

Пики массовых чисел 31 и 43 на спектрограммах свидетельствует о наличии этилового спирта и ацетона (жидкости для протирки внутрикамерных объемов вакуумного оборудования).

Сравнение спектрограмм А и Б показывает, что работающее при различных степенях разрежения и температурах УБМВ не влияет ни на качественный ни на количественный состав остаточной вакуумной среды и характеризует корректность проведения экспериментов.

По результатам компьютерного моделирования [93] построены графики зависимостей газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h в паре 95X18Ш – 11X18М при различных скоростях скольжения в фрикционном контакте $v_{ск}$, температуре T и давлениях p ($p_1 = 10^{-8}$ Па; $p_2 = 10^{-7}$ Па; $p_3 = 10^{-6}$ Па; $p_4 = 10^{-5}$ Па; $p_5 = 10^{-4}$ Па; $p_6 = 10^{-3}$ Па; $p_7 = 10^{-2}$ Па) в вакуумной камере.

На рис.3.3.5 ÷ 3.3.8 представлены зависимости газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 0,1$ м/с, температурах T (300К; 400К; 500К; 600К) и давлениях p ($p_1 ÷ p_7$) в вакуумной камере.

На рис.3.3.9 ÷ 3.3.12 также представлены зависимости газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания, I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 1,0$ м/с, температурах T (200К; 400К; 500К; 600К) и давлениях p ($p_1 ÷ p_7$) в вакуумной камере.

Аналогичные зависимости газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 10$ м/с, температурах T (200К; 400К; 500К; 600К) и давлениях p ($p_1 ÷ p_7$) в вакуумной камере представлены на рис.3.5.13. ÷ 3.5.16.

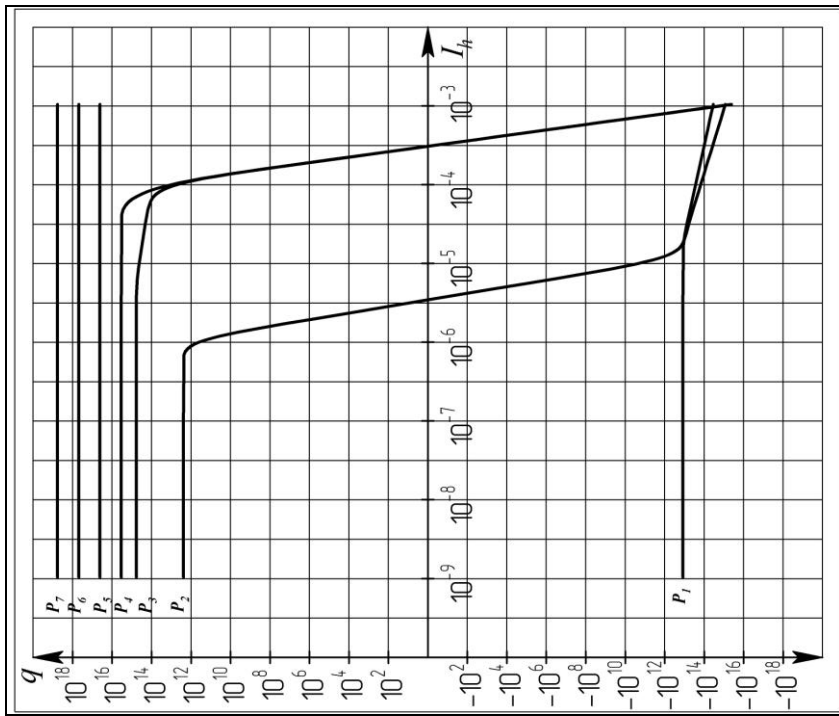


Рис.3.3.5. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 0,1$ м/с, температуре $T = 300\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

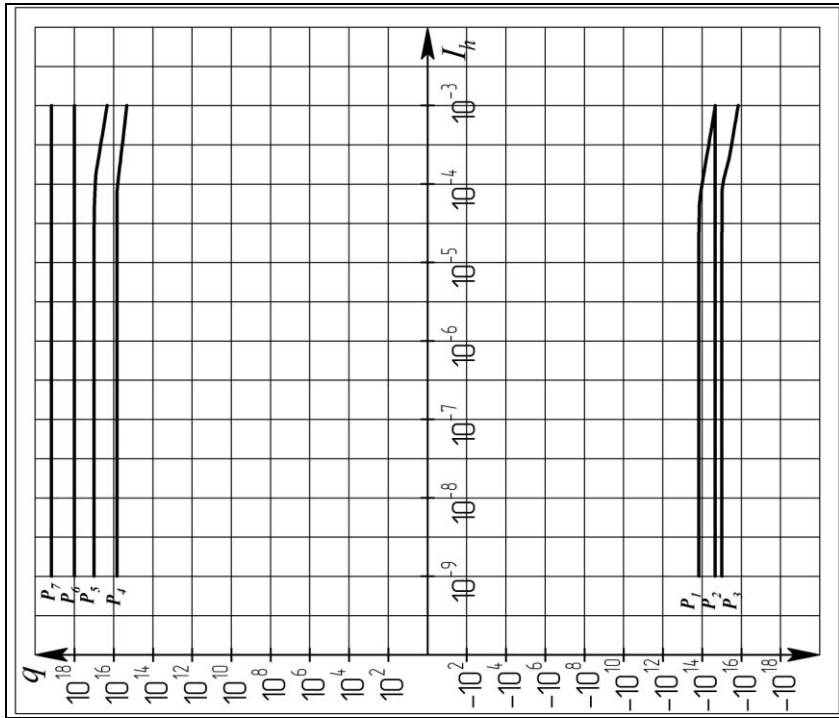


Рис.3.3.6. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 0,1$ м/с, температуре $T = 400\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

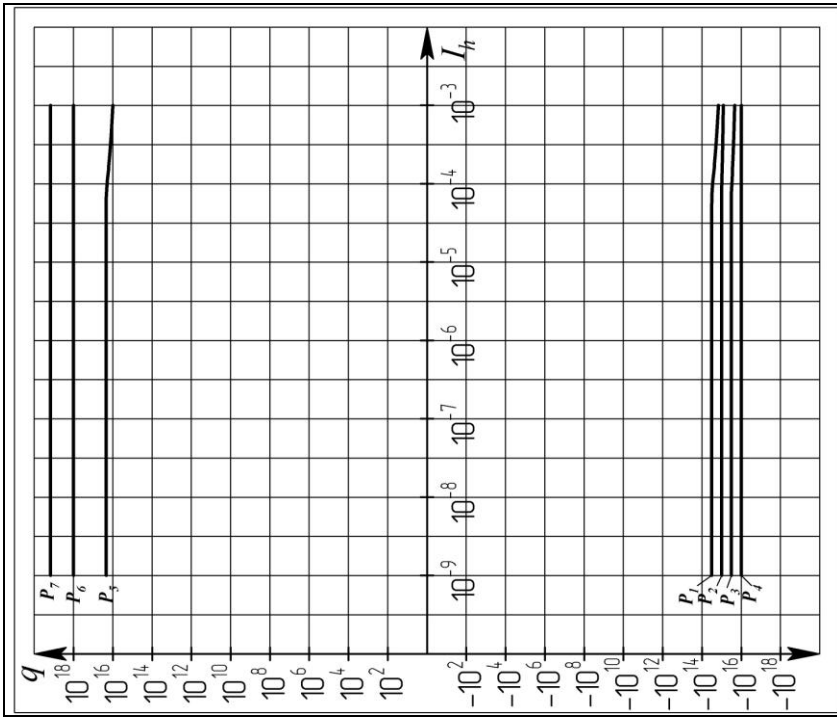


Рис.3.3.7. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{\text{ск}} = 0,1$ м/с, температуре $T = 500\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

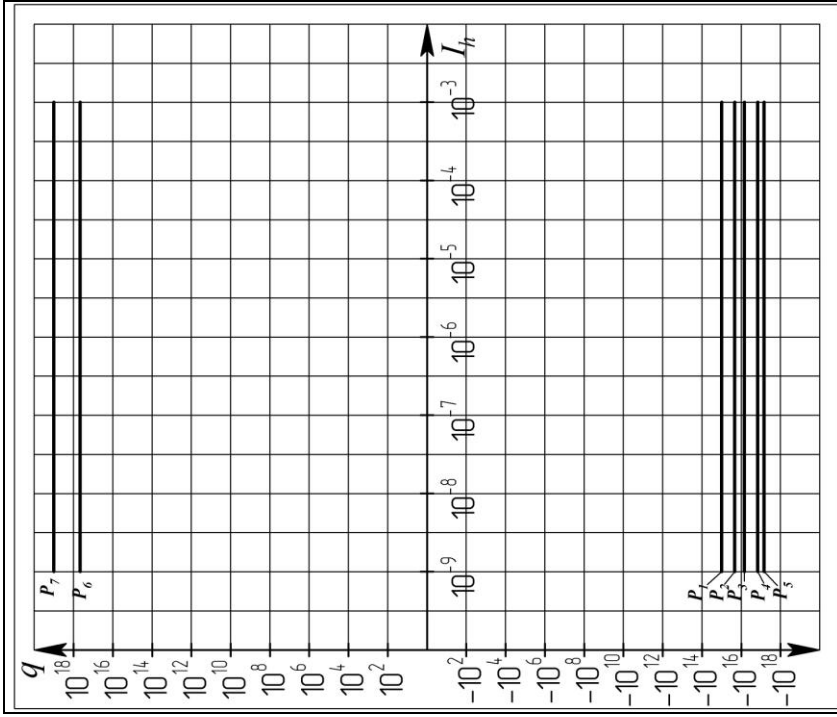


Рис.3.3.8. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{\text{ск}} = 0,1$ м/с, температуре $T = 600\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

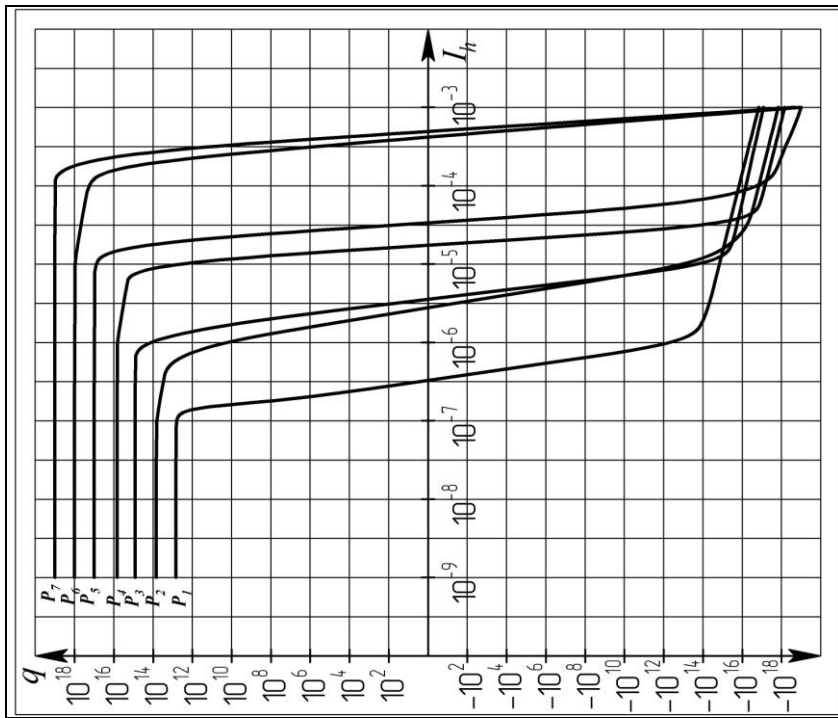


Рис.3.3.9. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 1,0$ м/с, температуре $T = 200\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

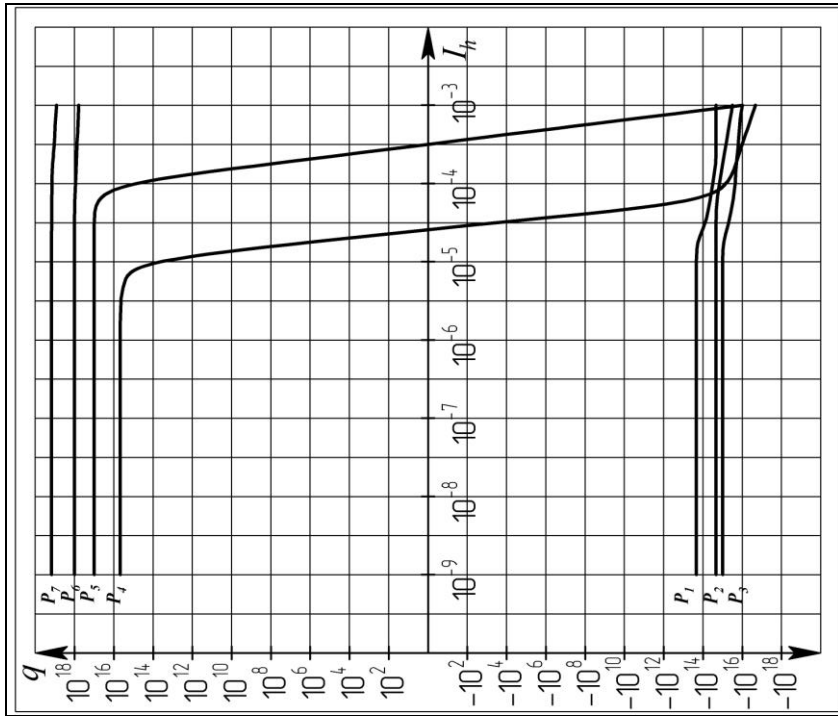


Рис.3.3.10. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 1,0$ м/с, температуре $T = 400\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

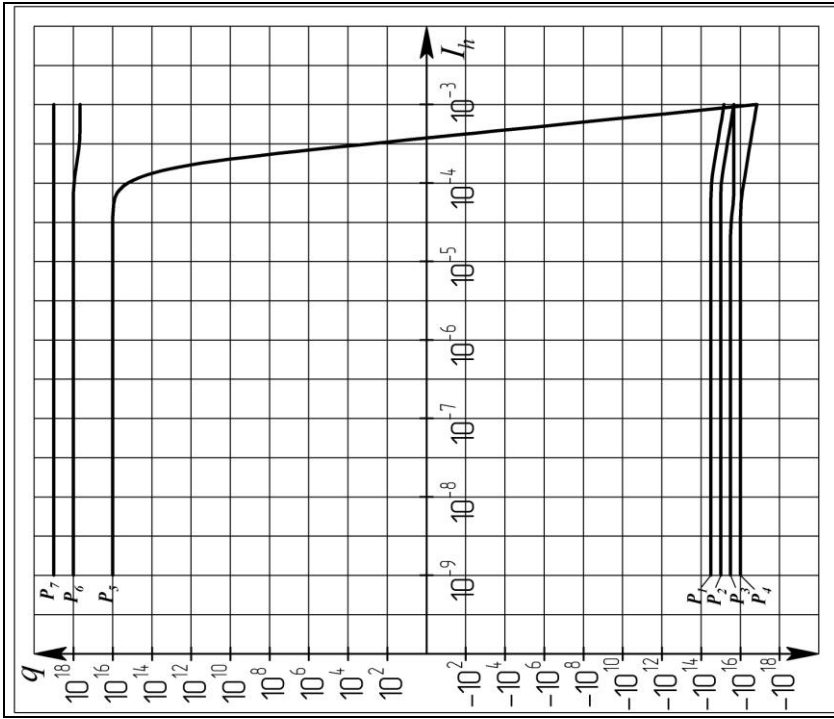


Рис.3.3.11. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 1,0$ м/с, температуре $T = 500\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

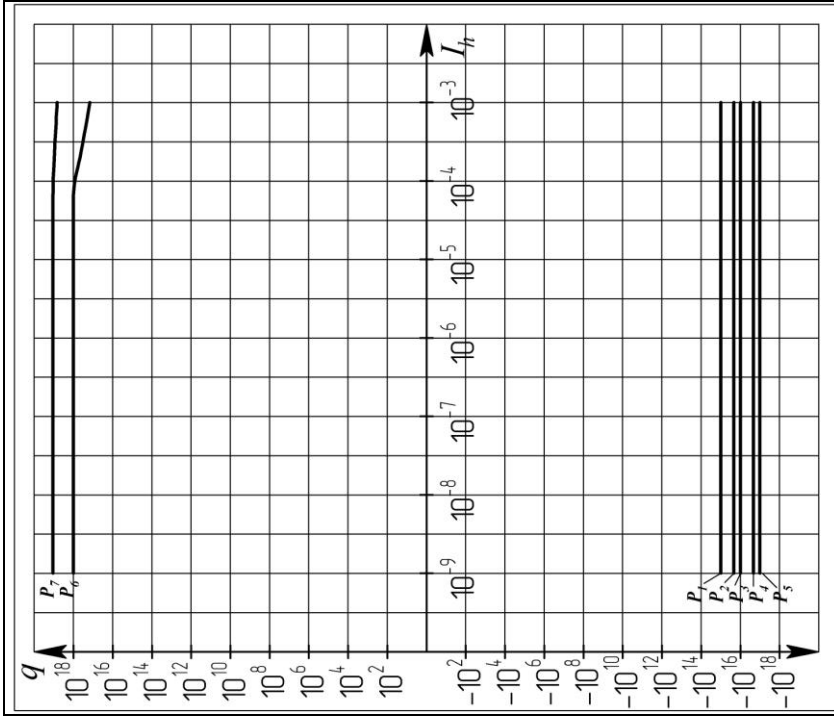


Рис.3.3.12. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 1,0$ м/с, температуре $T = 600\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

