

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Львов Б.Г., Ветров В.А.

Московский институт электроники и математики
115054, г. Москва, ул. Малая Пионерская, д. 12-18/4-6, стр. 1 Кафедра ТСЭ, E-mail: bgl@miem.edu.ru

В статье приводится аналитический обзор современных миниатюрных высоковакуумных и форвакуумных насосов. Рассматриваются принципы действия и конструктивные схемы миниатюрных насосов, выявляются их достоинства и недостатки, дается сравнительный анализ видов насосов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, используя новые достижения научно-технического прогресса, ведутся исследовательские работы, направленные на миниатюризацию дорогостоящего и уникального технологического и контрольно-аналитического оборудования, что позволяет осуществить его кардинальное удешевление и расширение сферы применения.

Например, применение технологий микроэлектроники и современных материалов позволяет иметь стоимость, массогабаритные характеристики и энергопотребление масс-спектрометров, газовых хроматографов, растровых электронных микроскопов, установок литографии и другого оборудования на порядок меньшие по сравнению с традиционным исполнением. В этом направлении в настоящее время работают ведущие зарубежные фирмы и научные центры: JEOL Ltd., Fujitsu Labs. Ltd. (Япония); IBM Research, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California (США); Deutsche Telekom Forshungs und Technologiezentrum, ICT GmbH, Applied Materials / Integrated Circuit Testing GmbH (Германия); Munro's Electron Beam Software Ltd. (Великобритания) и др.

Вместе с ключевыми элементами приборов и оборудования миниатюризации подвергаются также обслуживающие их системы, такие как системы питания, контроля, управления, вакуумные системы и др. Данная работа посвящена вопросам современного состояния миниатюрных вакуумных насосов.

Помимо перечисленного оборудования миниатюрная вакуумная техника имеет широкие перспективы применения в медицине, пищевой промышленности, образовании, экологии, сфере государственной безопасности и др.

Для определения термина «миниатюрный насос» предлагается следующая классификация вакуумных насосов по признаку «габаритные размеры», представленная в табл. 1.

МИНИАТЮРНЫЕ ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Миниатюризация высоковакуумных насосов успешно осуществляется на основе турбомолекулярных, магниторазрядных, геттерных и ионно-геттерных насосов.

Среди всех миниатюрных насосов наиболее полно реализованы турбомолекулярные (ТМН). Лидеры мирового рынка ТМН, компании Alcatel Vacuum Technology и Pfeiffer Vacuum, осуществляют серийный выпуск миниатюрных насосов [1,2]. Ряд моделей Varian, Inc. и Leybold Vacuum по своим массогабаритным характеристикам приближается к миниатюрным [3, 4]. Более высокого уровня миниатюризации удалось достичь малым предприятиям Create, Inc. и Phoenix Analysis and Design Technology (PADT) [5,6,7]. Снижение габаритов и энергопотребления ТМН этих компаний влечет за собой значительное уменьшение скорости действия.

В табл. 2 приведены характеристики миниатюрных ТМН различных фирм. Приведенные здесь и далее обозначения:

Таблица 1.

Классификация вакуумных насосов

| Класс насоса | Диапазон габаритных размеров, мм |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Макронасос (традиционный) | >150 |
| Миниатюрный насос (мининасос) | 5 – 150 |
| Сверхминиатюрный насос | $10^{-1} – 5$ |
| Микронасос | $<10^{-1}$ |

Таблица 2.

Характеристики миниатюрных ТМН

| Производитель | Марка | D_y , мм | Q , л/с | $P_{пред}$, Па | Габариты, мм | m , кг | W , Вт |
|---------------|---------------|------------|-----------|---------------------|-------------------|----------|----------|
| Alcatel | ATH 31 | 40 | 26 | 10^{-8} | Ø97×85 Ø97×113 | 1,2 | 15 |
| | ATH 31+ | 63 | 30 | 10^{-9} | | | |
| | ATH 31 C | | | | | | |
| Pfeiffer | TPD 011 | 25 | 10 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 168×55×55 | 2 | 100 |
| Varian | Turbo-V 70 | 40 | 46 | 10^{-9} | - | 1,6 | 75 |
| | | 63 | 68 | | Ø95×134 | | |
| | Turbo-V 70 LP | 40 | 46 | $5 \cdot 10^{-10}$ | - | 1,7 | |
| | | 63 | 68 | | Ø95×149 | | |
| | Turbo-V 70 D | 40 | 40 | 10^{-9} | - | 1,6 | |
| | | 63 | 60 | | Ø95×134 | | |
| Leybold | Turbovac 50 | 40 | 33 | $5 \cdot 10^{-8}$ | Ø93×166 | 2 | 45 |
| | | 63 | 55 | | Ø93×157,5 | | |
| Creare | Creare | - | 4,5 | - | Ø50×110 | 0,4 | 1 |
| PADT | - * | - | 10 | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | Ø50×75 | 0,2 | 5 |

* – в стадии разработки

D_y – диаметр условного прохода; Q – быстрота действия по воздуху; $P_{пред}$ – предельное остаточное давление; m – масса; W – потребляемая мощность.