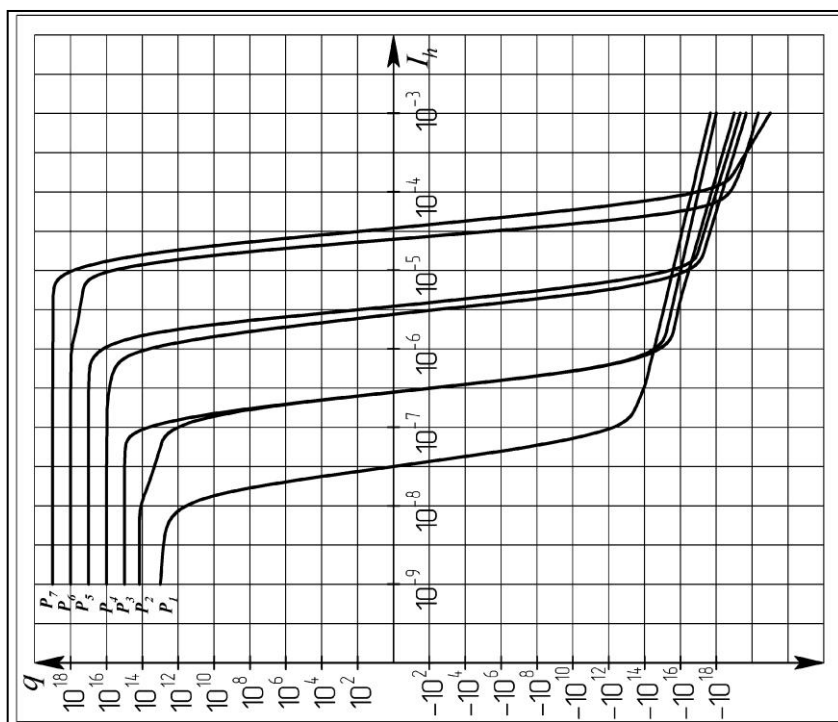


Рис.3.3.13. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 10$ м/с, температуре $T = 200\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

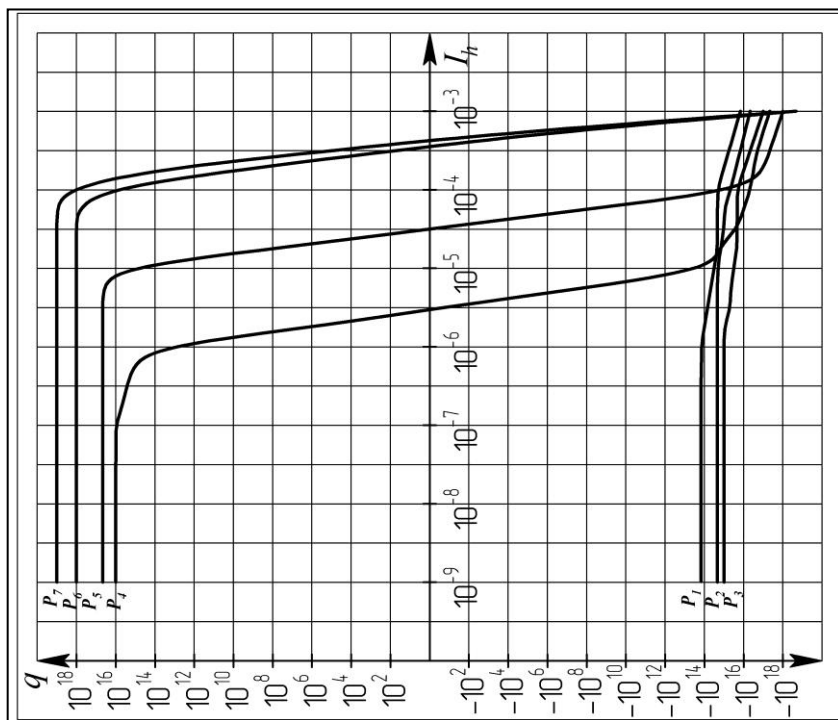


Рис.3.3.14. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности изнашивания I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 10$ м/с, температуре $T = 400\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

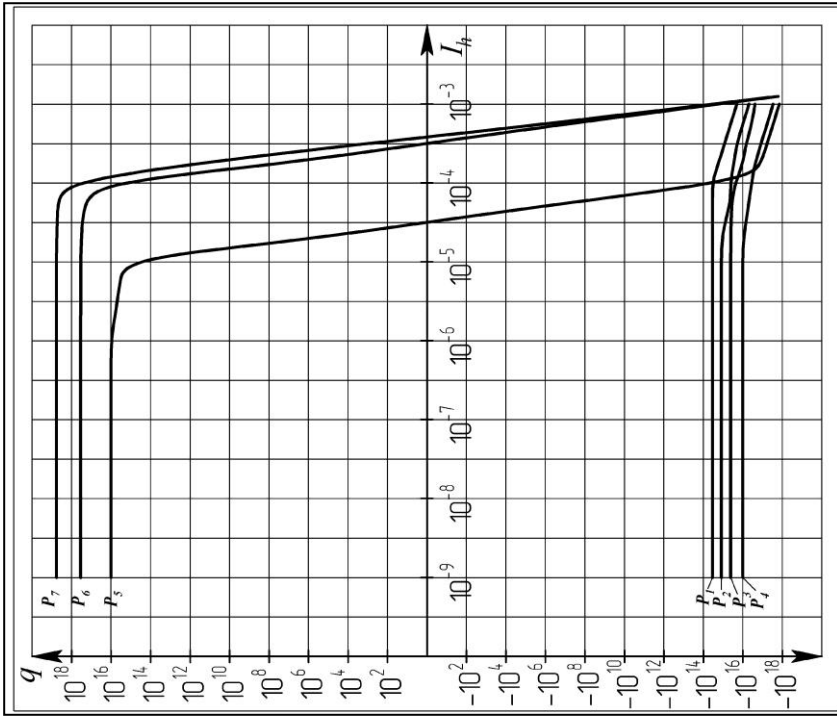


Рис.3.3.15. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности излучения I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{\text{ок}} = 10$ м/с, температуре $T = 500\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

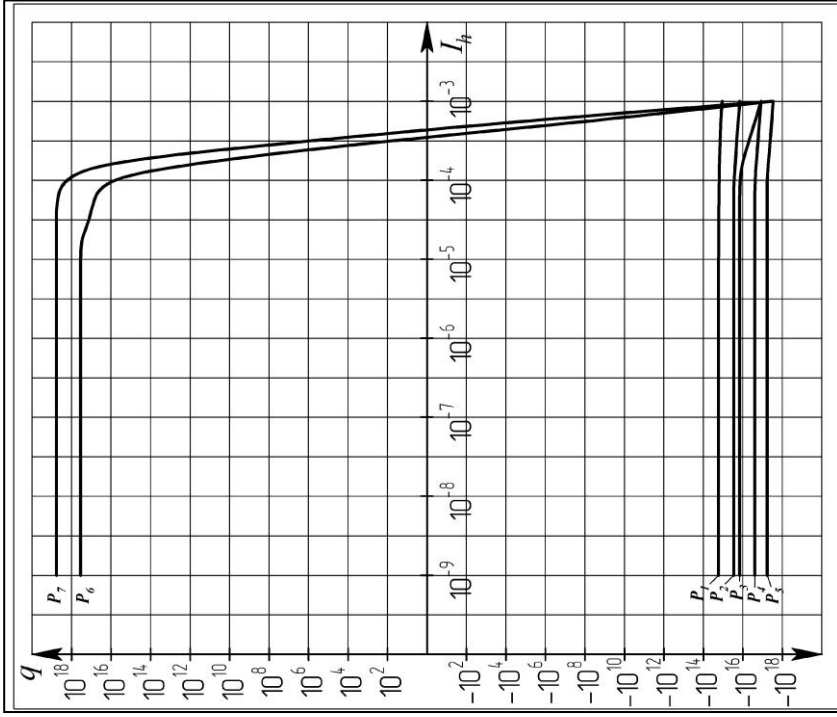


Рис.3.3.16. Зависимость газового потока q , выделяемого из опорного узла УБМВ, от интенсивности излучения I_h при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{\text{ок}} = 10$ м/с, температуре $T = 600\text{К}$ и различных давлениях p в вакуумной камере

Полученные зависимости показывают, что при небольших скоростях скольжения во фрикционном контакте до 10 м/с и давлениях выше 10^{-3} Па интенсивность изнашивания практически не влияет на газовый поток.

При температурах выше 400К интенсивность изнашивания также не оказывает существенного влияния на газовый поток при давлениях ниже 10^{-6} Па.

Влияние интенсивности изнашивания носит пороговый характер, при достижении определённой величины, газовый поток начинает быстро уменьшаться по величине и становится равным нулю (газовое равновесие), а затем быстро растёт, но уже с другим знаком (тело начинает газить) и достигает величины примерно того же порядка. Минимальное пороговое значение интенсивности изнашивания $I_h = 10^{-8}$ было получено при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_{ск} = 10$ м/с, температуре $T = 200$ К и давлении $p = 10^{-8}$ Па в вакуумной камере.

Количественная оценка газовой выделения из опорных узлов УБМВ в вакууме позволяет оценить остаточное давление вблизи зоны трения. Оценка проведена с учетом процесса диффузии газов при необходимом быстродействии устройства. При различной интенсивности изнашивания может наблюдаться явление, как поглощения молекул остаточных газов, так и их выделение. Аналогичные явления наблюдаются при различных скоростях скольжения, температурах и давлениях в вакуумной камере.

3.4. Экспериментальные исследования газопро- ницаемости тонкостенных герметизирующих элементов вакуумных устройств с бескон- тактным магнитным взаимодействием

Использование высокого и сверхвысокого вакуума как технологической среды в современном вакуумном технологическом оборудовании,

предъявляет жёсткие требования к составу остаточной газовой среды и накладывает ряд ограничений на применение тех или иных внутрикамерных устройств и вводов движения [8, 94]. При оценке применимости различных типов вводов движения в вакуум, прежде всего рассматривается возможность их высокотемпературного обезгаживающего прогрева, газовыделение из опорных узлов и газопроницаемость тонкостенных герметизирующих элементов.

Требованиям достижения сверхвысокого вакуума, минимума натекания через уплотнение в известной степени удовлетворяют вводы движения с бесконтактным магнитным взаимодействием. Однако требуемое разнообразие тонкостенных герметизирующих элементов ставит перед разработчиками оборудования ряд технологических задач, связанных как с получением заданной формы элементов, так и с обеспечением герметичности и допустимой величины суммарного газового потока через тонкостенный герметизирующий элемент.

Для изготовления тонкостенных герметизирующих элементов сравнительно простых форм используется вытачивание тонкостенного элемента из круга, диаметр которого определяется размером присоединительного фланца ввода движения в вакуум или пластическое деформирование заготовок (штамповка, гидроформовка и др.).

Значительно повысить технологичность изготовления элементов можно посредством применения сварных конструкций, однако при этом возникает опасность увеличения газопроницаемости и ослабления конструкции в зоне сварного шва.

Представляется возможным снизить влияние сварного шва при общем снижении газопроницаемости через тонкостенный герметизирующий элемент и повысить герметичность конструкции благодаря проведению пескоструйной обработки, упрочняющей поверхностные слои и уменьшающей шероховатость поверхности.

Экспериментальная проверка этих предложений была проведена для цельнометаллических (полученных вытачиваем) и сварных тонкостенных герметизирующих элементов. В эксперименте сравнивалось распределение микротвёрдости по различным сечениям тонкостенных герметизирующих элементов (с помощью микротвёрдомера ПМТ-3), а величина газопроницаемости, оценивалась методом, изложенным в работе [95]. Все герметизирующие элементы были предварительно проверены на герметичность с помощью масс-спектрометрического течеискателя СТИ-11 с чувствительностью $8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$.

На рис 3.4.1. и 3.4.2 соответственно представлены схема экспериментальной оснастки для исследования газопроницаемости тонкостенных герметизирующих элементов и тонкостенного герметизирующего элемента УБМВ.

Результаты проведённых экспериментальных исследований распределения микротвёрдости по различным сечениям тонкостенных герметизирующих элементов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, представленные на рис. 3.4.3 ÷ 3.4.4, позволяют сделать следующие выводы.

Упрочнение поверхностных слоев при пескоструйной обработке распространяется на глубину до 200 мкм и может быть значительным. Равномерное упрочнение внутренних поверхностей тонкостенных герметизирующих элементов в виде цилиндра с доньшком эффективно на расстоянии до одного диаметра от присоединительного фланца и затруднено в случае малых диаметров тонкостенных герметизирующих элементов (до 50 мм) и значительной длины цилиндра (рис. 3.4.3, кривые 1,2). Расширение возможностей эффективного упрочнения внутренних поверхностей длинных элементов (для вакуумных передающих манипуляторов) связано с необходимостью модернизации оборудования для пескоструйной обработки.

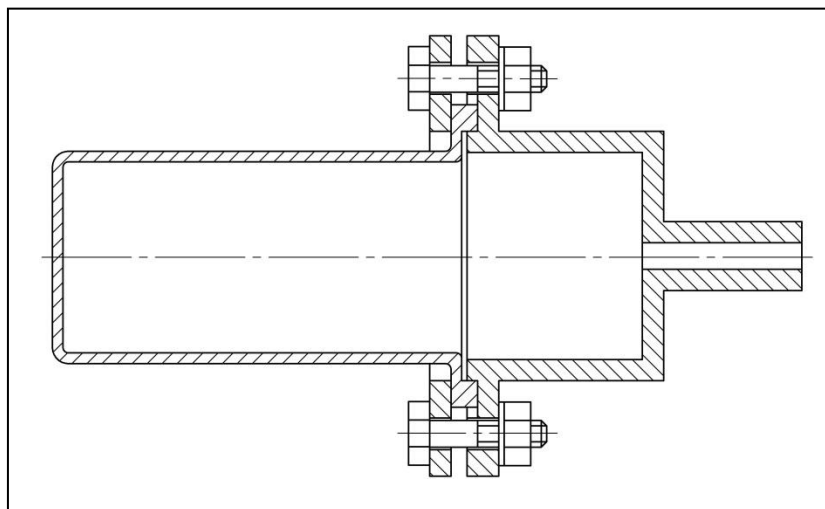


Рис.3.4.1. Схема экспериментальной оснастки для исследования газопроницаемости тонкостенных герметизирующих элементов



Рис.3.6.2. Тонкостенный герметизирующий элемент устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием

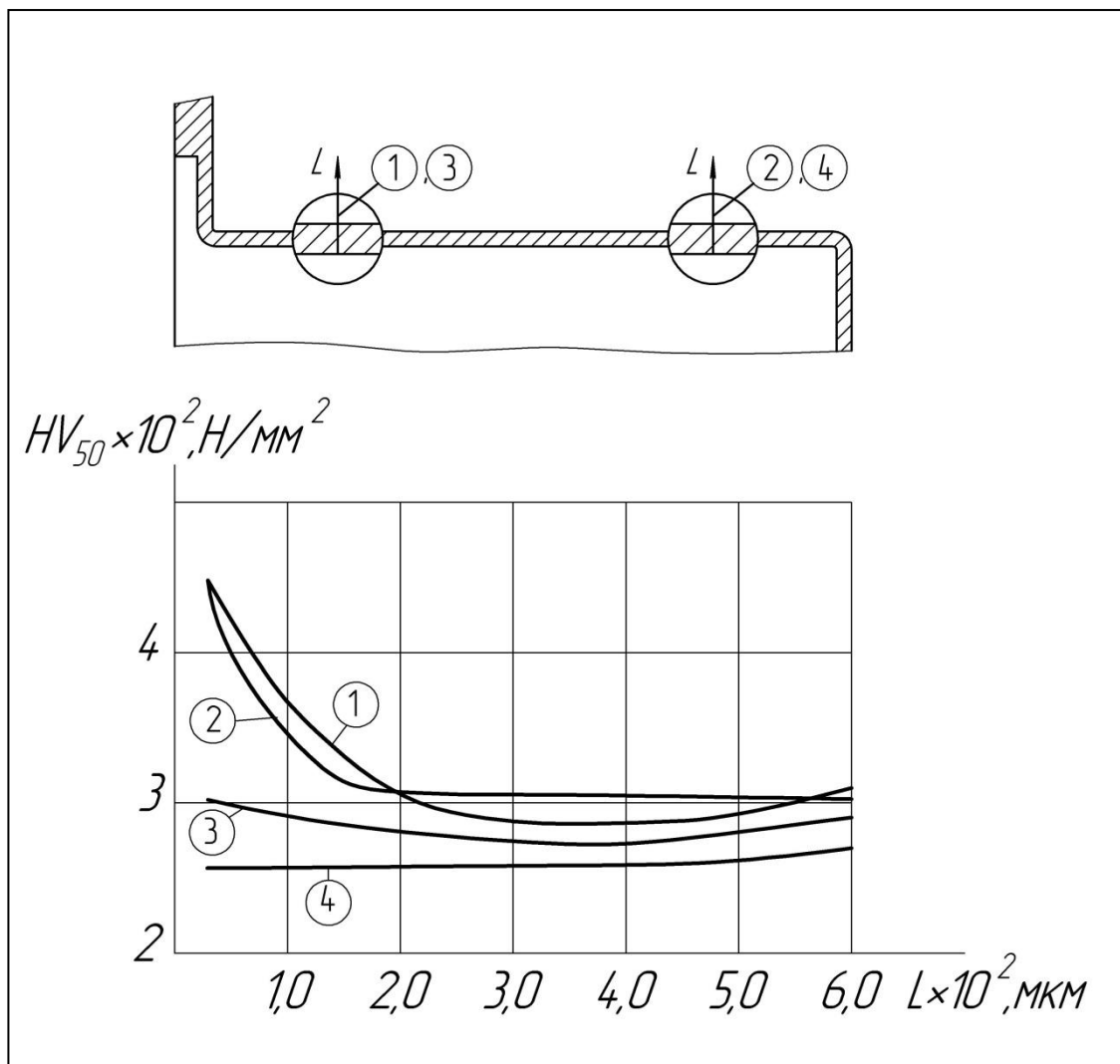


Рис.3.6.3. Распределение микротвёрдости по сечениям образцов из сталей 40X13 (1,2) и 20X13 (3,4), подвергнутых пескоструйной обработке

Сварной шов, подвергнутый пескоструйной обработке, имеет сравнительно стабильную микротвёрдость по сечению и вдоль образующей тонкостенного герметизирующего элемента (рис.3.4.4, кривая 1).