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

традиционных насосов, пространственное расположение миниатюрных ТМН произвольно из-за малой инерции ротора.

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

Турбомолекулярные насосы практически достигли своего геометрического предела, обусловленного принципами откачки, и их дальнейшая миниатюризация маловероятна.

Таблица 3.

Характеристики миниатюрных магниторазрядных насосов с разрядом Пеннинга

| Производитель | Марка | Q , л/с | $P_{пред}$, Па | Габариты, мм | m , кг | W , Вт |
|----------------------|--------------|-----------|---------------------|---------------|----------|----------|
| Varian | Vaclon Mini | 0,4 | 10^{-5} | 63×54×54 | 1 | 1,2 |
| | Vaclon 2 l/s | 2 | | 112×46×60 | 1,8 | |
| | Vaclon 8 l/s | 8 | 10^{-6} | 206×77×170 | 8,6 | |
| Thermionics | AIP-0,2T | 0,2 | 10^{-9} | 93,7×63,5×35 | - | - |
| | AIP-2/133 | 2 | | 152,5×75×96,9 | | |
| Physical Electronics | TiTan3S | 3 | 10^{-9} | 108×45×45 | 3,5 | - |
| | TiTan12S | 12 | | 190×113×107 | 8 | - |
| Heat Wave Labs | AVT Mini | 0,5 | - | - | - | - |
| | AVT 2 l/s | 2 | - | - | - | - |
| Электроприбор | - * | 0,08 | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 10×32×12 | - | - |

* – в стадии разработки

Таблица 4.

Характеристики миниатюрных геттерных насосов на основе НГ

| Производитель | Марка | Материал геттера | $Q_{со}$, л/с | Габариты, мм | m , кг | $S_{со}$, л·Па· 10^{-3} |
|---------------|--------------------|------------------|----------------|--------------|---------------------|----------------------------|
| SAES Getters | SapaciTorr B 200 | TiV | 200 | ∅70×201 | $4,8 \cdot 10^{-2}$ | 57,2 |
| | SapaciTorr D 400-2 | ZrVFe | 180 | ∅70×204 | $4,5 \cdot 10^{-2}$ | 53,2 |
| | GP 50 St 101 | TiV + константан | 110 | ∅70×172 | $2,4 \cdot 10^{-2}$ | 28,6 |
| | GP 50 St 707 | | 100 | ∅70×172 | $3,2 \cdot 10^{-2}$ | 38,6 |
| | GP 100 St 707 | | 300 | ∅114×218 | 10^{-1} | 119,7 |

Миниатюрные магниторазрядные насосы с разрядом Пеннинга были созданы рядом компаний и научных групп, включая Varian, Inc., Thermionics, Physical Electronics, Inc., Heat Wave Labs., Inc. и ЦНИИ «Электроприбор» (Санкт-Петербург) [8,9,10,11,12]. Еще две лаборатории, Duniway Stockroom Corp. и Jet Propulsion Laboratory (JPL), в своих разработках приближаются к миниатюрным размерам.

Как и в ТМН, в миниатюрных магниторазрядных насосах используются те же конструктивные и физические принципы, что и на макроуровне, что облегчает их миниатюризацию. Этот вид высоковакуумных насосов хорошо изучен и апробирован в различных областях применения. В табл. 3

представлены характеристики миниатюрных магниторазрядных насосов с разрядом Пеннинга различных фирм.

Одним из главных ограничений использования магниторазрядных насосов стандартной диодной конфигурации является низкая быстрота действия по инертным газам. Для их откачки один из титановых катодов заменяют танталовым, что увеличивает стоимость насоса. Такие насосы носят названия «Differential Ion» и «Noble Diode». Другим решением проблемы является использование катодов различной конфигурации [13].

Выбор магнитных материалов определяет массогабаритные и стоимостные характеристики насосов. Наряду с ферритами и

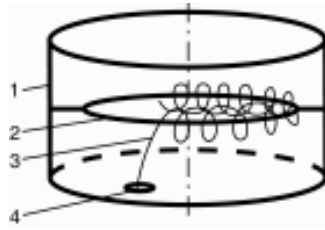


Рис. 1. Конфигурация орбитрона JPL: 1 – корпус с геттерным покрытием; 2 – анод; 3 – траектория движения электронов; 4 – источник электронов