Величина радиуса переходных участков не влияет на распределение микротвёрдости в поверхностных слоях тонкостенной герметизирующей оболочки (рис. 3.4.4, кривая 2).

Результаты экспериментальных исследований показали, что газопроницаемость цельнометаллических и сварных тонкостенных герметизирующих элементов различных конструктивных форм может быть значительно уменьшена посредством пескоструйной обработки. Величина суммарного газового потока через тонкостенный герметизирующий элемент устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, в результате пескоструйной обработки, была в среднем снижена с $9,2 \times 10^{-8}$ до $2,1 \times 10^{-9}$ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$, то есть не менее чем в 7 раз, для элементов изготовленных из сталей 20X13, 40X13 и 12X18Н10Т (табл. 3.4.1).

Таким образом упрочнение пескоструйной обработкой не только снижает газопроницаемость, но и позволяет создавать многофункциональные устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, в том числе вакуумные технологические и прецизионные манипуляторы, благодаря использованию сварных тонкостенных герметизирующих элементов различных форм.

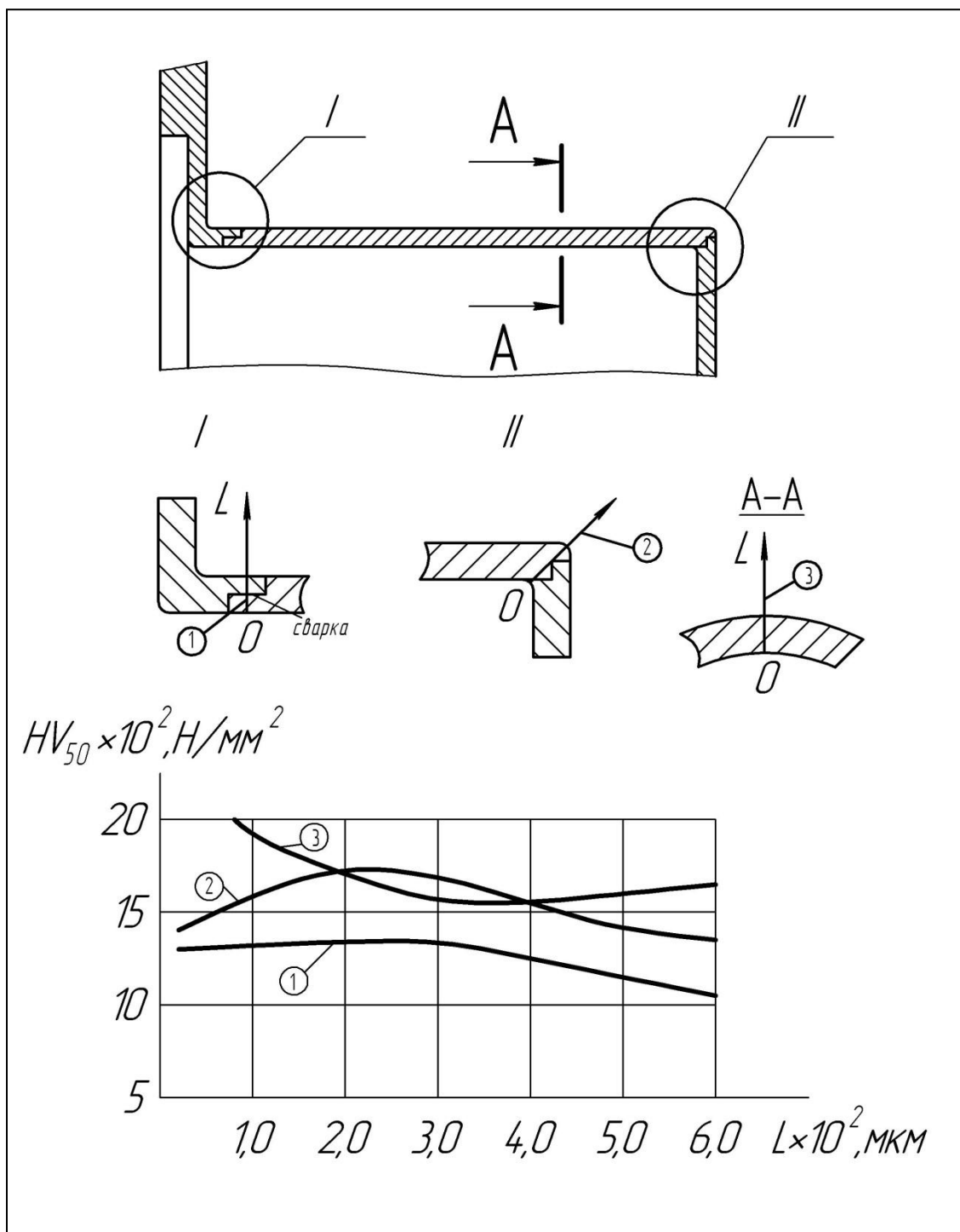


Рис.3.6.4. Распределение микротвёрдости по сечениям образцов из стали 12X18H10Т. Пескоструйной обработке подвергнут только сварной шов

Исследование газопроницаемости тонкостенных герметизирующих элементов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Таблица 3.6.1

№ образца	Тип тонкостенного герметизирующего элемента	Материал тонкостенного герметизирующего элемента	Толщина тонкостенного герметизирующего элемента, мм	Длина тонкостенного герметизирующего элемента, мм	Наружный диаметр тонкостенного герметизирующего элемента	Суммарная площадь тонкостенного герметизирующего элемента, мм ²	Конструктивно-технологические особенности изготовления тонкостенного герметизирующего элемента	Величина суммарного газового потока через тонкостенный герметизирующий элемент, М ³ ×Па×с ⁻¹
1	Цилиндрический стакан	12X18Н10Т	0,5	80	44	12578	Без упрочнения поверхности	$1,6 \times 10^{-8}$
2	Цилиндрический стакан	12X18Н10Т	0,5	80	44	12578	Наружная пестоструйная обработка	$2,2 \times 10^{-9}$
3	Цилиндрический стакан	12X18Н10Т	0,5	80	44	12578	Двухсторонняя пестоструйная обработка	$2,1 \times 10^{-9}$
4	Цилиндрический стакан	20X13	0,5	80	44	12578	Без упрочнения поверхности	$7,8 \times 10^{-8}$
5	Цилиндрический стакан	20X13	0,5	80	44	12578	Наружная пестоструйная обработка	$1,1 \times 10^{-8}$
6	Цилиндрический стакан	20X13	0,5	80	44	12578	Двухсторонняя пестоструйная обработка	$1,0 \times 10^{-8}$
7	Цилиндрический стакан	40X13	0,5	80	44	12578	Без упрочнения поверхности	$9,2 \times 10^{-8}$
8	Цилиндрический стакан	40X13	0,5	80	44	12578	Наружная пестоструйная обработка	$1,3 \times 10^{-8}$
9	Цилиндрический стакан	40X13	0,5	80	44	12578	Двухсторонняя пестоструйная обработка	$1,2 \times 10^{-8}$

Глава 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ПРИ СОЗДАНИИ УСТРОЙСТВ С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ И МИНИМАЛЬНЫМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ВАКУУМНУЮ СРЕДУ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

4.1. Методика инженерного расчёта устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования

Настоящая методика устанавливает основные расчетные зависимости для передач с бесконтактным магнитным взаимодействием и цилиндрическим аксиально намагниченным магнитом.

При оценке величины передаваемого крутящего момента передачи приняты следующие допущения: магнитная проницаемость стали магнитопроводов бесконечно велика по сравнению с магнитной проницаемостью рабочих зазоров; магнитное поле принято плоскопараллельным и описывается уравнениями Лапласа [96].

Методика применима для расчёта передач с бесконтактным магнитным взаимодействием, работающих в вакууме или атмосфере.

Принятая терминология и обозначения

1. Рассогласование x_0 зубчатых колес передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием при приложении рабочего момента M_1 – линейная величина перемещения внешнего зубчатого колеса под действием

момента M_1 при остановленном внутреннем зубчатом колесе.

2. Коэрцитивная сила по индукции H_{CB} – величина напряженности внешнего магнитного поля H , необходимая для полного размагничивания магнита ($B=0$).

3. Остаточная индукция B_r – индукция B магнитного поля магнита при напряженности внешнего магнитного поля H , равной нулю.

4. Магнитная проводимость Λ рабочего зазора – скалярная величина, равная отношению магнитного потока в рассматриваемом участке магнитной цепи к разности магнитных потенциалов на этом участке.

5. Коэффициент удельной магнитной проводимости λ рабочего зазора – безразмерная величина, равная отношению величины равномерного зазора δ к длине магнитной линии $l_{м.л.}$.

6. Магнитный скалярный потенциал F_m – скалярная величина, численно равная работе, совершаемой при переносе полюса с единичной магнитной массой из бесконечности в данную точку.

Проектный расчёт

1. Рабочий зазор δ (рис.4.1.1)

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_{\text{э}}, \text{ м,}$$

где δ_1 – конструктивный зазор между поверхностью выступов внешнего зубчатого колеса и внешней поверхностью экрана, м;

δ_2 – конструктивный зазор между поверхностью выступов внутреннего зубчатого колеса и внутренней поверхностью экрана, м;

$\delta_{\text{э}}$ – толщина экрана, м (экран из немагнитных материалов).

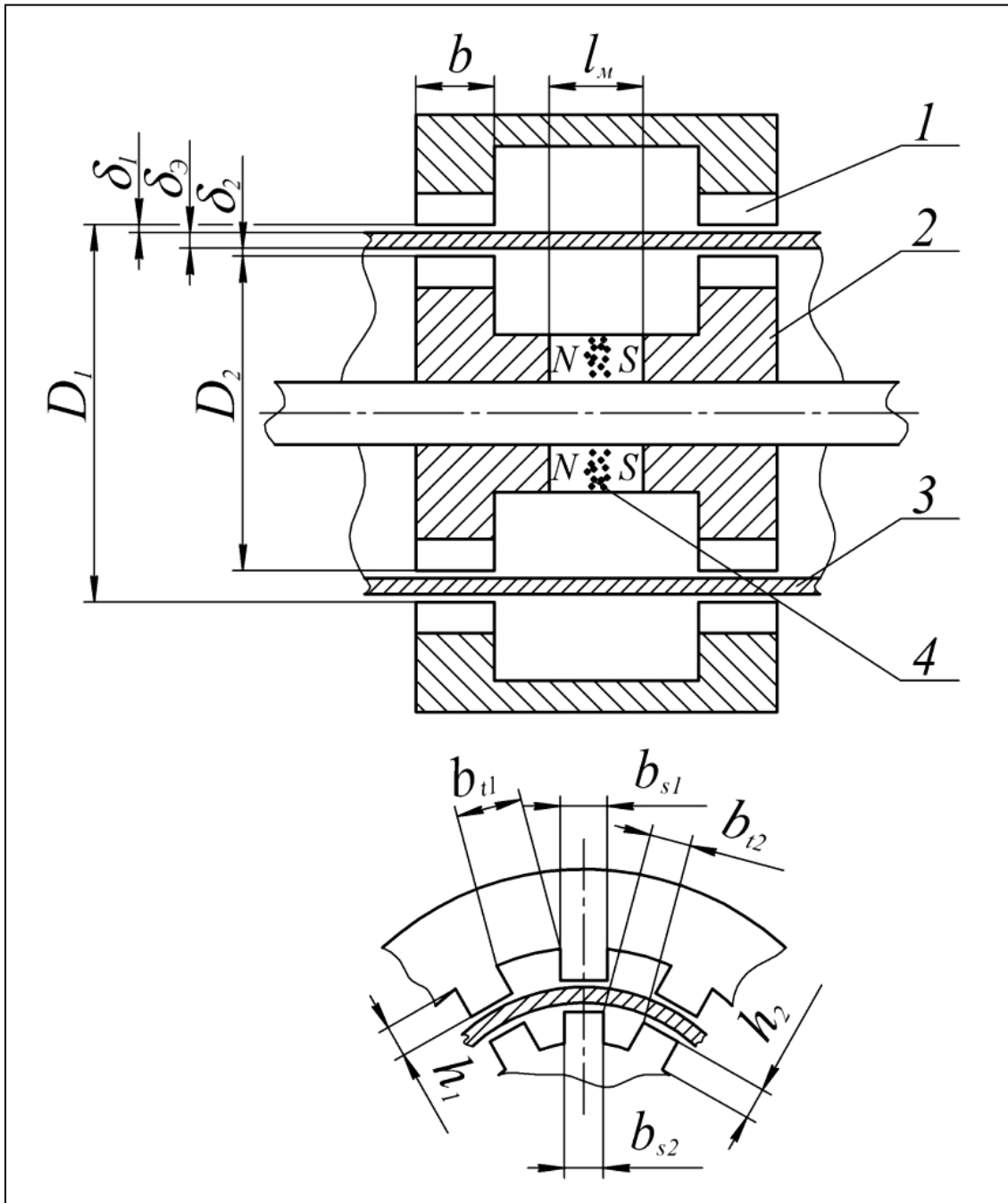


Рис.4.1.1. Вакуумная зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием: 1 – внешнее зубчатое колесо; 2 – внутреннее зубчатое колесо; 3 – экран; 4 – магнит

2. Геометрические размеры зубчатого рабочего зазора (см. рис.4.1.1):

Ширина зубца внутреннего зубчатого колеса

$$b_{s2} = (7...10) \cdot \delta, \text{ м.}$$

Ширина паза внутреннего зубчатого колеса

$$b_{t2} = (1,25...1,50) \cdot b_{s2}, \text{ м.}$$

Глубина паза внутреннего зубчатого колеса

$$h_2 = (0,8...1,2) \cdot b_{t2}, \text{ м.}$$

Ширина зубца внешнего зубчатого колеса

$$b_{s1} = \frac{D_1}{D_2} \cdot b_{s2}, \text{ м,}$$

где D_1 – диаметр выступов внешнего зубчатого колеса, м;

D_2 – диаметр выступов внутреннего зубчатого колеса, м.

Ширина паза внешнего зубчатого колеса

$$b_{t1} = \frac{D_1}{D_2} \cdot b_{t2}, \text{ м.}$$

Глубина паза внешнего зубчатого колеса

$$h_1 = (0,8...1,2) \cdot b_{t1}, \text{ м.}$$

3. Число зубцов зубчатых колес

$$Z = \frac{D_1 \cdot \pi}{b_{s1} + b_{t1}}.$$

Примечание. Целочисленное значение Z достигается за счет варьирования величин b_{s1} и b_{t1} в указанных выше пределах.

4. Окружное усилие на внешнем зубчатом колесе

$$P_1 = \frac{2M_1}{D_1}, \text{ Н.}$$

5. Значение магнитного потенциала F_m^0 , создающего магнитный момент M_1 на внешнем зубчатом колесе

$$F_m^0 = \sqrt{\frac{2P_1 \cdot \delta \cdot k_3}{\mu_0 \cdot b}}, \text{ А,}$$

где k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,8$;

b – длина зубцов магнитной передачи с магнитным бесконтактным взаимодействием в аксиальном направлении, м.

6. Коэффициент удельной магнитной проводимости λ определяется в зависимости от величины относительного рассогласования $x^* = \frac{x}{\delta}$ и относительной ширины зубца $b_{s1}^* = \frac{b_{s1}}{\delta}$ внешнего зубчатого колеса (рис.4.1.2).

7. Магнитная проводимость рабочего зазора передачи

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \cdot \lambda \cdot b \cdot Z}{2}, \text{ Гн.}$$

8. Длина магнита в направлении вектора намагниченности

$$l_m = \frac{2F_m^0}{H_{cB}}, \text{ м.}$$

9. Площадь магнита в нейтральном сечении

$$S_m = \frac{l_m \cdot H_{cB}}{B_r} \cdot \Lambda, \text{ м}^2.$$

Поверочный расчёт

1. Предельное относительное рассогласование $\overline{x^*}$ зубцов внешнего и внутреннего зубчатых колес, при котором обеспечивается максимально возможный момент \overline{M}_{\max}

$$\overline{x^*} = \frac{b_{s1}}{2\delta}, \text{ о.е.}$$

2. Коэффициент удельной магнитной проводимости $\overline{\lambda}$ определяется в зависимости от значения предельного относительного рассогласования $\overline{x^*}$ и величины b_{s1} .