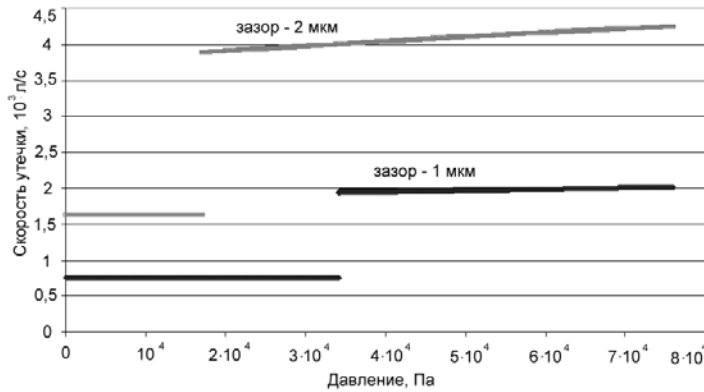


Рис. 2. Зависимость скорости утечки от давления на входе спирального насоса JPL

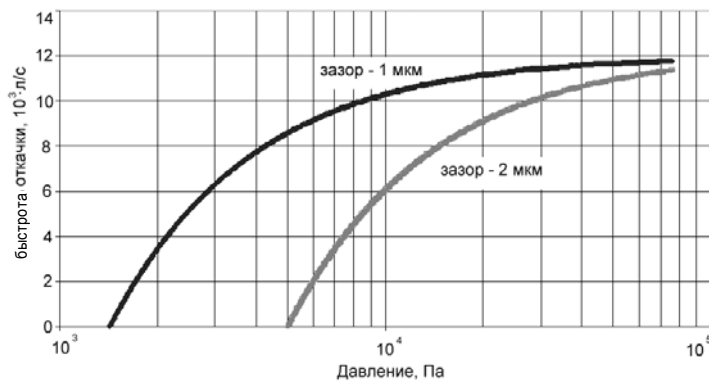


Рис. 3. Зависимость быстроты откачки от давления на входе спирального насоса JPL

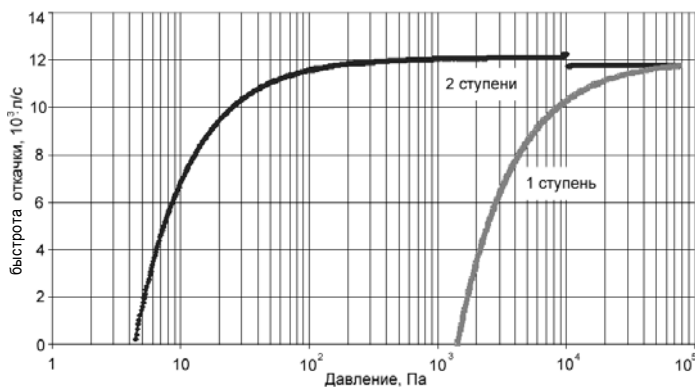


Рис. 4. Зависимость быстроты откачки от давления на входе для одно- и двухступенчатой компоновок спирального насоса JPL

алнико 5, применяются дорогостоящие самарий-кобальтовые магниты и магниты из NdFeB.

Другими проблемами проектирования миниатюрных магниторазрядных насосов являются обеспечение однородности магнитного поля и достаточной проводимости анодных ячеек, ограничение по высоковольтному пробую и иницирование запуска.

НИИ «Исток» (Фрязино) разработана серия миниатюрных магниторазрядных насосов полумagnetронного типа со скоростями откачки 0,5; 1; 2 л/с с максимальным объемом корпуса 43 см³ [14].

Использование новаторской конструкции круглого анода ионно-геттерного насоса орбитронного типа (рис. 1), предложенной California Institute of Technology (Caltech) в лице лаборатории JPL, позволяет свести габариты насоса к миллиметровым размерам [15].

Как и в традиционном насосе, электроны под воздействием положительного потенциала анода закручиваются вокруг него. В предлагаемой конфигурации с заменой традиционного анода-стержня кольцевым проволочным анодом 2 не требуется отражения электронов от торцов корпуса 1 и, как следствие, приложения отрицательного потенциала к ним. Характеристики, которые можно достичь с помощью кольцевой конфигурации орбитрона, пока не оценены.

Хорошо поддаются масштабированию геттерные насосы на основе нераспыляемых геттеров (НГ), конструкции которых достаточно исследованы и отработаны. Мировой лидер в производстве геттерных насосов на основе НГ SAES Getters предлагает насосы, массогабаритные характеристики которых стоят на пороге диапазона миниатюрных насосов [16].

Таблица 5.

Сравнительная характеристика видов миниатюрных высоковакуумных насосов

| Вид насоса | Q , л/с | $P_{\text{пред}}$, Па | Линейный размер, мм | m , кг | W , Вт |
|------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------|----------|------------|
| Турбомолекулярный | 5 – 70 | $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-10}$ | 50 – 150 | 0,2 – 2 | 1 – 100 |
| Магнитоэридный | | | | | |
| с разрядом Пеннинга | 0,1 – 10 | $10^{-4} - 10^{-9}$ | 10 – 150 | 1 – 10 | 1 – 5 |
| с магнетронным разрядом | 0,5 – 2 | - | - | - | - |
| Ионно-геттерный орбитронный* | - | - | - | - | - |
| Геттерный на основе НГ | 50 – 300 | $10^{-8} - 10^{-10}$ | 50 – 150 | 0,5 – 2 | 100 – 1000 |

* – в стадии разработки

Таблица 6.