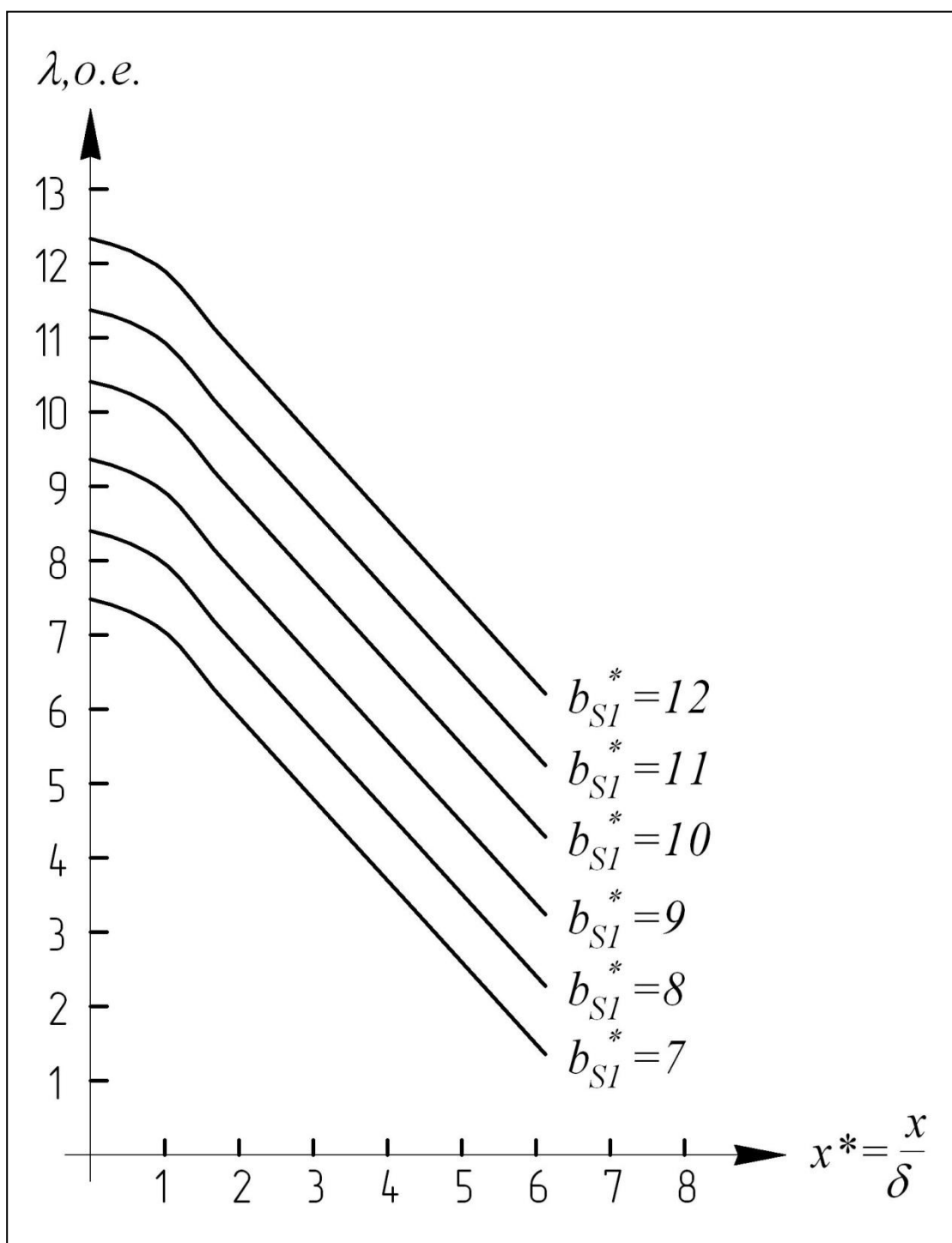


Рис.4.1.2. Зависимость коэффициента удельной магнитной проводимости λ от величины относительного рассогласования x^* и относительной ширины зубца b_{s1}^*

3. Магнитная проводимость рабочего зазора передачи

$$\bar{\Lambda} = \frac{\mu_0 \cdot \lambda \cdot b \cdot Z}{2}, \text{ Гн.}$$

4. Магнитный скалярный потенциал \bar{F}_m , обеспечивающий создание магнитного момента \bar{M}_{\max}

$$\bar{F}_m = \frac{B_r \cdot S_M}{\bar{\Lambda} + \frac{B_r \cdot S_M}{H_{cB} \cdot l_M}}, \text{ А.}$$

5. Максимальный момент \bar{M}_{\max} , передаваемый передачей с бесконтактным магнитным взаимодействием

$$\bar{M}_{\max} = \frac{1}{4} \mu_0 \cdot \bar{F}_m^2 \cdot \frac{b \cdot D_1}{k_3 \cdot \delta}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Примечание 1. Если расчётный момент \bar{M}_{\max} не меньше заданного максимального M_{\max} , т.е.

$$\bar{M}_{\max} \geq M_{\max}, \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

то габариты выбраны верно.

Примечание 2. Если неравенство не выполняется, то следует увеличить длину магнита l_M и повторить проверочный расчет.

Примечание 3. Если передача с бесконтактным магнитным взаимодействием предназначена для работы в атмосферных условиях (экран отсутствует), то

$$\delta = D_1 - D_2, \text{ м.}$$

По разработанной методике, составлены алгоритм и программа расчёта. Программа защищена Свидетельством Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ [97].

На базе методики создан стандарт организации СТО НИИ ПТ 02-11 «Расчёт вакуумных передач с бесконтактным магнитным взаимодействием».

4.2. Вводы движения в вакуум с бесконтактным магнитным взаимодействием

В разделе представлены разработанные вводы движения с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим (загрязняющим) воздействием на вакуумную среду.

Конструкция ввода с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи в высокий вакуум вращательного движения с небольшими нагрузками показана на рис.4.2.1, а, б. Магнитная связь в устройстве обеспечивается радиально расположенными постоянными магнитами.

На ведомом валу 1, расположенном в вакууме и смонтированным на подшипниках 2 и 3 в герметичном корпусе 4, установлены магниты 5, образующие с магнитами 9, расположенными в ведущем корпусе 6, радиальную систему постоянных магнитов с зазором между полюсами. В зазоре расположена тонкостенная цилиндрическая часть корпуса 4 (герметизирующая тонкостенная оболочка), выполненная из немагнитного материала.

Герметизирующая тонкостенная оболочка ввода движения в вакуум выполнена с пескоструйной обработкой, что позволяет уменьшить газопроницаемость оболочки не менее чем в 7 раз.

Ведущий корпус-вал 6 установлен на вакуумных шарикоподшипниках 7 и 8, также установленных в герметичном корпусе 4.

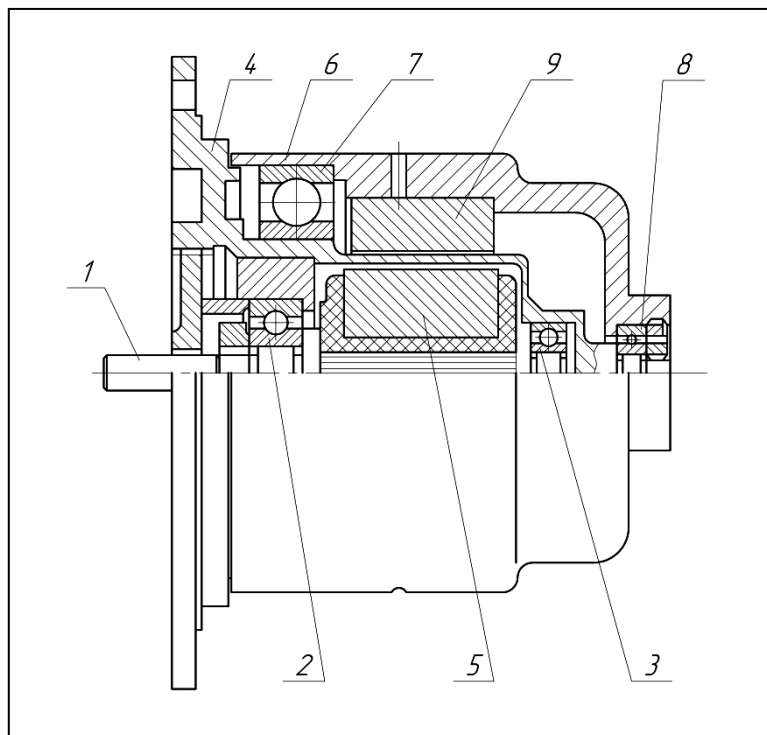
Ввод движения герметизируется при установке в вакуумную камеру посредством уплотнителя, размещаемого на фланцевой части корпуса.

На рис.4.2.2,а представлена муфта-редуктор с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём, развертка зубцовой зоны, соответствующей одному сектору.

На рис.4.2.2,б показан график распределения усредненной магнитной индукции по линии магнитного взаимодействия зубцов кругового сектора с зубцами герметизирующего стакана.



а)



б)

Рис.4.2.1. Ввод с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращательного движения в высокий вакуум: а – внешний вид; б – конструкция

На рис.4.2.2,в представлена муфта-редуктор с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём, поперечный разрез с тремя секториальными зонами магнитного взаимодействия.

На рис.4.2.2,г показан разрез устройства по А-А, поясняющий П-образную форму зубцов.

Муфта-редуктор с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём (см. рис.4.2.2,а) содержит ротор в форме кругового сектора 1, герметизирующий стакан 2 и обойму 3, концентрично установленные с зазором друг относительно друга. На наружной поверхности кругового сектора 1 имеются зубцы 4 П-образной формы униполярного намагничивания. На внутренней поверхности герметизирующего стакана 2 выполнены зубцы 5 П-образной формы.

Число круговых секторов 1 может быть один и более. Зубцы 4 на круговом секторе 1 и зубцы 5 на герметизирующем стакане 2 имеют различные угловые шаги ($\varphi_{\text{сек}} \neq \varphi_{\text{ст}}$). В обойме 3, на внутренней поверхности установлен полюсный выступ в форме кольцевого сектора 6 из магнитомягкого материала. Число кольцевых секторов 6 не менее одного и равно числу круговых секторов 1. Центральные углы $\alpha_{\text{кр}}$ и $\alpha_{\text{кол}}$ кругового 1 и кольцевого 6 секторов равны между собой ($\alpha_{\text{кр}} = \alpha_{\text{кол}}$). Радиальные воздушные зазоры между элементами муфты-редуктора выбраны минимальными с целью обеспечения значительно большей магнитной проводимости системы в радиальном направлении по сравнению с окружным.

Радиальная магнитная проводимость герметизирующего стакана 2 больше, чем окружная. Зубцы 4 на круговом секторе 1 установлены с возможностью магнитного взаимодействия с зубцами 5 на герметизирующем стакане 2 и кольцевым сектором 6.

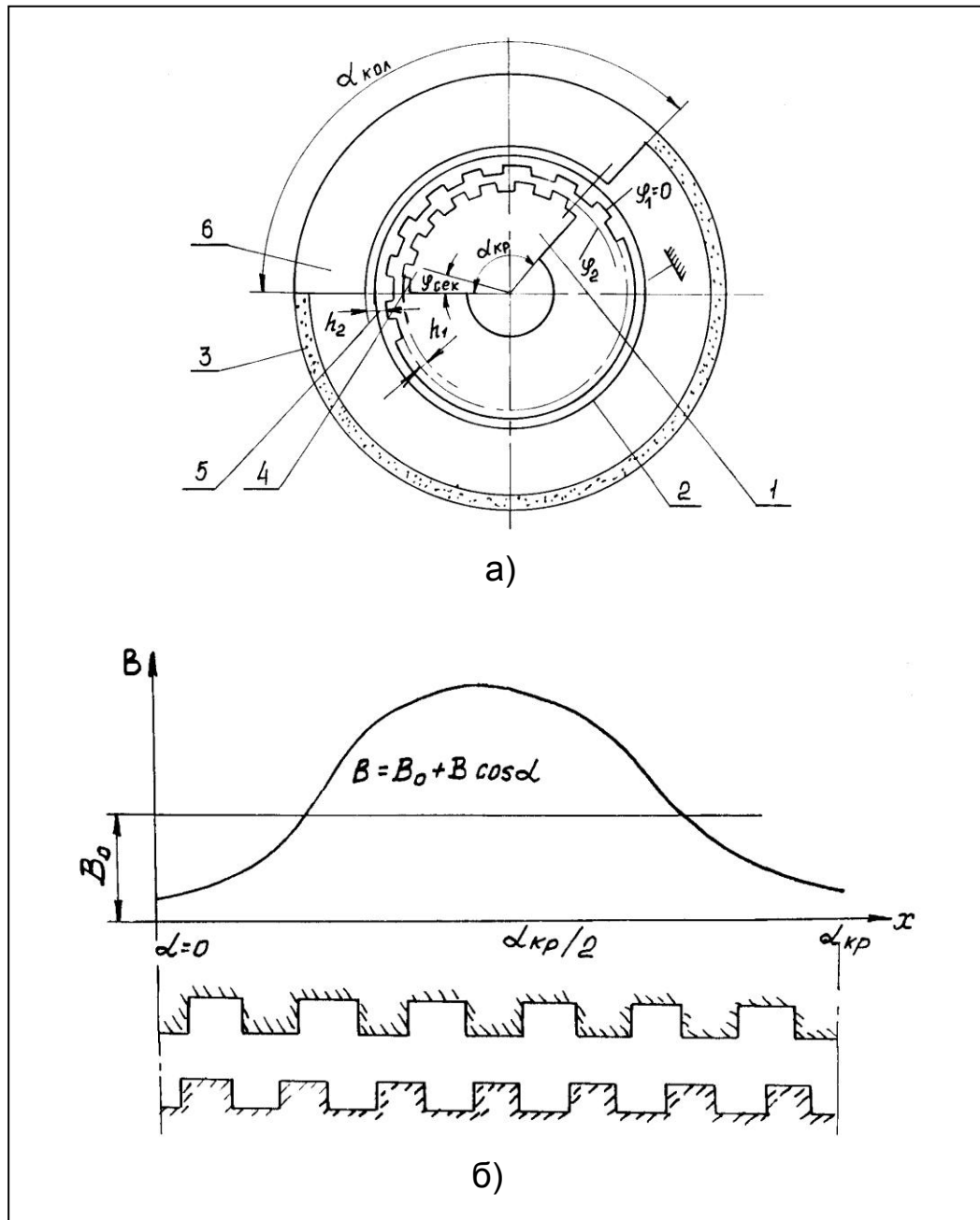
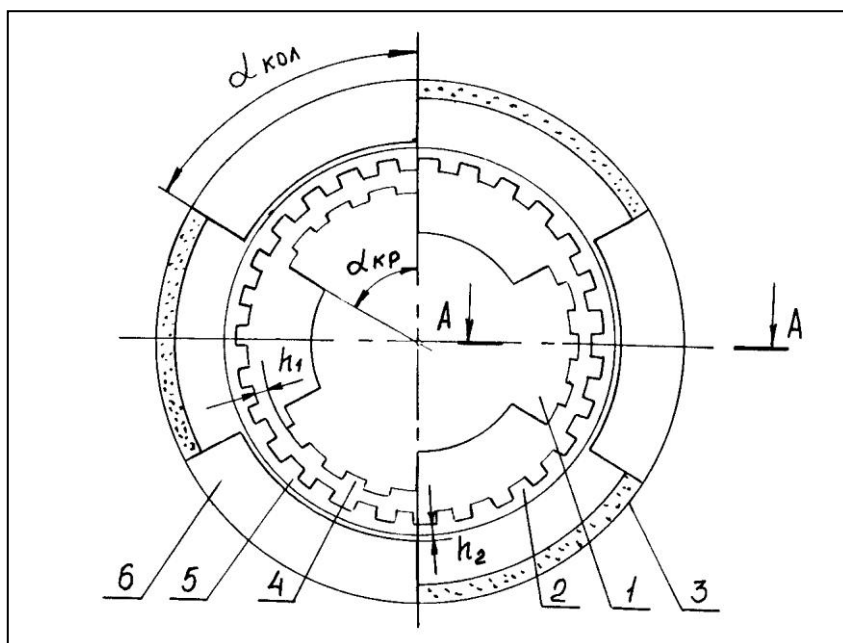
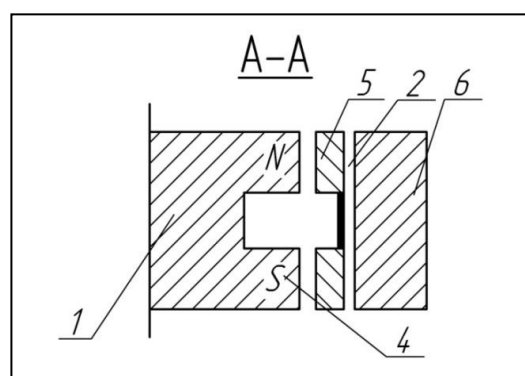


Рис.4.2.2. Муфта-редуктор с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём: а - развертка зубцовой зоны, соответствующей одному сектору; б – распределение усредненной магнитной индукции по линии магнитного взаимодействия зубцов кругового сектора с зубцами герметизирующего стакана



в)



г)

Рис.4.2.2. (продолжение) Муфта-редуктор с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём: в – поперечный разрез с тремя секториальными зонами магнитного взаимодействия; г – разрез по А-А, поясняющий П-образную форму зубцов магнитной проводимости системы в радиальном направлении по сравнению с окружающим

Устройство работает следующим образом. При вращении кругового сектора 1 индукция магнитного поля B в материале зубцов 5 и кольцевого сектора 6 будет изменяться на секториальном участке по закону $B = B_0 + B_1 \cos \varphi$. Причем, максимум вектора индукции сместится на угол φ_{cm} при смещении кругового сектора 1 на угол $\Delta\varphi = \varphi_{ст} - \varphi_{сек}$ в направлении, соответствующем направлению вращения кругового сектора 1, если $\varphi_{ст} > \varphi_{сек}$. Если же $\varphi_{ст} < \varphi_{сек}$, то направление смещения максимума вектора индукции будет противоположным направлению вращения кругового сектора 1. При этом максимум вектора индукции сместится также на угол $\varphi_{ст}$, а магнитный поток замыкается через зубцы 5 герметизирующего элемента и магнитомягкий материал кольцевого сектора 6, так как радиальная магнитная проводимость герметизирующего стакана 2 больше чем окружная. При этом обойма 3 совместно с кольцевым сектором 6 начинает вращаться синфазно с вектором магнитной индукции, за счет взаимодействия магнитного поля, образованного круговым сектором 1. Передаточное число устройства равно

$$U = \frac{\varphi_{ст} - \varphi_{сек}}{\varphi_{ст}} \text{ при } \varphi_{ст} > \varphi_{сек},$$

т.е. в этом случае имеет место увеличение частоты вращения выходного элемента – обоймы 3, по сравнению с входным элементом – круговым сектором 1.