Сравнение результатов моделирования разноступенчатых компоновок спирального насоса JPL

| Компоновка | 1 ступень | 2 ступени | 3 ступени |
|------------------------------------|--------------------|-----------|-------------------|
| Быстрота действия, л/с | $12 \cdot 10^{-3}$ | | |
| Предельное остаточное давление, Па | $1,5 \cdot 10^3$ | 4,4 | $7 \cdot 10^{-1}$ |
| Энергопотребление, Вт | 2,5 | 4,8 | 7,2 |

Диапазон функционирования геттерных насосов составляет $10^{-1} - 10^{-10}$ Па. Главным элементом является, как правило, сменный титан-ванадиевый картридж, от геометрической формы, пористости и состава поверхностного слоя которого зависит быстрота откачки насоса.

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

Как видно из табл. 4 насосы на основе НГ еще нельзя в полной мере назвать миниатюрными, однако потенциал их масштабирования очевиден: факторов ограничивающих их миниатюризацию на данный момент нет. Обозначения: Q_{CO} – быстрота действия по СО; m_T – масса геттера; S_{CO} – сорбционная емкость по СО.

В табл. 5 приведена сравнительная характеристика видов миниатюрных высоковакуумных насосов. Данные по каждому параметру даются в виде диапазона значений и представляют собой экспертную оценку. Параметры, по которым экспертная оценка на данный момент невозможна, отмечены прочерком.

МИНИАТЮРНЫЕ ФОРВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

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

Среди возможных принципов форвакуумной откачки предлагаются «сухие» спиральные насосы, работающие за счет относительного вращательного движения обращенных друг к другу спиралей Архимеда, одна из которых неподвижна. Принцип действия спирального насоса следующий. Газ захватывается периферийной частью спирали; при движении спиралей относительно друг друга он перемещается к центру спирали, непрерывно сжимаясь. Цикл откачки завершается при достижении

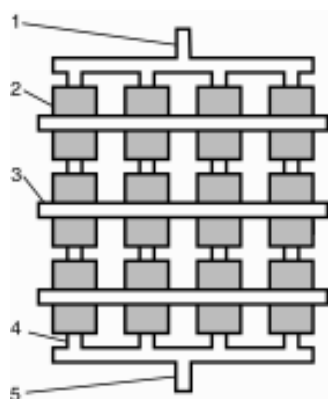


Рис. 5. Структурная схема перистальтического насоса JPL с пневматическим приводом: 1 – входное отверстие; 2 – камера блокирования; 3 – пневмоканал; 4 – откачной канал; 5 – выходное отверстие

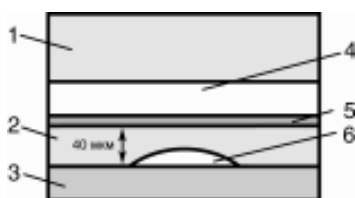


Рис. 6. Поперечное сечение камеры блокирования: 1 – верхний слой резины; 2 – нижний слой резины; 3 – подложка; 4 – пневмоканал; 5 – герметизирующий материал; 6 – откачной канал

газом центра, где он удаляется через выходное отверстие.

В настоящее время ведется разработка такого вида насоса в ряде государственных лабораторий США, а также University of Southern California (USC) и JPL, занимающихся моделированием работы насоса [17].

Недостатками этих насосов являются высокая точность изготовления и сборки, наличие подвижных частей, быстрый износ, утечка и необходимость создания компактного привода. Влияние точности изготовления на характеристики насоса приведено на рис.2 и 3 [17]. Данные приведены для двух значений зазоров между поверхностями спиралей. Производство спиралей возможно с помощью микротехнологии LIGA, которая заключается в формировании объемных структур с использованием синхротронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимерами.

Спиральные насосы составляют из набора спиральных ячеек для увеличения

коэффициента сжатия и, как следствие, снижения предельного остаточного давления. USC и JPL было проведено моделирование работы спиральных насосов состоящих из разного числа ячеек, результаты которого приведены в табл. 6. Ячейки изготовлены на сапфировой основе, материал спирали – никель. Диаметр спирали, содержащей 2,5 витка, составляет около 6 мм; режим работы – 100 циклов откачки в секунду.

Как видно из табл. 6 и рис. 4 [17] практически во всем диапазоне давлений быстрота откачки постоянна и не зависит от числа ступеней.

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

Спиральные насосы не получили широкого распространения на макроуровне.

Благодаря микротехнологиям этот вид насосов, обладающий простым принципом действия и несложной конструкцией, может получить большую популярность на миниатюрном уровне.

Для миниатюризации форвакуумных насосов исследуются также «сухие» перистальтические насосы, принцип действия которых заключается в вытеснении объема при помощи перистальтической волны. Для создания волны используются три типа привода: пневматический, пьезоэлектрический и магнитный.

На рис.5 представлена структурная схема перистальтического насоса с пневматическим приводом, исследуемого JPL [18]. Насос содержит ряд откачных каналов 4, расположенных перпендикулярно нескольким пневмоканалам 3, взаимодействие между которыми осуществляется посредством камер блокирования 2.

Откачной канал 6 (рис.6) имеет поперечное сечение в форме арки и заключен между пластиковой подложкой 3 и нижним слоем силиконовой резины 2. Пневмоканал прямоугольного сечения 4 образован соединением верхнего слоя резины 1 и тонкого слоя герметизирующего материала 5, нанесенного на нижний слой резины (рис.7). В пневмоканал подается воздух в количестве достаточном для прогиба нижнего резинового слоя и смыкания его с подложкой, что приводит к блокированию откачного канала. Периодически подавая

воздух в соседние пневмоканалы с некоторым сдвигом фаз, можно создать перистальтическую волну, распространяющуюся вдоль откачных каналов и перемещающую воздух в их направлении.

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

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

JPL ведется разработка перистальтического насоса с пьезоприводом, принцип действия которого представлен на рис. 8 [19].

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

Пьезоэлектрические кольца делают трех-, четырех- и пятиволновыми. Количество волн, как и материал статора (нержавеющая сталь, алюминий, бронза), влияют на резонансную частоту, при которой амплитуда перистальтической волны, а следовательно, и скорость откачки, максимальна.

Вышеописанная структура заключается в корпус, ко входному и выходному отверстиям которого подводятся трубки. Был создан экспериментальный образец насоса, однако его испытание проводилось только для откачки воды.

Исследуются различные конструктивные схемы перистальтического насоса с

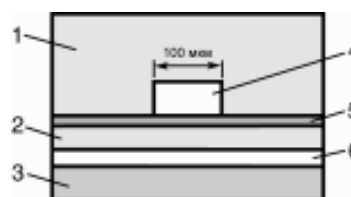


Рис. 7. Продольное сечение камеры блокирования: 1 — верхний слой резины; 2 — нижний слой резины; 3 — подложка; 4 — пневмоканал; 5 — герметизирующий материал; 6 — откачной канал

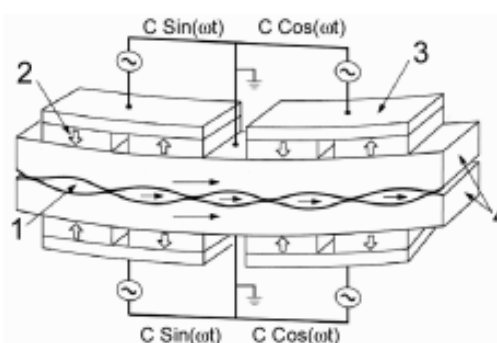


Рис. 8. Конструктивная схема перистальтического насоса JPL с пьезоприводом: 1 — откачивающая камера; 2 — пьезоэлектрическое кольцо; 3 — электрод; 4 — статоры

пьезоприводом, например, с прямолинейным распространением перистальтической волны [5].

Перистальтический насос с магнитным приводом разрабатывается в JPL [20]. Насос состоит из нескольких откачивающих камер, изготовленных из силиконовой резины с алюминиевым покрытием. Постоянные магниты установлены над откачивающими камерами и на вращающемся колесе, расположенном под камерами. Оценочные параметры насоса: масса ~ 0,2 кг, объем ~ $25 \times 50 \times 50$ мм, потребляемая энергия ~ 5 Вт, предельное остаточное давление — 10^{-1} Па.

Неоспоримыми преимуществами перистальтических насосов являются отсутствие масла, клапанов, малый мертвый объем, низкая себестоимость и простота технологии. К недостаткам этих насосов относятся низкая производительность и большая скорость утечки, что на данный момент не позволяет использовать их в качестве насосов поддержки для высоковакуумных насосов.