При $\varphi_{ст} < \varphi_{сек}$ передаточное число магнитной муфты-редуктора также равно

$$U = \frac{\varphi_{ст} - \varphi_{сек}}{\varphi_{ст}} \text{ при } \varphi_{ст} < \varphi_{сек},$$

однако в этом случае выходной элемент – обойма 3, вращается в сторону противоположную вращению входного элемента – кругового сектора 1.

При $\varphi_{ст} = \varphi_{сек}$ передачи вращения не производится.

Для получения редуцирования частоты вращения необходимо подать вращение на обойму 3, при этом круговой сектор 1 будет вращаться с частотой меньшей, чем частота вращения обоймы 3, а передаточное число будет равно

$$U = \frac{\varphi_{\text{ст}}}{\varphi_{\text{ст}} - \varphi_{\text{сек}}} \text{ при } \varphi_{\text{ст}} > \varphi_{\text{сек}} \text{ или } \varphi_{\text{ст}} < \varphi_{\text{сек}} .$$

Причем при $\varphi_{\text{ст}} > \varphi_{\text{сек}}$, направление вращения обоймы 3 и кругового сектора 1 совпадают, а при $\varphi_{\text{ст}} < \varphi_{\text{сек}}$ они противоположны.

Таким образом, предлагаемое устройство может быть использовано как мультипликатор, так и редуктор.

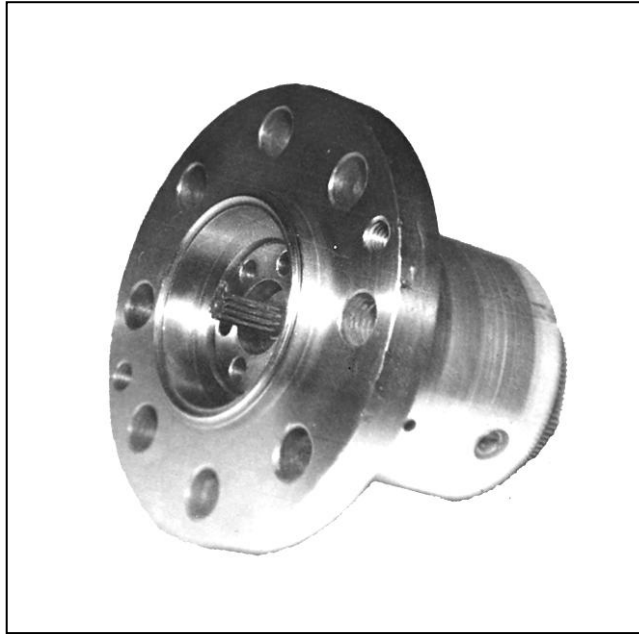
Разработка защищена Патентом Российской Федерации [98].

Применение муфты-редуктора с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращения в герметизированный объём позволяет повысить надежность работы, за счет наличия достаточно большой зоны магнитного взаимодействия, и упрощает конструкцию за счет того, что в ней используется только один магнит – круговой сектор.

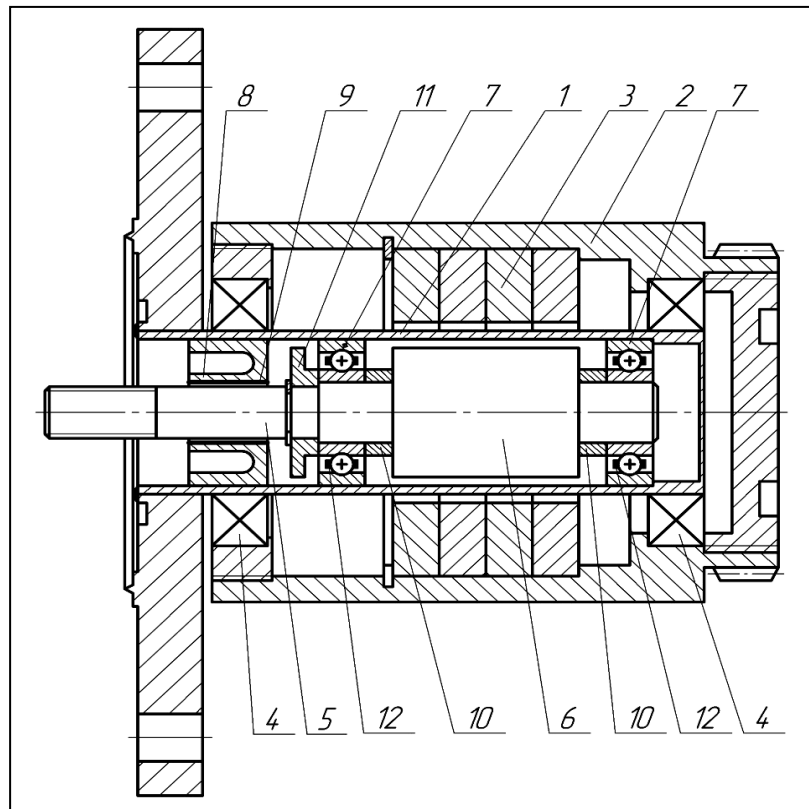
Конструкция герметичной муфты с бесконтактным магнитным взаимодействием для передачи вращательного движения в вакуум представлена на рис.4.2.3, а, б.

Устройство содержит вакуумный фланец с герметизирующей тонкостенной оболочкой 1, внешнюю кольцевую систему 2 с постоянными магнитами 3, расположенную на шарикоподшипниках 4, вал 5 с магнитопроводом 6, расположенный на шарикоподшипниках 7, втулку 8.

На внутренней поверхности 9 втулки 8, обращенной к валу 5, и на самом валу 5 нанесены слои адсорбента, образуя щелевое уплотнение. На частях вала 5 установлены кольцевые магниты 10 и 11. Сепараторы 12 шарикоподшипников 7 выполнены из материала-адсорбента – титанового сплава ВТ-5.



а)



б)

Рис.4.2.3. Герметичная муфта с бесконтактным магнитным взаимодействием

Перед эксплуатацией муфты происходит её нагрев и обезгаживание. В процессе работы устройства из его шарикоподшипников 7 происходит выделение газового потока и микрочастиц износа. Газы адсорбируются на сепараторах 12, на внутренней поверхности втулки 8 и на самом валу 5, в месте установки втулки 8. В результате образуется газовый барьер, который не позволяет молекулам газов вылетать из шарикоподшипникового узла.

Таким образом, в процессе работы внутри устройства образуется свой микроклимат с повышенным давлением. Это обеспечивает уменьшение выноса микрочастиц из узла, а образовавшиеся все-таки частицы износа улавливаются кольцевыми магнитами 10 и 11. Адсорбирование молекул газов на сепараторах 12 позволяет создать так называемое «третье» тело в узле трения, что также обеспечивает повышение работоспособности устройства в условиях вакуума за счет локализации газовых потоков и загрязняющих микрочастиц.

На рис. 4.2.4 представлена конструкция вакуумного привода с УБМВ [99].

Привод содержит электрический разъём 1, защитный кожух 2, шаговый электродвигатель 3, установленный в стакане 10, выполненном одной деталью с фланцем 4, наружный магнит 5 и внутренний магнит (ведущая полумуфта) 6, герметизированную тонкостенную оболочку 7, корпус наружной полумуфты (ведомой) 8, шарикоподшипники 9. Шаговый электродвигатель 3 установлен в стакане 10 через виброизолятор 11. В корпусе ведомой полумуфты 8, за шарикоподшипниками 9, установлены На рис.4.2.5 представлена конструкция модернизированного сверхвысоковакуумного передающего манипулятора на две степени подвижности: ход манипулятора составляет 600 и 1000 мм, вращение вокруг оси – 360°.

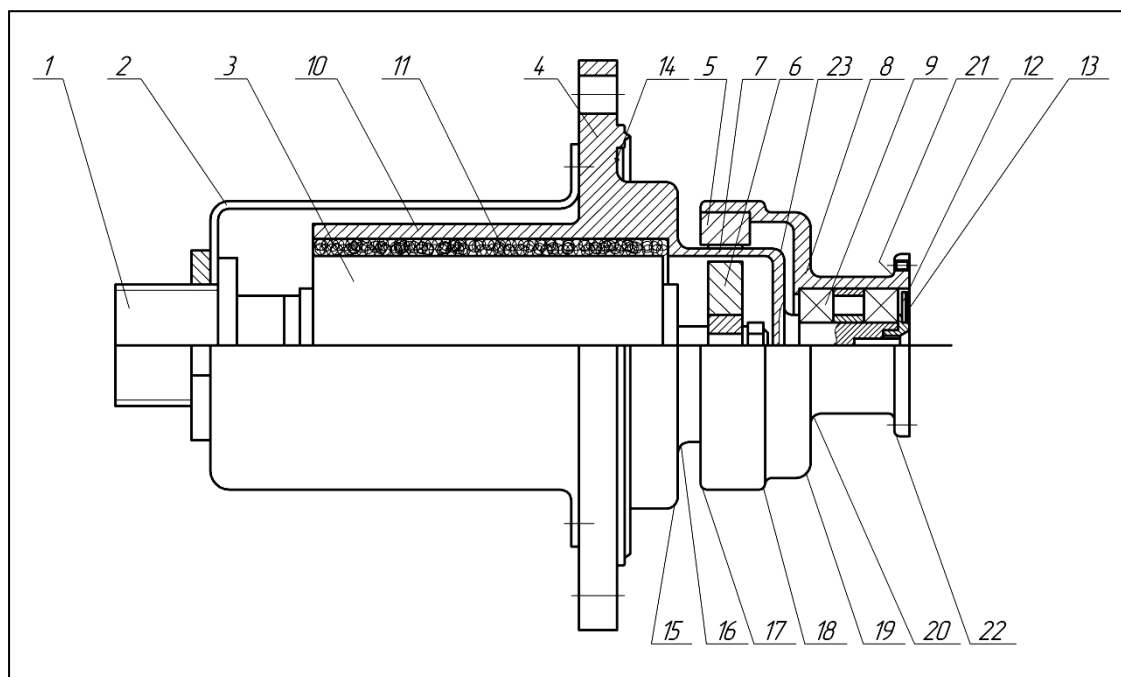


Рис.4.2.4. Вакуумный привод с устройством бесконтактного магнитного взаимодействия

С целью предотвращения вылета и локализации образующихся в опорах качения микрочастиц, в выходной части манипулятора установлено устройство состоящее из 4-х последовательно установленных кольцевых магнитных ловушек.

Зазоры между кольцевыми магнитами и выходных валом манипулятора выполнены различной величины. Первые два кольцевых магнита предназначены для улавливания крупных микрочастиц, а два последующих – для улавливания средних и мелких микрочастиц.

Расположение устройства локализации в выходной части манипулятора обеспечивает свободный доступ к кольцевым магнитам, с целью очистки последних от собранных микрочастиц.

Магниты, необходимые для обеспечения работоспособности манипулятора и расположенные в вакуумной части конструкции, также является естественными ловушками образующихся микрочастиц.

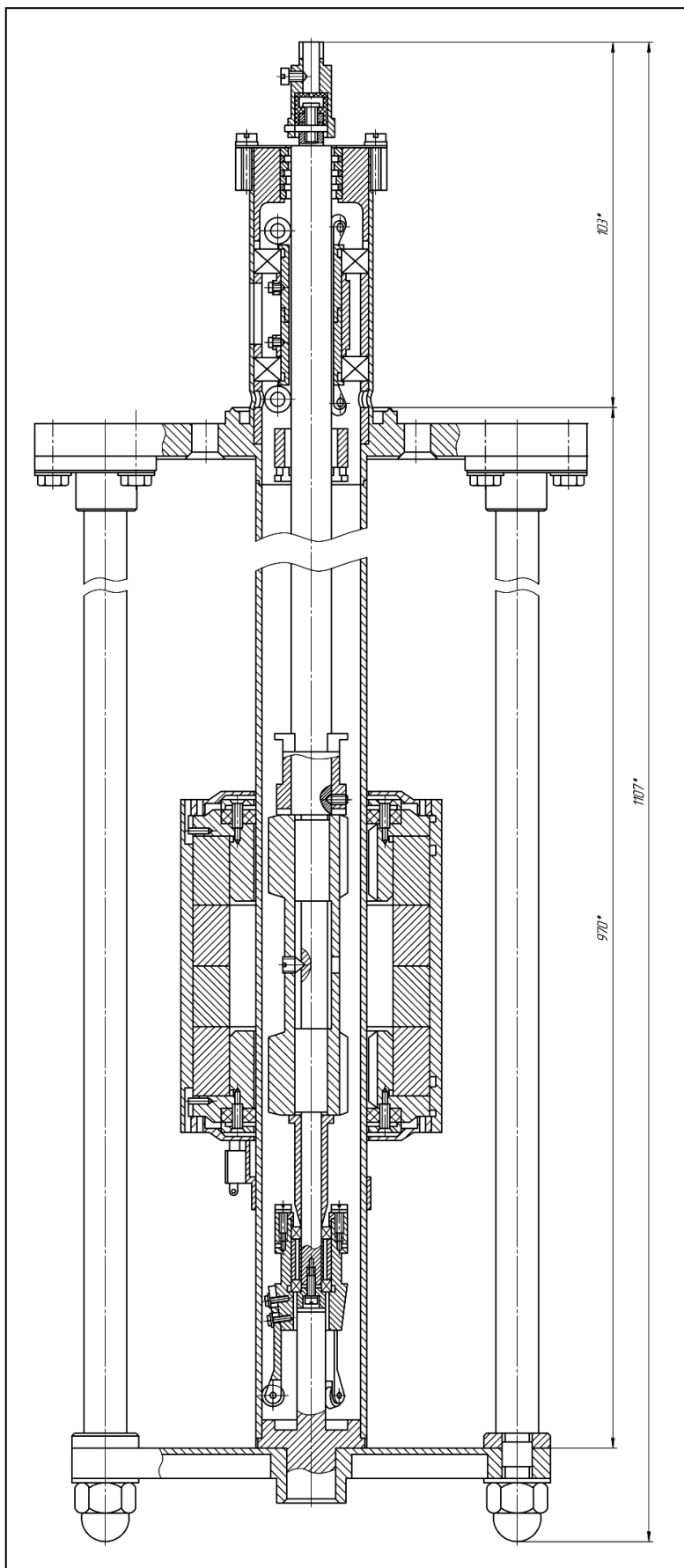


Рис. 4.2.5. Модернизированный сверхвысоковакуумный передающий манипулятор на основе устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием

4.3. Вакуумные передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием

В настоящем разделе рассмотрены разработанные передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием, предназначенные для вакуумного технологического и аналитического оборудования.

На рис.4.3.1,а представлена зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием для работы в вакууме и чистых технологических средах с диском ведущего элемента из магнитомягкого материала.

На рис.4.3.1,б показана зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием для работы в вакууме и чистых технологических средах с диском ведущего элемента из немагнитного материала и пластинами из магнитомягкого материала.

На рис.4.3.1,в представлена зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием для работы в вакууме и чистых технологических средах с магнитными пластинами.

Зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием для работы в вакууме и чистых технологических средах (см. рис.4.3.1,а) содержит ведущий элемент, выполненный в виде диска 1, установленного на валу 2, ведомый элемент, выполненный в виде двух дисков 3,4, закрепленных на торцевых поверхностях 5,6, постоянного магнита 7, установленного на валу 8. Диск 1 выполнен из магнитомягкого материала, на котором нарезаны зубья 9. Диски 3,4 ведомого элемента выполнены с зубьями 10,11 и установлены на валу 8 с возможностью магнитного взаимодействия с ножками 12 и головками 13 зубьев 9 ведущего элемента. Постоянный магнит 7 выполнен с осевой намагниченностью.

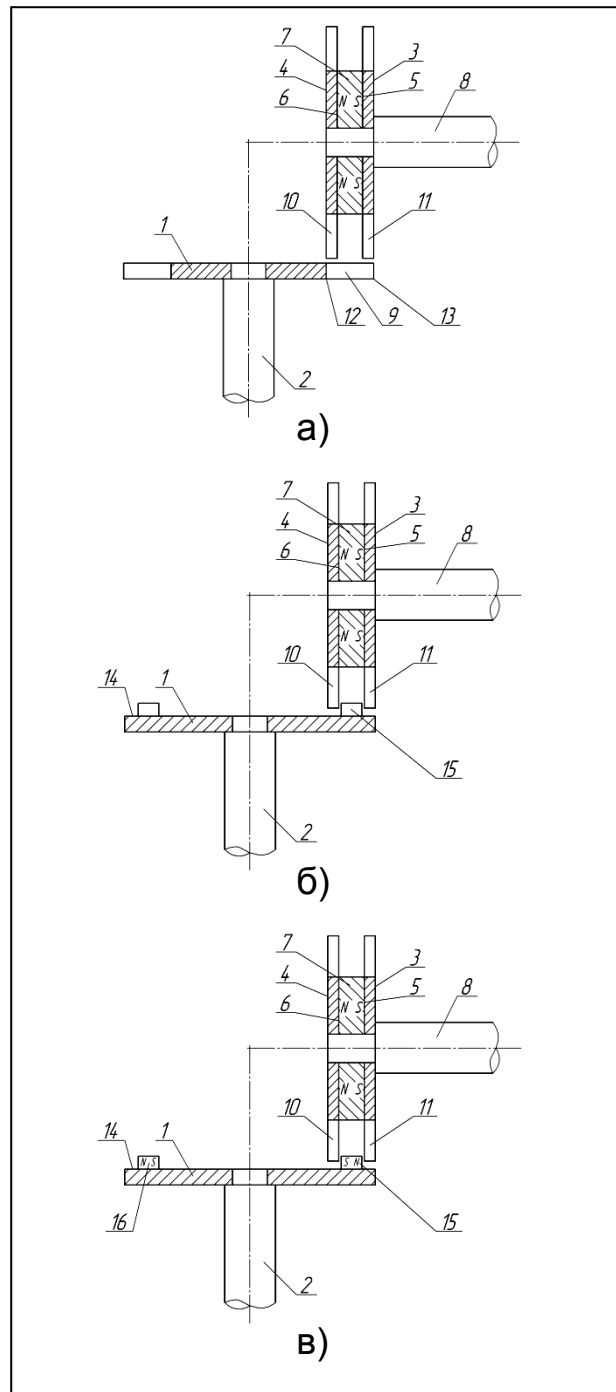


Рис.4.3.1. Магнитная зубчатая передача для работы в вакууме и чистых технологических средах:
а – с диском ведущего элемента из магнито-
мягкого материала; б – с диском ведущего
элемента из немагнитного материала и пла-
стинами из магнитомягкого материала; в – с
магнитными пластинами

Диск 1 может быть выполнен из немагнитного материала, а на его торцевой поверхности 14 закреплены пластины 15 из магнитомягкого материала, таким образом, что шаг между пластинами 15 равен шагу между зубьями 10,11 дисков 3,4 ведомого элемента (см. рис.4.3.1,б).