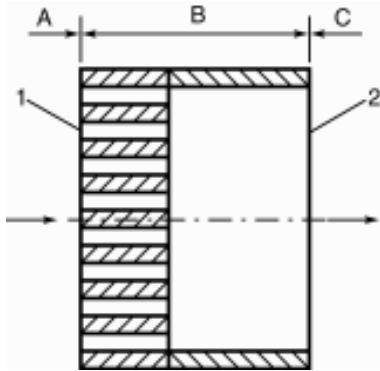


Рис. 9. Схема ступени насоса Кнудсена: А – ступень $i-1$; В – ступень i ; С – ступень $i+1$; 1 – капиллярная часть; 2 – соединительная часть

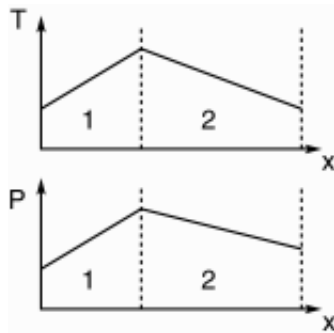


Рис. 10. Графики распределения температуры и давления по ступени насоса Кнудсена: 1 – капиллярная часть; 2 – соединительная часть

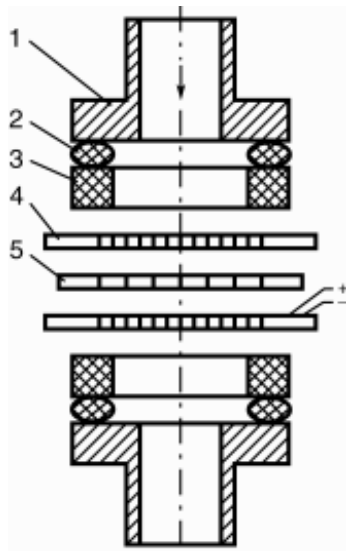


Рис. 11. Конструктивная схема одноступенчатого насоса Кнудсена USC: 1 – патрубок; 2 – уплотнение; 3 – соединительная часть; 4 – пластина с нагревателем; 5 – транспирационная мембрана

Весьма перспективными являются термические транспирационные насосы (насосы Кнудсена), исследование которых проводится в USC и JPL [21]. Отсутствие подвижных частей, масел и рабочих жидкостей, возможность применения технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) делают привлекательным использование насоса Кнудсена в качестве миниатюрного форвакуумного насоса.

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

Явление термической транспирации заключается в движении газа из холодного сосуда в горячий через соединяющий их капилляр. Ступень насоса Кнудсена (рис.9) состоит из капиллярной части 1 – транспирационной мембраны с таким диаметром пор, что газ находится в них в молекулярном режиме, и соединительной части 2, в которой газ присутствует в вязкостном режиме. Диаметр пор лежит в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Вдоль оси транспирационной мембраны создается температурный градиент (рис.10) и возникает поток газа от ее холодной стенки к горячей. В соединительной части температура снижается к исходному значению. Этот процесс повторяется на протяжении многих индивидуально нагреваемых ступеней, пока не будет достигнута нужная разность давлений. Разность давлений, получаемая на одной ступени, зависит от числа Кнудсена в капиллярной части.

USC была запатентована конструкция насоса Кнудсена (рис.11), в основе которой лежит использование кремниевого аэрогеля в качестве транспирационной мембраны 5, что позволяет увеличить число Кнудсена в капиллярах [22]. Для создания температурного градиента применяется кремниевая пластина 4 с тонкопленочным золотым нагревателем. Соединительная часть представляет собой кольцо из пирекса 3, а в качестве уплотнения используется

эпоксидная смола 2. Расчетные характеристики такого насоса, состоящего из 24 ступеней, представлены в табл. 7.

В настоящее время USC и JPL создали и проводят испытания одноступенчатого насоса Кнудсена, на основе которых планируется создание сорокаступенчатого насоса объемом не более 1 см^3 и потребляющего около 100 мВт.

В нашей стране исследование транспирационного насоса ведется в Центральном аэрогидродинамический институте им. проф. Н.Е. Жуковского (Жуковский) [23].

Потенциально эти насосы имеют высокую производительность при многоступенчатом исполнении. Однако такая эффективность может быть достигнута при минимизации термических потерь сквозь его стенки. При успешном решении проблемы эти миниатюрные насосы будут способны функционировать в диапазоне давлений от атмосферы до сверхвысокого вакуума. Насос Кнудсена может быть использован в качестве компрессора и способен нагнетать газ в диапазоне от 1 до 10 атм.

В качестве форвакуумных насосов могут быть использованы мембранные (диафрагменные) насосы. Существует множество конструкций таких насосов с различными приводами, среди которых преобладает пьезопривод. В качестве примера приведена конструктивная схема одного из таких насосов (рис.12,а и 12,б). Принцип действия мембранных насосов идентичен принципу действия всех вытеснительных насосов – расширение рабочего объема, сжатие газа, его удаление. Расширение и сжатие рабочего объема осуществляется за счет деформации мембраны пьезопривода.

Миниатюрный мембранный насос с бесклапанным механизмом, созданный Государственным научно-исследовательским институтом физических проблем имени Ф.В. Лукина (НИИФП), обладает габаритами $6 \times 3 \times 1,2 \text{ мм}$ при быстроте откачки 10^{-7} л/с [24]. Привод мембраны может быть как электромагнитный, так и электростатический.

Отличительной особенностью миниатюрных мембранных насосов является то, что они могут использоваться как для откачки жидкостей, так и газов. При этом большинство созданных конструкций используются для откачки и транспортировки именно жидкостей, потому что характеристики

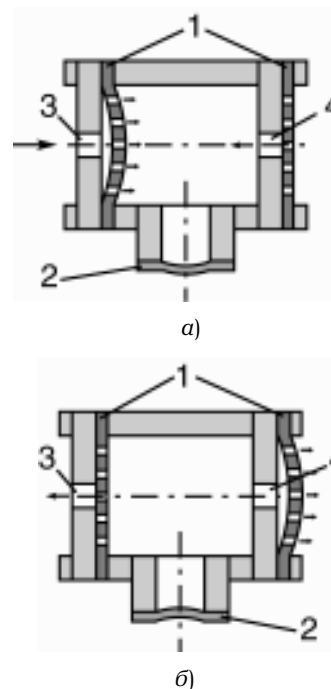


Рис. 12. Конструктивная схема мембранного насоса с пьезоприводом в фазе расширения рабочего объема (а) и фазе удаления газа (б): 1 – мембраны; 2 – пьезопривод; 3 – входное отверстие; 4 – выходное отверстие

их работы по газам могут быть лишь оценены (табл. 8).

Говорить о мембранных насосах как о форвакуумных насосах преждевременно, что, прежде всего, вытекает из их высокого предельного остаточного давления. Это объясняется наличием большого относительно объема рабочей камеры мертвых объемов. Мембранные насосы имеют тенденцию к дальнейшей миниатюризации. Уже сейчас по своим массогабаритным характеристикам они вышли на уровень микронасосов.

В табл. 8 приведена сравнительная характеристика видов миниатюрных форвакуумных вакуумных насосов. Параметры, по которым экспертная оценка на данный момент невозможна, отмечены прочерком.

Рассмотренная совокупность принципов откачки не является исчерпывающей при решении задач миниатюризации. Ряд традиционных видов откачки, таких как струйная и криогенная, вследствие особенностей своих физических принципов

Таблица 7.

Расчетные характеристики насоса Кнудсена USC (24 ступени)

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

Таблица 8.

Сравнительная характеристика видов миниатюрных высоковакуумных насосов

| Вид насоса | Q , л/с | $P_{пред}$, Па | Линейный размер, мм | m , кг | W , Вт |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| Спиральный | $10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$ | $10^3 - 5 \cdot 10^{-1}$ | 10 – 30 | – | 1– 10 |
| Перистальтический | $10^{-3} - 10^{-2}$ | $10 - 10^{-1}$ | 20 – 50 | 0,2 – 0,5 | 1 – 10 |
| Транспирационный | $10^{-4} - 10^{-2}$ | 10 – 1 | 30 – 100 | – | 1 – 5 |
| Мембранный | $10^{-7} - 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^3$ | $10^{-1} - 10$ | $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ | $10^{-3} - 5$ |

действия пока не реализуемы на миниатюрном уровне. Существуют виды макронасосов, такие как турбина Тесла и насос на газостатических подшипниках, которые потенциально могут быть миниатюризованы. Кроме того, под влиянием процессов миниатюризации следует ожидать использования новых физических принципов действия в вакуумных насосах.

ВЫВОДЫ

Проведена систематизация данных по миниатюрным высоковакуумным и форвакуумным насосам, позволяющая определить современные технические требования к ним.

Ряд видов насосов, базирующихся на традиционных способах достижения вакуума, в миниатюрном исполнении уже сейчас выпускается серийно. Сказанное относится, в первую очередь, к высоковакуумным насосам — турбомолекулярным, магниторядным и геттерным.

Область миниатюрных форвакуумных насосов в силу трудности масштабирования традиционных насосов на данный момент представляет собой широкое поле для

исследования различных физических принципов действия. Проектирование форвакуумных средств откачки находится на стадиях исследования и испытания макетных образцов.

Миниатюризация вакуумных насосов органично вписывается в картину общей миниатюризации оборудования, находясь при этом в зависимости от нее. Снижение массогабаритных характеристик позволяет использовать вакуумную технику в новых, нетрадиционных областях, для чего требуется проведение маркетинговых исследований.

Summary

The analytical review of miniature vacuum pumps is presented in this paper. Comparative analysis of high-vacuum (turbomolecular, sputter-ion, ion-getter, non-evaporable-getters) and fore-vacuum (scroll, peristaltic, transpiration, membrane) pump types are carried out. Principles of operation and construction diagrams of miniature pumps are considered, its advantages and disadvantages are revealed. Features of existent miniature pumps are brought.