Пластины 15 могут быть также выполнены в виде постоянных магнитов 16 с продольной намагниченностью (см. рис.4.3.1,в).

Передача работает следующим образом. При вращении диска 1 на валу 2 его зубья 9 вступают в магнитное взаимодействие с зубьями 10,11 дисков 3,4 и происходит передача вращающего момента (см. рис.4.3.1,а). При этом в передаче происходит бесконтактное магнитное взаимодействие без трения и образования микрочастиц износа. Эффект замыкания магнитного потока усиливается при использовании пластин 15 из магнитомягкого материала (см. рис.4.3.1,б) или постоянных магнитов 16 с продольной намагниченностью (см. рис.4.3.1,в).

Разработка защищена Патентом Российской Федерации [100].

Применение предлагаемой зубчатой передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием для работы в вакууме и чистых технологических средах позволяет передавать вращение при перпендикулярных осях. При этом передача является экологически «чистой», так как при её работе не происходит выделения загрязняющих микрочастиц износа в вакуумный объём или чистую технологическую среду.

Передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев для работы в вакууме, в которой шестерня и колесо выполнены с радиальной и осевой намагниченностью соответственно, представлена на рис.4.3.2. Внешний вид колеса передачи показан на рис.4.3.3.

На рис.4.3.4 представлена передача, предназначенная для обеспечения передачи вращения с различными фиксированными передаточными отношениями.

Передача (см. рис.4.3.2) содержит зубчатую шестерню 1 и зубчатое колесо 2, выполненные в виде постоянных магнитов и установленные на ведущем 3 и ведомом 4 валах. Шестерня 1 выполнена с радиальной намагниченностью, а колесо 2 – с осевой. Шестерня 1 (см. рис.4.3.4) установлена на ведущем валу 3 с возможностью фиксированного осевого перемещения. Зубья 5 на колесе 2 выполнены на его торцевой поверхности 6 в виде окружных дорожек 7, причем ширина зубьев 8 шестерни 1 равна ширине зубьев 5 колеса 2, а число дорожек 7 соответствует числу передаточных отношений. Число дорожек 7 равно двум, что соответствует двум передаточным отношениям.

При вращении шестерни 1 на валу 3, в результате взаимодействия магнитных потоков шестерни 1 и колеса 2, последняя начинает вращаться на валу 4. При этом валы 3 и 4 взаимно перпендикулярны.

При изменении передаточного отношения зубчатой передачи шестерня 1 перемещается на ведущем валу 3 до необходимого фиксированного положения и во взаимодействие с зубьями 8 шестерни 1 вступает первая или вторая из дорожек 7.

Разработка защищена Патентом Российской Федерации [101].

Применение предлагаемой зубчатой передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев для работы в вакууме позволяет передавать вращение при перпендикулярных валах, а также позволяет обеспечивать передачу вращения с различными фиксированными передаточными отношениями, не выделяя при этом загрязняющих микрочастиц износа, которые являются определяющими для процесса проектирования вакуумных механизмов электронного машиностроения.

На рис.4.3.5 представлена зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев, содержащая зубчатые шестерню 1 и колесо 2, выполненные в виде подвижных ободов 3 и 4 с отверстиями 5 и 6,

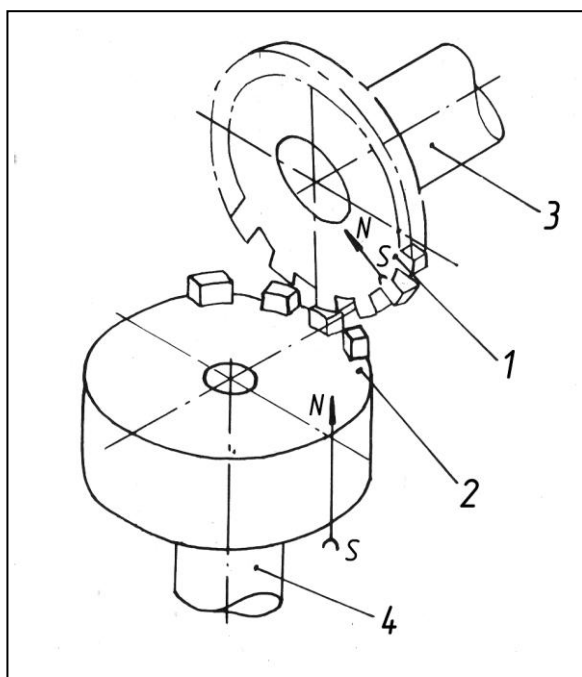


Рис.4.3.2. Зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев для работы в вакууме с шестерней и колесом, выполненными с радиальной и осевой намагниченностью соответственно

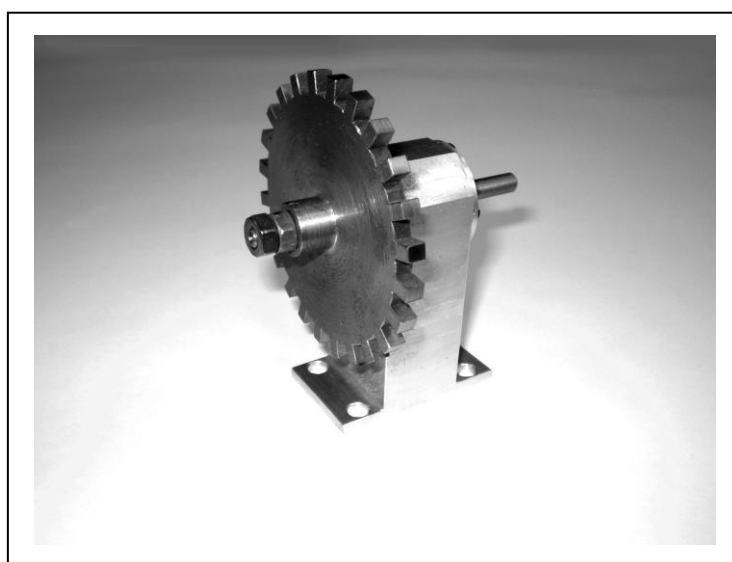


Рис.4.3.3. Зубчатое колесо передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев

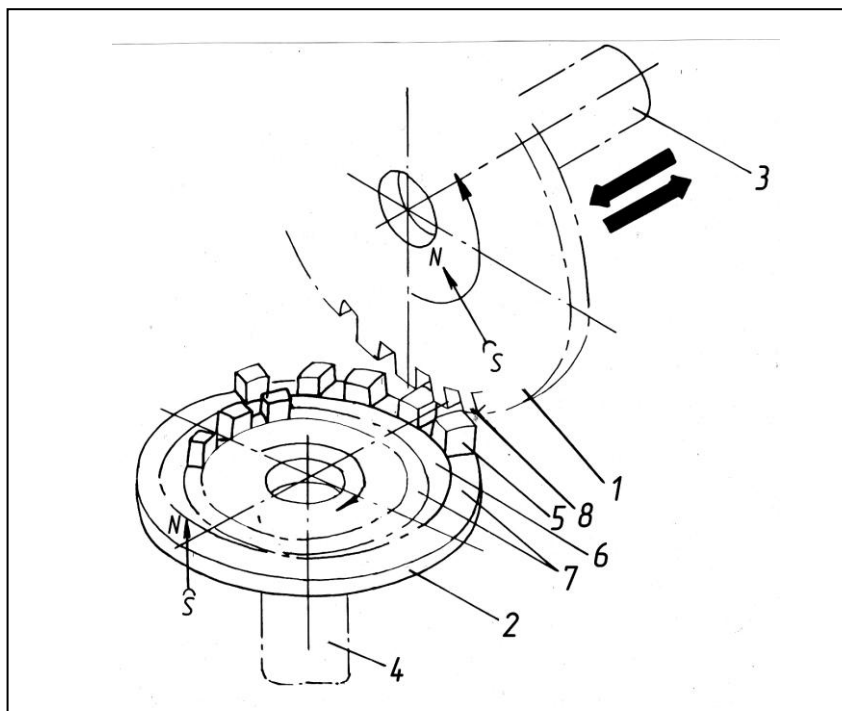


Рис.4.3.4. Зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев предназначенная для обеспечения передачи вращения с различными фиксированными передаточными отношениями

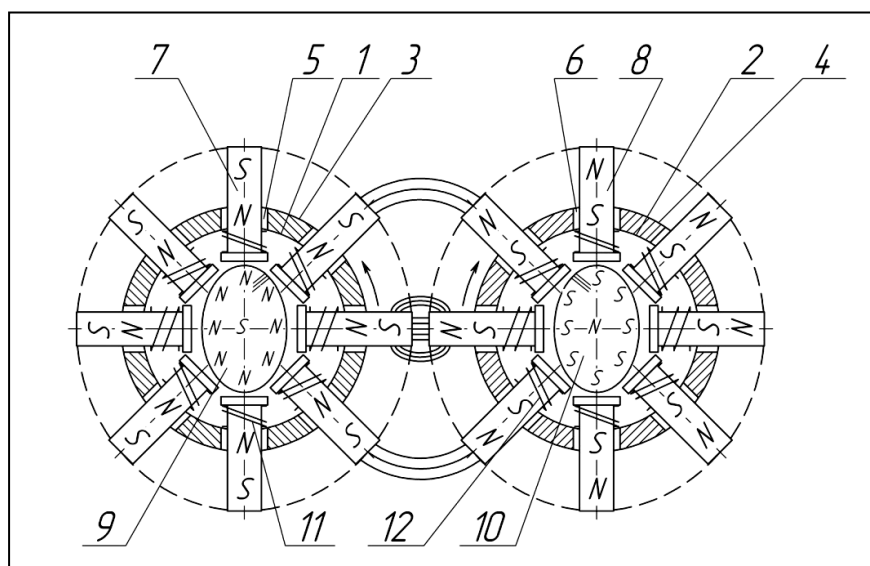


Рис.4.3.5. Зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев

в которые вставлены с зазором подпружиненные постоянные магниты 7 и 8 с возможностью радиального перемещения. Внутри подвижных ободов 3 и 4 установлены радиальнонамагниченные неподвижные магниты 9 и 10 в форме кулачков, с возможностью магнитного взаимодействия с подпружиненными постоянными магнитами 7 и 8. Пружины 11 и 12 выполнены из намагниченного материала с повышенной поперечной жесткостью. Подпружиненные постоянные магниты 7 и 8 шестерни 1 и колеса 2 соответственно обращены друг к другу разноименными полюсами.

Зубчатая передача с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев работает следующим образом. При вращении обода 3 шестерни 1, в результате магнитного взаимодействия подпружиненных постоянных магнитов 7 и 8, начинает вращаться обод 4 колеса 2. В результате этого происходит передача крутящего момента с шестерни 1 на колесо 2. При этом подпружиненные постоянные магниты 7 и 8 имеют возможность радиального перемещения по закону, определяемому профилем кулачков радиальнонамагниченных неподвижных магнитов 9 и 10. Это приводит к расширению зоны «сильного» магнитного взаимодействия, так как подпружиненные постоянные магниты 7 и 8 перемещаются в направлении друг к другу в зонах «слабого» магнитного взаимодействия, которые располагаются сверху и снизу от зоны «сильного» магнитного взаимодействия, превращая тем самым «слабые» зоны в «сильные».

Число пружин 11 и 12 на каждом из подпружиненных постоянных магнитов 7 и 8 может быть одно или два. При этом, повышенная поперечная жесткость пружин 11 и 12 гарантирует от контакта подпружиненных магнитов 7 и 8 с поверхностями отверстий 5 и 6 на подвижных ободах 3 и 4 зубчатых шестерни 1 и колеса 2.

Разработка защищена Патентом Российской Федерации [102].

Применение предлагаемой зубчатой передачи с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев позволяет повысить передаваемый кру-

тящий момент за счёт расширения зоны магнитного взаимодействия. При этом зона «сильного» магнитного взаимодействия является также эффективной ловушкой магнитных микрочастиц износа, выделяемых из опорных узлов с внешним трением, применяемых в передачах, что позволяет использовать её в чистой технологической среде и вакуумном технологическом и аналитическом оборудовании.

4.4. Внутрикамерные функциональные устройства

В разделе представлены разработанные внутрикамерные функциональные устройства для вакуумного технологического и аналитического оборудования.

Модуль для загрузки испарителей в вакуумном технологическом оборудовании (рис.4.4.1) содержит корпус 1 с направляющими и дном, в котором выполнено отверстие 2. В корпусе 1 установлен бункер 3. В бункере 3 выполнено отверстие 4. Вокруг отверстия в бункере 3 выполнена концентрическая кольцевая проточка 5, в которой закреплен кольцевой магнит 6. Механизм дозировки содержит сменную планку 7 с отверстиями 8, вокруг которых выполнены концентрические кольцевые проточки 9 с кольцевыми магнитами 10. Торцевая поверхность 11 магнита 6 расположена на расстоянии порядка 1 мм от поверхности 12 дна бункера 3. Бункер 3 установлен в корпусе 1 в направляющих с возможностью вертикального перемещения. Отверстия 8 в сменной планке 7 имеют разные диаметры, но не более, чем диаметры отверстий 2, 4 дна корпуса 1 и дна бункера 3 соответственно. Торцевые поверхности 13 магнитов 10 расположены на расстоянии также порядка 1 мм от поверхности трения 14 дна корпуса 1. Расстояние между отверстиями 8 в сменной планке 7 равно двум расстояниям между

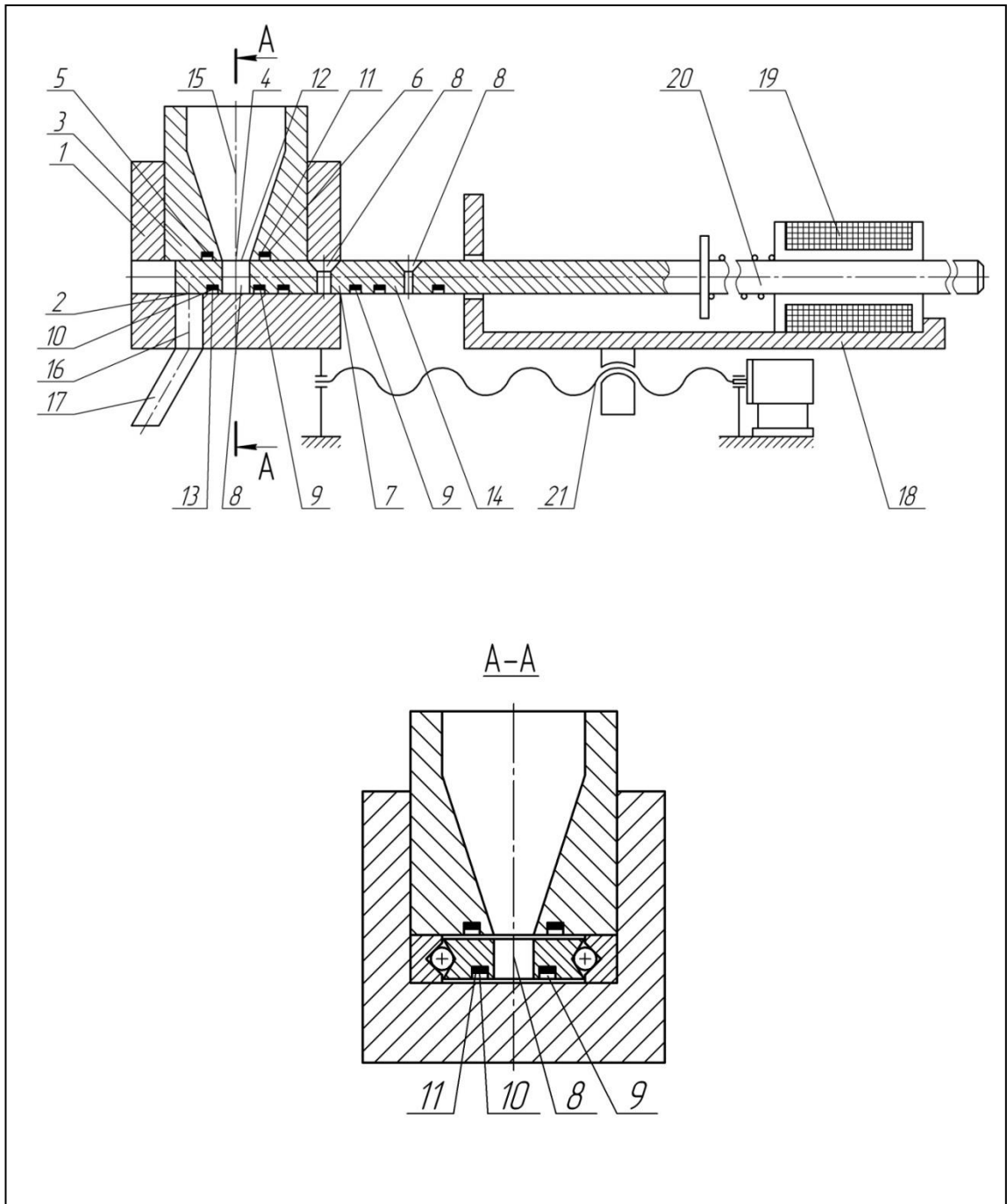


Рис.4.4.1. Модуль для загрузки испарителей в вакуумном технологическом оборудовании с системой магнитной локализации привносимых

осью бункера 15 и осью 16 отверстия 2, соединенного с лотком 17. Сменная планка 7 установлена между дном бункера 3 и дном корпуса 1 с возможностью горизонтального возвратно-поступательного перемещения от привода механизма 18, выполненного в виде электромагнита 19 с подпружиненным сердечником 20, который связан со сменной планкой 7. Приводной механизм 18 также имеет возможность горизонтальной фиксации посредством передачи винт-гайка 21, а лоток 17 выполнен из магнитомягкого материала с остаточной намагниченностью.