Литература

1. Alcatel Vacuum Technology Miniature hybrid turbomolecular pump ATH 31 Catalog. http://www.alcatelvacuum.com/alcatel_avt/download/docs/prod/doc2prod21.pdf
2. Pfeiffer-vacuum CompactTurbo Catalog. http://www.pfeiffer-vacuum.de/web/data/templates/data_both_language/products/files/PT0047PE.pdf
3. Varian, Inc. Vacuum Technologies Turbo-V Pumps Catalog. <http://www.varianinc.com/image/vimage/docs/products/vacuum/pumps/turbo/shared/turbo-catalog.pdf>
4. Leybold Vacuum Complete Catalog 2003/2004. Turbomolecular Pumps. http://www.leyboldvac.de/corporate/produkte_fr.html
5. Mark A. Kenton, Robert J. Kline-Scholder. Miniaturized Vacuum Pump Development at Create. Presentation for 1999 NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 1999. <http://cissr.jpl.nasa.gov/conferences/pumpsworkshop/>
6. Mark Kenton. Turbomolecular Pumps for Harsh Environments. Presentation for The 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 2002. <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Presentations%203rd/Kenton/kenton.pdf>
7. Rob Rowan, Mark Johnson. Miniature Turbo-molecular Pump. Abstract for The 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 2002. <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Pump>
8. Varian, Inc Vacuum Technologies. Ion Pumps Catalog. <http://www.varianinc.com/image/vimage/docs/products/vacuum/pumps/ion/shared/ion-catalog.pdf>
9. Thermionics Vacuum Products Ion Pumps Catalog. <http://www.thermionics.com/download/TLI-Sect1.pdf>
10. Physical Electronics TiTan™ Ion Pumps Catalog. http://www.gammavacuum.com/pumps/cont_pumps_3S_v1.htm, http://www.gammavacuum.com/pumps/cont_pumps_12S_v1.htm
11. Heat Wave Labs. Catalog. <http://www.cathode.com/pdf/5-1-4.pdf>
12. В.А. Попов, В.А. Павлова. Проблемы иницирования запуска магниторазрядных микронасосов. Материалы VIII НТК «Вакуумная наука и техника». 2001 г., с.317-319.
13. S.L. Ruthford. Miniature Sputter-Ion Pump Design Considerations. 1999 NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. <http://www.duniway.com/images/pdf/mini-putter-ion-pumps-rev03.pdf>
14. Г.Ф. Корепин, Е.А. Котюргин, А.А. Стефаненко. Миниатюрные магнитные электро-разрядные насосы полумагнетронного типа. Тезисы докладов научно-технического семинара Вакуумная техника и технология – 2003. <http://www.vacuum.ru/file/misc/vtt/2003/Korepin/Korepin2.html>
15. Jaroslava Z. Wilcox, Thomas George, Jason Feldman. Miniature Ring-Orbitron Getter Ion Vacuum Pumps. JPL New Technology Report NPO-20436. 1999.
16. SAES Getters Catalog. http://www.saesgetters.com/vs/ok_b200.pdf, http://www.saesgetters.com/vs/ok_d400.pdf, <http://www.saesgetters.com/vs/GP502F.pdf>, <http://www.saesgetters.com/vs/GP100MK5.pdf>
17. Eric Moore, E. Phillip Muntz; Francis Eyre, Nosang Myung, Otto Orient, Kirill Shcheglov. Performance Analysis for Meso-Scale Scroll Pumps. Presentation for The 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 2002. <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Presentations%203rd/Moore/moore.pdf>
18. Sabrina Feldman, Jason Feldman, Danielle Svehla. Pneumatically Actuated Miniature Peristaltic Vacuum Pumps. JPL New Technology Report NPO-30165. 2003.
19. Yoseph Bar-Cohen and Zensheu Chang. Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump. Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 5-8 March, 2001, Newport, CA. Paper No. 4327-52.
20. Sabrina Feldman, Danielle Svehla. Miniature Peristaltic Vacuum Pump with Magnetic Actuation. Abstract for The 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 2002. <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Abstracts%203rd/3rdpumpstalks.htm#Pump>
21. Marcus Young, E. P. Muntz, G. Shiflett, A. Green. The Knudsen Compressor as an Energy Efficient Micro-Scale Vacuum Pump. Presentation for The 2nd NASA/JPL Miniature Vacuum Pumps Workshop. 2002. <http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Presentations%203rd/Young/young.pdf>
22. United States Patent 6,533,554. Vargo, et al. Thermal transpiration pump. March 18, 2003.
23. А.В. Липин, Ю.В. Никольский, О.Г. Фригленгер. Экспериментальные исследования течения в коротких цилиндрических каналах при малых числах Рейнольдса. Термомолекулярный насос. Материалы IX НТК «Вакуумная наука и техника». 2002 г., с.32-33.
24. НИИФП. http://www.niifp.ru/rus_ver/micromech/micropump.html