Корпус 1, бункер 3 и планка 7 выполняются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Эта сталь немагнитная, однако, образующиеся в результате трения микрочастицы износа обладают магнитными свойствами и удерживаются кольцевыми магнитами 6, 10 и лотком 17.

Применение модуля для загрузки испарителей [103] в вакуумном технологическом оборудовании позволяет исключить попадание загрязняющих микрочастиц в распыляемое вещество и повысить выход годных изделий.

На рис.4.4.2 представлен виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования.

Виброгаситель содержит электромагнит 1, жестко связанный с демпфируемым объектом 2. Между полюсами 3, 4 электромагнита 1 установлена масса, выполненная в виде постоянного магнита 5. Полюсы 6, 7 постоянного магнита 5 и полюсы 3, 4 электромагнита 1 связаны между собой посредством упругих элементов – пружин сжатия 8, 9.

Под действием приложенного возмущения демпфируемый объект 2 совершает одномерные колебания. Для их гашения на электромагнит 1 подается переменное напряжение с круговой частотой ω равной частоте ω_0 возмущающей силы и со сдвигом фаз на 180° . При этом постоянный магнит 5 начинает совершать одномерные колебания с круговой частотой ω

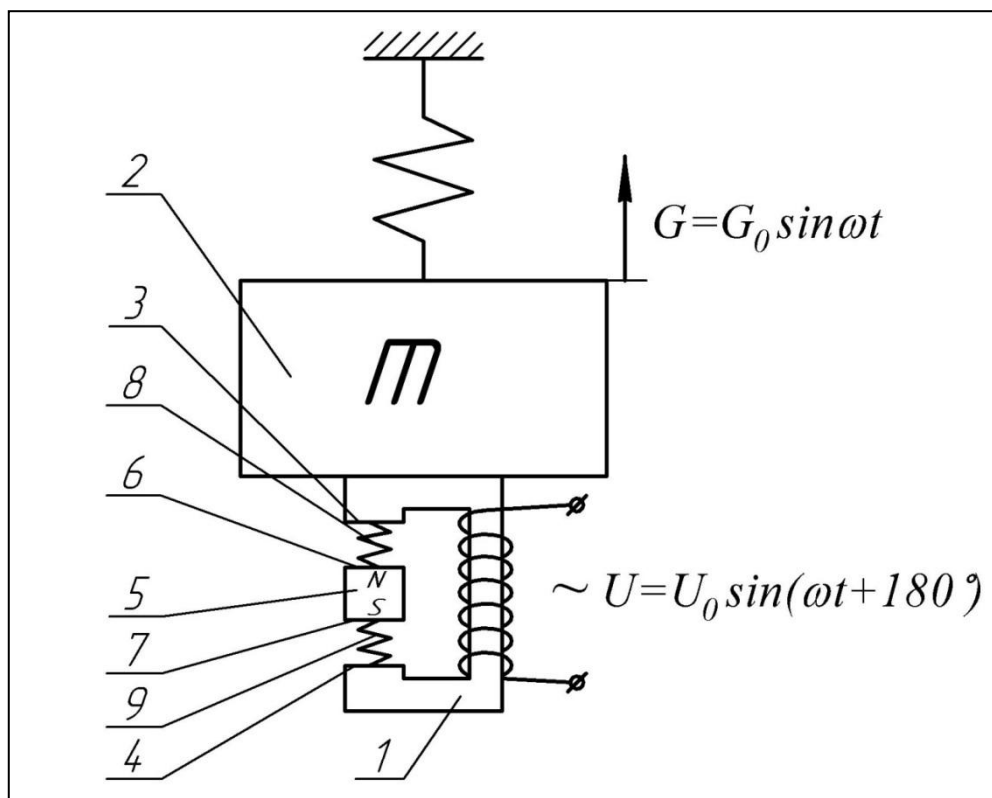


Рис.4.4.2. Виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования

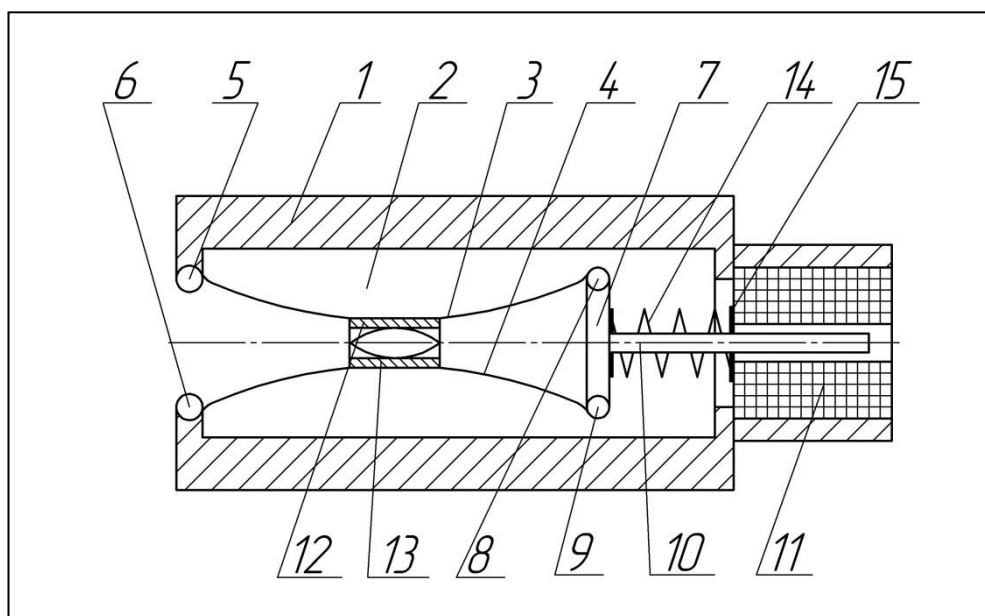


Рис.4.4.3. Схват манипулятора на основе привода с магнитным взаимодействием для работы в чистых технологических средах

равной частоте ω_0 – возмущающей силы и со сдвигом фаз на 180° по отношению к возмущению, приложенному к демпфируемому объекту 2, что приводит к гашению его колебаний. В качестве источника переменного напряжения используется генератор стандартных сигналов ГЗ-28 с фазосдвигающей схемой.

Наибольшую эффективность виброгаситель имеет на резонансных частотах колебаний постоянного магнита 5. Для повышения эффективности гашения колебаний на дорезонансных и послерезонансных частотах следует повышать амплитудное значение подающего напряжения U_0 . Разработка защищена Патентом Российской Федерации [104].

Применение предлагаемого виброгасителя позволяет расширить диапазон частот гасимых колебаний при настройке частоты гасителя на колебания демпфируемого объекта. При этом виброгаситель является экологически «чистым», так как в конструкции отсутствуют узлы внешнего трения и не происходит выделения загрязняющих микрочастиц износа. Это позволяет использовать предлагаемое устройство в прецизионно-стерильном технологическом и аналитическом оборудовании.

Схват манипулятора на основе привода с магнитным взаимодействием для работы в чистых технологических средах представлен на рис.4.4.3.

Схват манипулятора содержит корпус 1 с полостью 2, гибкие упругие ленты 3, 4 расположенные внутри полости 2, закрепленные на корпусе 1 посредством шарниров 5, 6 и связанные с планкой 7 посредством шарниров 8, 9. Планка 7 жестко связана с сердечником 10 электромагнита 11, установленного на корпусе 1. Упругие ленты 3, 4 шарнирно закреплены в корпусе 1 и на планке 7 таким образом, что их кривизны имеют различные направления. Губки 12, 13 выполнены с возможностью захвата и закрепления объекта во взаимно перпендикулярных направлениях (захватываемый объект на рисунке условно не показан) и закреплены на упругих лентах 3, 4 в местах наибольших деформаций. Привод выполнен в виде электромаг-

нита 11 и сердечника 10, связанного с упругими лентами 3, 4. На сердечнике 10 установлена пружина сжатия 14 с возможностью взаимодействия с торцем 15 электромагнита 11 и планкой 7, жестко связанной с сердечником 10.

Схват манипулятора для работы в чистых технологических средах работает следующим образом.

В исходном состоянии губки 12, 13 всегда сжаты. При подаче напряжения на электромагнит 11 сердечник 10 перемещается внутрь электромагнита 11, преодолевая сопротивление пружины сжатия 14, и губки 12,13 разжимаются. Для закрепления объекта напряжение с электромагнита 11 снимается. Конструкция губок 12, 13 позволяет захватывать объект во взаимно перпендикулярных направлениях.

По данной разработке получено положительное решение на выдачу Патента Российской Федерации [105].

Применение предлагаемого схвата манипулятора для работы в чистых технологических средах повышает надёжность захвата и удержания объекта при строгой ориентации его относительно устройства. При этом схват является экологически «чистым», так как в его конструкции отсутствуют узлы внешнего трения и не происходит выделения загрязняющих микрочастиц износа в чистую технологическую среду.

При конструировании УБМВ следует сочетанием деталей из магнитно-мягких сталей и немагнитных сталей и сплавов обеспечивать необходимое замыкание магнитного потока и минимальные потоки рассеивания. Для этого расстояния по прямой между частями магнитопровода разноименной полярности должны быть не менее 10 величин полного воздушного зазора в магнитной цепи. Постоянные магниты должны быть установлены в немагнитные корпуса с возможностью намагничивания магнитов в сборе со всей системой.

Для обеспечения малых зазоров в конструкциях следует обеспечить достаточную жесткость деталей и надёжность шарикоподшипниковых узлов.

Разработан ряд функциональных устройств для вакуумного технологического и аналитического оборудования, в которых используется магнитное взаимодействие, защищенных Патентами Российской Федерации [106 ÷ 110].

Некоторые конструктивные особенности функциональных устройств с магнитным взаимодействием, не отраженные в монографии, опубликованы в работах [111 ÷ 124].

4.5. Направление дальнейших исследований

Описанные в монографии исследования позволили выявить не только высокие достоинства устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, но и некоторые их недостатки, связанные с конструктивными особенностями, которые ведут к нерациональному использованию достаточно дорогих высококоэрцитивных магнитов.

В силу конструктивных особенностей, соосные УБМВ, в сравнении с другими типами устройств имеют наибольшую величину рабочего зазора, следствием которого является невысокая нагрузочная способность на ведомом элементе устройства.

Значительное повышение нагрузочной способности различных вакуумных УБМВ достигается установкой магнитов как на ведущем, так и на ведомом элементах устройства.

В несоосных УБМВ, уменьшение их габаритных размеров возможно при использовании радиально намагниченных ведущего и ведомого элементов устройства.

В свою очередь, магниты и намагниченные элементы УБМВ являются естественными ловушками генерируемых микрочастиц (привносимых загрязнений).

Ловушки, построенные на основе магнитного взаимодействия, целесообразно встраивать в функциональные системы и устройства вакуумного технологического и аналитического оборудования, в том числе, в шлюзовые и транспортные системы, стандартные механические интерфейсы, передающие и прецизионные манипуляторы, затворы и клапаны, вводы движения, а также в устройства элементной базы газовых систем оборудования.

Одним из перспективных направлений дальнейших работ по рассматриваемой тематике является разработка и исследование высокоэкологичных, виброзащищенных и экранированных функциональных (в том числе и многофункциональных) систем и модулей, построенных на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для модернизации и создания нового вакуумного оборудования высоких технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее.

Анализ современного вакуумного технологического и аналитического оборудования высоких технологий показал, что для повышения его производительности и выхода годных выпускаемых изделий необходимо создание высоконадежных, долговечных и высокоэкологических функциональных внутрикамерных устройств, обеспечивающих: критический размер образующихся микрочастиц от 0,005 до 1 мкм, газовыделение не более $10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$, частоту вращения от 0 до 10^4 об/мин; осевую нагрузку от 0,1 до 50 кН; наработку на отказ не менее 400 часов и выдержку обезгаживающего прогрева. Рациональными, с этой точки зрения, являются функциональные устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Проведённый анализ показал, что из возможных вариантов построения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного технологического и аналитического оборудования, практически реализуемыми являются более 70 конструкций. Предложена классификация устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного оборудования, построенная на основе реализованных и перспективных технических решений.

Магнитные свойства микрочастиц износа, выделяемых из немагнитных материалов, целесообразно использовать для их локализации и создания рациональных конструкций внутрикамерных устройств вакуумного технологического и аналитического оборудования.

Установлено, что концентрация магнитных микрочастиц, выделяемых из опорных узлов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, на полюсах магнитной системы ведёт к уменьшению рабочего зазора в системе, возрастанию магнитной проводимости и повышению пере-

даваемого усилия на $5 \div 7$ %. При этом полюса магнитной системы являются естественными ловушками генерируемых магнитных микрочастиц.

Установлено, что при скоростях скольжения во фрикционном контакте опорных узлов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием до 1 м/с и давлении в вакуумной камере выше 10^{-3} Па, интенсивность изнашивания не влияет на газовый поток. Получено выражение, позволяющее определить максимальную интенсивность изнашивания во фрикционном контакте опорного узла устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием, при которой газовый поток из зоны трения равен нулю.

Экспериментально установлено, что пескоструйная обработка герметизирующей тонкостенной оболочки устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием позволяет уменьшить её газопроницаемость не менее чем в 7 раз.

Применение предложенных внутрикамерных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием в бескорпусном исполнении позволяет в $4 \div 5$ раз уменьшить газовыделение с их поверхностей.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчёта устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, позволяющая выполнять проектный и поверочный расчеты конструкций с минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную технологическую среду.

Представлены разработанные функциональные устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную технологическую среду высокоэкологичного оборудования высоких технологий, 7 из которых защищены Патентами Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова, А.Т. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т.2 / А.Т. Александрова, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – 427 с.
2. Васин, В.А. Создание сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // XXI Международная науч.-тех. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тезисы докладов. – М.: ФГУП НПО «Орион», 2010. – С.225-226.
3. Васин, В.А. Создание сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Прикладная физика. – 2010. – № 5. – С.122-126.
4. Александрова, А.Т. Вакуумная механика в электронном машиностроении: Монография / А.Т. Александрова, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – М.: МИЭМ, 2009. – 145 с.
5. <http://www.analog.com>
6. Александрова, А.Т. Теоретические основы расчета и конструирования функциональных устройств и систем оборудования высоких вакуумных технологий на основе приводов управляемой упругой деформации: Учебное пособие. – М.: МИЭМ, 2003. – 48 с.
7. Nevshupa, R.A. Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms / R.A. Nevshupa etc. – Dordrecht: Springer, 2009. – 234 p.
8. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов по спец. «Вакуумная техника». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.
9. <http://www.semiteq.ru>
10. <http://www.highvolteng.com>

11. Быков, В.А. Разработка и освоение производства приборов и оборудования для нанотехнологии // Российские нанотехнологии. – 2007. – № 1-2. Т. 2. – С.32-36.

12. <http://www.sdbireras.ru>

13. Моряков, О.С. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн. Кн.7. Элионная обработка: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – С.88-89.

14. Ковалев, Л.К. Вакуумное оборудование тонкоплёночной технологии производства изделий электронной техники: Учебник для студентов спец. «Электронное машиностроение» в 2-х томах. Т.2 / Л.К. Ковалев, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – Красноярск: Краснояр. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1996. – 416 с.

15. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1987. – С.295-298.

16. Панфилов, Ю.В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под. общ. ред. Ю.В. Панфилова, 2000. – С.401-402.

17. Фролов, А.И. Повышение герметичности и надежности вводов движения на основе магнитной жидкости для высоковакуумного технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.07 / Фролов Александр Иванович. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1986. – С.12-14.

18. <http://www.izovac.com>

19. Степанчиков, С.В. Вакуумно-космическое оборудование для производства материалов и элементов изделий электронной техники. – М.: МИЭМ, 2008. – С.24-25.

20. Бармин, И.В. Оборудование космического производства / И.В. Бармин, Е.И. Горюнов, А.В. Егоров и др.; Под. общ. ред. В.П. Бармина. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
21. Демихов, К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – С.226.
22. А.с. 1113869 СССР. Магнитная муфта-редуктор / Г.К. Антонова, Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов // Оpubл. 15.09.84, Бюл. №34.
23. Медников, М.И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – С.20-25.
24. Физико-аналитическое и спецтехнологическое оборудование: Каталог / Под научн. ред. докт. физ.-мат. наук О.Д. Протопопова. – М.: Издательство ЦНИИ «Электроника», 1988. – 80 с.
25. Синодеев, И.В. Разработка и исследование механизмов поступательного движения на базе планетарных винтовых передач с внешним сопряжением для вакуумного технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.12 / Синодеев Игорь Вячеславович. – Владимир: ВПИ, 1984. – С.189-192.
26. Панфилов, Ю.В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под. общ. ред. Ю.В. Панфилова, 2000. – С.290-291.
27. Демихов, К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – С.222-223.

28. Фролов, Е.С. Механические вакуумные насосы / Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1989. – С.273.
29. Альтман, А.Б. Постоянные магниты: Справочник/ А.Б. Альтман, А.Г. Герберг, А.П. Гладышев и др.; Под. общ. ред. Ю.М. Пятина. – М.: «Энергия», 1980. – 488с.
30. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
31. Балагуров, В.А. Перспективы применения постоянных магнитов в электрических машинах // Труды МЭИ. – М.: МЭИ, 1980. – №483. – С.3-8.
32. Магниты из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом. – М.: Metallurgia, 1978. – 342 с.
33. Линецкий, Я.Л. Перспективы развития материалов для постоянных магнитов /Я.Л. Линецкий, В.В. Сергеев // Электротехника. – 1985. – №2. – С.27-30.
34. Сергеев, В.В. Магнитотвердые материалы / В.В. Сергеев, Т.И. Булыгина – М.: «Энергия», 1980. – 224 с.
35. Безрученко, В.А. Электрические машины с постоянными магнитами / В.А. Безрученко, Ф.Ф. Галтеев // Итоги науки и техники: Серия «Электрические машины и трансформаторы». – М., 1982, Том 5. – 114 с.
36. Дерягин, А.В. Редкоземельные магниты // Успехи физических наук. – М., 1976. Том 120, вып.3. – С.393-437.
37. Ганзбург, Л.Б. Проектирование магнитных и электромагнитных механизмов: Справочник / Л.Б. Ганзбург, А.И. Федотов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 364 с.
38. Вейц, В.Л. Электромеханические приводы с бесконтактными магнитными механизмами / В.Л. Вейц, П.Ф. Вербовой, Л.Б. Ганзбург, Б.Н. Куценко. – Киев: Ин-т электродинамики АН УССР (Препр.), 1991. – 56 с.

39. Кузнецов, П.С. Классификация устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для вакуумного оборудования радиоэлектронной промышленности / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2011» / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011, часть 4. – С. 229-231.
40. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей/ К. Бинс, П. Лауренс. – М.: Энергия. – 1970. – 376 с.
41. Даревский А.И., Кухаркин Е.С. Теоретические основы электротехники, часть II. / А.И. Даревский, Е.С. Кухаркин. – М.: Высшая школа, 1965, 283 с.
42. Ганзбург Л.Б. Механизмы с магнитной связью. / Л.Б. Ганзбург, Н.П. Глуханов, Е.Д. Рейфе, А.И. Фетодов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1973. – 272 с.
43. Свешников А.Г., Тихонов А.Н. Теория функций комплексной переменной. / А.Г. Свешников, А.Н. Тихонов. – М.: Наука, 1967. -304с.
44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010616041 Российская Федерация. Расчет магнитных вводов вращения в вакуумное технологическое оборудование на привносимые загрязнения / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2010614369; заявл. 20.07.2010; зарег. 14.09.2010.
45. Келим, Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2004. – 352 с.
46. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под ред. И.П. Копылова. 3-е изд. испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.

47. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред (Теоретическая физика, т. VIII) / Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М: Физматлит, 2005. – 656 с.
48. Антонова, Г.К. Расчет герметичного магнитного ввода поступательного перемещения / Г.К. Антонова, М.И. Некрасов, Т.А. Федупина // МРС ВИМИ «Техника, технология, экономика»: Сборник статей. 1984. Сер. Ц.
49. Александрова, А.Т. Механика и физика точных вакуумных механизмов: Монография в 2-х томах. Т.2. / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. Под ред. Е.А. Деулина. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана; НПК «Интелвак»; Вакууммаш, 2002. – 152 с.
50. Ивашов, Е.Н. Модели трения, изнашивания и газовыделения для вакуумного машиностроения // Вестник машиностроения. – 1990. – № 12. – С. 17-20.
51. Степанчиков, С.В. Газовыделение из узлов трения вакуумных манипуляторов / С.В. Степанчиков, И.В. Токарев // Автоматизированные станочные системы и роботизация производства: Сборник научных трудов. – Тула: ТулПИ, 1991. – С.174-178.
52. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 207 с.
53. Кузнецов, П.С. Расчет газовыделения из узлов трения механических систем, работающих в вакууме / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Механизмы оборудования для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники: монография / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2010. – Гл.7. – С.138-141.
54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011613698 Российская Федерация. Расчет газовыделения из внутрикамерных устройств с магнитным взаимодействием вакуумного техноло-

гического оборудования / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2011611984; заявл. 24.03.2011; зарег. 12.05.2011.

55. Международный стандарт ISO ТК-4 «Подшипники качения. Расчёт и выбор».

56. Черменский, О.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог / О.Н. Черменский, Н.Н. Федотов. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

57. Гордин, П.В. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие / П.В. Гордин, Е.М. Росляков, В.И. Эвелеков. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 186 с.

58. Кузнецов, П.С. Расчет шарикоподшипников, работающих в вакууме / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Механизмы оборудования для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники: монография / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2010. – Гл.5. – С.122-129.

59. Арзамасов, В.Б. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов. 3-е изд., стер. / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 448 с.

60. РТМ 23-81. Расчёт размерных цепей с применением теории вероятности.

61. <http://www.sk mash.com>

62. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учебник / Е.С. Вентцель. 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.

63. Детали машин / Под. ред. О.А. Ряховского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 520 с.

64. Morgan, D. The Design and Asses Sment of an Industrial Robot for use in Micro-Electronic Manufacturing Facilites / D. Morgan // The Industrial

Robot, 1985. vol.12, №6. – P.45-76.

65. Бут, Д.И. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1989. – С.9.

66. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т.1. / Под общ. ред. И.П. Копылов и Б.К. Клокова. – М: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

67. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т.2. / Под общ. ред. И.П. Копылов и Б.К. Клокова. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

68. Mehta, V.K. Principles of Electrical Machines / V.K. Mehta, Rohit Mehta // S Chand & Co Ltd, 2006. – 317 p.

69. Fitzgerald, A.E. Electric Machinery, 6th edition / A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D.Umans // McGraw Hill, 2003. – 703 p.

70. Кузнецов, П.С. Электрический микродвигатель для работы в чистых средах электронного производства / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XII международной конф. – Ульяновск: УлГУ, 2010. – С. 290.

71. Шанов, А.М. Уровни привносимой дефектности транспортеров систем типа ВТС и КТС / А.М. Шанов, Р.В. Щербачев, В.М. Чилидин, П.Э. Демб // «Чистота и микроклимат – 88»: Тез.докл. 2-ой науч.-техн. конф. – М.: МИЭТ, 1988. – С.55.

72. Арменский, Е.В. Электрические микромашины / Е.В. Арменский, Г.Б. Фалк – М.: Высшая школа, 1985. – 231 с.

73. Брусникин, Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брусникин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1981. – 432 с.

74. Biscoe, G. Actuators for robotic application / G. Biscoe, A. Milles // Measurement + Control, 1988, Vol.21, N 3. – P.76-79.

75. Развитие приводов для роботов / Автоматизация производства, гибкие производственные системы и робототехника // Заруб. опыт: Экспресс-информ. ВНИИТЭМР. вып. 15. – М., 1988. – С.43-47.

76. Macilwain, C. Robot quick-step cuts the cost of automation // The Industrial Robot. – 1988, Vol.14, N 1. – P.94-98.

77. Кузнецов, П.С. Выбор типа электродвигателя для приводов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2011» / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011, часть 4. – С. 234-236.

78. <http://bourabai.kz>

79. Александрова, А.Т. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т.1 / А.Т. Александрова, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – 462 с.

80. <http://www.niitm.ru>

81. Антонова, Г.К. Магнитные передачи в приводах оборудования ГАП / Г.К. Антонова, М.И. Некрасов // Пути повышения эффективности создания ГАП в приборостроении и микроэлектронике: Тез. докл. научно-техн. конф. – М.: МИЭТ, 1983. – С.64-65.

82. Александрова, А.Т. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т.1 / А.Т. Александрова, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – С.427-432.

83. Корис, Р. Справочник инженера-схемотехника / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. – М.: Техносфера, 2008. – 608 с.

84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011613697 Российская Федерация. Расчёт устройств с магнитным взаимодействием для вакуумных технологических комплексов электронной техники / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и

правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2011611983; заявл. 24.03.2011; зарег. 12.05.2011.

85. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011613699 Российская Федерация. Расчёт и выбор систем с магнитным взаимодействием для вакуумных аналитико-технологических приборов и оборудования / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2011611985; заявл. 24.03.2011; зарег. 12.05.2011.

86. Кузнецов, П.С. Исследование работоспособности устройств бесконтактного взаимодействия с магнитной связью при повышенных температурах в вакууме / П.С. Кузнецов. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ. – 2010. – С. 327.

87. Кузнецов, П.С. Особенности применения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием в современном сверхвысоковакуумном контрольно-диагностическом и технологическом оборудовании / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 2 (152). – С. 44-48.

88. Степанчиков, С.В. Дестабилизирующее воздействие механизмов на вакуумную технологическую среду // Современные вопросы механики и технологии машиностроения: Тез. докл. Всесоюзной конф. – М.: ВИНТИ АН СССР и ГКНТ, 1986. Ч.II. – С.107.

89. Кузнецов, П.С. Моделирование количества и размеров микрочастиц, генерируемых из вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием вакуумного оборудования электронной техники / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2011» / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011, часть 4. – С. 222-224.

90. Kuznetsov, P.S. Study microparticles, contactless device generates magnetic interactions in vacuum equipment production nanoelectronics / P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanshikov // Opto-, nanoelectronics, nanotechnology and microsystems: Papers XIII International Conference. – Ul.: UISU, 2011. – P. 448-449.

91. Кузнецов, П.С. Экспериментальные исследования размеров микрочастиц из вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2012» / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012, часть 1. – С. 160-162.

92. Кузнецов, П.С. Исследование и моделирование газовыделения из устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием в вакуумном оборудовании электронного производства / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2011» / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011, часть 4. – С. 219-221.

93. Kuznetsov, P.S. Study devices gas release from the contactless magnetic interaction for vacuum equipment production nanoelectronics / E.N. Ivashov, P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanshikov // Opto-, nanoelectronics, nanotechnology and microsystems: Papers XIII International Conference. – Ul.: UISU, 2011. – P. 450-451.

94. Кузнецов, П.С. Расчет основных параметров вакуумных вводов движения / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Механизмы оборудования для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники: монография / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2010. – Гл.3. – С.70-80.

95. Аверина, А.П. Масс-спектрометрия разреженных газов. Мето-

ды и аппаратура течеискания / А.П. Аверина, Л.Е. Левина. – М.: Машиностроение, 1977. – 48 с.

96. Владимиров, В.С. Уравнения математической физики. Учебник для вузов. 2-е изд. стереотип. / В.С. Владимиров, В.В. Жаринов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 400 с.

97. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2009614168 Российская Федерация. Расчет вакуумных передач с магнитным взаимодействием. / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2009612950; заявл. 16.06.2009; зарег. 10.08.2009.

98. Пат. на полезную модель 106463 Российская Федерация, МПК⁷ G02F 6/00. Магнитная муфта-редуктор для передачи вращения в герметизированный объём / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010151840/07; заявл. 17.12.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

99. Кузнецов, П.С. Системы приводов для работы в сверхчистой вакуумной технологической среде / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Приводная техника. – 2011. - № 1 (89). – С. 37-47.

100. Пат. на полезную модель 106326 Российская Федерация, МПК⁷ F16H 1/12. Магнитная зубчатая передача для работы в вакууме и чистых технологических средах (варианты) / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010151839/11; заявл. 17.12.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

101. Пат. на полезную модель 107308 Российская Федерация, МПК⁷ F16H 1/06. Зубчатая передача с магнитным бесконтактным взаимодействием зубьев для работы в вакууме / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2011109089/11; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.

102. Пат. на полезную модель 107309 Российская Федерация, МПК⁷ F16H 1/06. Зубчатая передача с магнитным взаимодействием зубьев / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2011109090/11; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.

103. Кузнецов, П.С. Модуль для загрузки испарителей в вакуумном оборудовании с магнитной системой локализации загрязняющих микро-частиц / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Опто-, нанoeлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XII международной конференции. – Ульяновск: УлГУ, 2010. – С. 291.

104. Пат. на полезную модель 106323 Российская Федерация, МПК⁷ F16F 6/00. Виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010151838/11; заявл. 17.12.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

105. Положительное решение на выдачу Патента Российской Федерации от 11.01.2012. Схват манипулятора для работы в чистых технологических средах / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель МИЭМ. Москва. – 2011141713/02; заявл. 14.10.2011.

106. Пат. на полезную модель 107307 Российская Федерация, МПК⁷ F16F 1/06. Магнитная зубчатая передача для вакуумного технологического оборудования (варианты) / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2011109088/11; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.

107. Пат. на полезную модель 104509 Российская Федерация, МПК⁷ B28B 1/29. Устройство для формирования нанодорожек / Е.Н. Ивашов, П.С. Костомаров, П.С. Кузнецов и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010146415/07; заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011. Бюл. № 14.

108. Пат. на полезную модель 106448 Российская Федерация, МПК⁷ H01L 41/00. Устройство перемещений / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010152784/28; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

109. Пат. на полезную модель 106467 Российская Федерация, МПК⁷ H02N 2/00. Система перемещений / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010152785/07; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

110. Пат. на полезную модель 106969 Российская Федерация, МПК⁷ G02F 6/00. Устройство формирования изображения на подложке / Е.Н. Ивашов, П.С. Костомаров, П.С. Кузнецов и др.; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва. – 2010146413/28; заявл. 15.11.2010; опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.

111. Кузнецов, П.С. Особенности расчетов герметичных магнитных муфт приводов аналитико-технологического оборудования с контролируемой вакуумной средой / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Приводная техника. – 2010. – № 4 (86). – С. 31-35.

112. Кузнецов, П.С. Расчёт трибозокологических параметров приводов вакуумного оборудования электронной техники / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Приводная техника. – 2010. – № 5 (87). – С. 28-32.

113. Кузнецов, П.С. Устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием для специального технологического оборудования / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Технология машиностроения. – 2011. – № 2 (104). – С. 47-51.

114. Кузнецов, П.С. Проектирование внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – №4. Т.16, – С. 49-55.

115. Кузнецов, П.С. Повышение надёжности внутрикамерных систем сверхвысоковакуумного аналитического и технологического оборудования / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Надёжность. – 2011. – № 01 (36). – С. 32-39.

116. Кузнецов, П.С. Расчёт трибозоологических параметров приводов вакуумного оборудования электронной техники / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Надёжность. – 2011. – № 02 (37). – С.40-48.

117. Кузнецов, П.С. Альтернативные транспортные средства для экологически совершенного вакуумного оборудования электронной техники / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Экология промышленного производства. – 2011. – № 4. – С. 69-74.

118. Кузнецов, П.С. Прецизионная высокоэкологичная герметичная передача для микромеханической системы перемещения в вакууме / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XI международной конференции. – Ульяновск: УлГУ, 2009. – С. 189.

119. Кузнецов, П.С. Исследование устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для сверхвысоковакуумного оборудования / П.С. Кузнецов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Матер. Международной науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2011» / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011, часть 4. – С. 232-233.

120. Kuznetsov, P.S. Study performance devices contactless magnetic interaction working in vacuum equipment production warmed elements of nanoelectronics and micromechanics / P.S. Kuznetsov // Opto-, nanoelectronics, nanotechnology and microsystems: Papers XIII International Conference. – Ul.: UISU, 2011. – P. 452-453.

121. Kuznetsov, P.S. Application of devices of contactless magnetic interaction in vacuum modules of the special equipment / E.N. Ivashov, P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanshikov // Sixth International Aerospace Congress IAC' 09: Abstracts. – Jubileyny, M.r.: A. Khoruzhevsky – P. 106.

122. Kuznetsov, P.S. Features of designing of special vacuum mechanical systems of the scientific space equipment / E.N. Ivashov, P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanshikov // Sixth International Aerospace Congress IAC' 09: Abstracts. – Jubileyny, M.r.: A. Khoruzhevsky – P. 156.

123. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010616042 Российская Федерация. Расчет магнитных вводов поступательного движения в вакуумное технологическое оборудование на привносимые загрязнения / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2010614370; заявл. 20.07.2010; зарег. 14.09.2010.

124. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010616058 Российская Федерация. Расчет устройств формирования поступательного движения в вакуумном технологическом оборудовании на привносимые загрязнения / Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков; заявитель и правообладатель МИЭМ. Москва. – № 2010614371; заявл. 20.07.2010; зарег. 14.09.2010.

125. Криштал, М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. Под общ. ред. М.М. Криштала. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.

126. Зайтов, Л.М. Подшипники качения герметичных волновых передач / Л.М. Зайтов, М.И. Некрасов, А.И. Мельников // Подшипниковая промышленность. – М., 1983, №11. – С.3-7.

127. Чихос, Х. Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. – 352с.

Научное издание

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

МОНОГРАФИЯ 6

ВАСИН Владимир Анатольевич
ИВАШОВ Евгений Николаевич
КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич
СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Редактор **И. С. Кравчук**

Технический редактор **П. С. Костомаров**

Рисунок на обложке выполнен художником **Н.Г. Фатьяновой**

Подписано в печать 17.03.2013. Формат 60x84/16.

Бумага типографская. Печать – ризография.

Усл. печ. л. 10,8. Уч.-изд. л. 11,1. Тираж 300 экз.

Заказ 2 Изд. № 3

Издательство НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

Отпечатано в НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ МОНОГРАФИИ

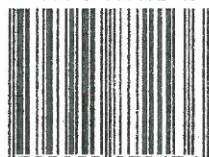
ВАСИН Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент.
Доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета имени К.Э. Циолковского

ИВАШОВ Евгений Николаевич, д.т.н., профессор.
Профессор кафедры «Электроника и микроэлектроника» МИЭМ НИУ ВШЭ

КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич, к.т.н.
Инженер-конструктор II категории ОАО «ГосНИИП»

СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович, к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник.
Доцент кафедры «Электроника и микроэлектроника» МИЭМ НИУ ВШЭ

ISBN 978-5-905872-13-6



9 785905 872136