

ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ

А.А. Очков

aochkov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Высоковакуумные механические насосы широко применяются в различных областях науки и техники как в исследовательских, так и в промышленных целях. К современным высоковакуумным механическим насосам можно отнести молекулярные вакуумные насосы, турбомолекулярные и гибридные турбомолекулярные вакуумные насосы, т. е. конструкции, представляющие собой турбомолекулярный вакуумный насос с одной или несколькими дополнительными молекулярными ступенями. Существует также ряд экспериментальных и теоретических разработок, в рамках которых предложены комбинации совместной работы высоковакуумных насосов различных типов, где, как правило, на стороне всасывания основная откачка ведется осевой турбомолекулярной ступенью. Такие схемы можно отнести к классу современных высоковакуумных механических насосов. Проведен анализ научных исследований в области высоковакуумных механических насосов и изучены их конструкции. На основании проведенного обзора отмечены не решенные до настоящего времени задачи проектирования и математического моделирования рабочих процессов высоковакуумных механических насосов, на основании которых выделены дальнейшие перспективы развития вакуумной техники, поставлены цели и задачи для новых исследований

Ключевые слова

Высоковакуумные механические насосы, турбомолекулярные вакуумные насосы, молекулярные вакуумные насосы, оптимизация, откатные характеристики

Поступила 13.07.2021

Принята 26.08.2021

© Автор(ы), 2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50177

Введение. Высоковакуумные механические насосы (ВМН) широко применяются в таких отраслях промышленности, как химическая, электронная, нефтегазовая и др. Имея значительные преимущества, ВМН составляют весомую конкуренцию паромасляным диффузионным вакуумным насосам — безусловным лидерам по объему использования в вакуумных системах.

Исследователи активно заинтересовались ВМН, поскольку паромасляные диффузионные вакуумные насосы не создают необходимой чистоты рабочего объема и являются источником появления в нем органических соединений. Данный факт не позволяет отнести этот тип насоса к безмасляным средствам откачки. В ходе поиска различных вариантов улучшения качества процессов, протекающих в проточной части ВМН, появилось множество различных исследований.

Современные ВМН отличаются высокой энергоэффективностью, поскольку к настоящему времени созданы теории рабочих процессов, основанные на исследованиях в области вакуумной и компрессорной техники. Кроме того, разработано и разрабатывается множество конструкций вакуумных молекулярных, турбомолекулярных и гибридных вакуумных насосов в целях получения оптимальных характеристик для решения специфических задач. Развитие новых технологий, в частности вакуумной техники, происходит достаточно стремительно, поэтому создание высокотехнологичных конструкций ВМН с параметрами, соответствующими современным требованиям, становится актуальной задачей.

Молекулярные вакуумные насосы. Впервые молекулярный вакуумный насос (МВН) был предложен в 1913 г., но до 1956 г. не получил широкого распространения из-за небольших скоростей откачки, сложности изготовления и сборки. Молекулярные вакуумные насосы относятся к кинетическим вакуумным насосам. Принцип работы таких насосов состоит в передаче от вращающегося ротора добавочного импульса движения молекулам газа по направлению откачки. Важная особенность заключается в том, что направления перемещения рабочих поверхностей и молекул газа совпадают. Идея создания подобных молекулярных насосов принадлежит В. Геде (1912 г.).

Эффективность работы МВН на разных режимах отличается. Так, в молекулярном режиме течения создается высокое отношение давлений при небольшой скорости действия, а в молекулярно-вязкостном режиме происходит снижение показателей рабочих характеристик.

Для аналитического описания рабочих процессов в проточной части МВН выделим несколько вычислительных методов, а именно: методы вычислительной гидродинамики (CFD-методы, Computational Fluid Dynamics), Монте-Карло, угловых коэффициентов (аналог радиационного теплообмена) и метод Кнудсена [1].

Существует множество зарубежных и отечественных работ, в которых применяется один или несколько указанных методов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Применение метода Кнудсена целесообразно для описания течений в трубопроводах и других протяженных каналах. Весомым преимуществом данного метода является простота получаемых аналитических зависимостей при описании течений в вакуумных каналах. Однако в ряде других исследований ему свойственно наличие больших погрешностей. Например, при анализе массопереноса в камерах высокого вакуума, в которых присутствуют высокотемпературные объекты и поверхности в движении, применение метода подразумевает следующие допущения: поперечный размер канала значительно меньше его протяженности; температура всех поверхностей одинаковая; не учитываются точечные источники газа и отсутствуют поглотители в каналах.

Метод Монте-Карло представляет собой численное моделирование множества траекторий отдельных молекул, что дает возможность рассчитать важные характеристики: коэффициент захвата, проводимость, распределение молекулярных потоков по плотности, и включает в себя два основных метода изучения случайных процессов: пробной частицы и прямого моделирования [2]. Метод пробной частицы применяется в основном при молекулярном режиме для расчета течений. Траектория движения каждой отдельно взятой частицы рассматривается отдельно друг от друга, поскольку при больших значениях числа Кнудсена отдельные частицы имеют взаимную независимость движения. Метод прямого моделирования [2] используется при расчете параметров газовой среды, в которой частицы взаимодействуют между собой, траектории движения всех частиц рассматриваются одновременно. Для данного метода необходимо использовать ЭВМ с большим объемом памяти и быстродействием. Применение этого метода при анализе молекулярных течений в высоковакуумных установках позволяет рассчитывать параметры газовой среды независимо от степени ее изотропности. При описании систем высокой геометрической сложности преимущество метода Монте-Карло заключается в его простоте. Недостатками метода Монте-Карло являются отсутствие аналитических зависимостей, длительность проведения расчетов с использованием ЭВМ, а также достаточно высокая погрешность расчетов.

Метод угловых коэффициентов заключается в аналогии между молекулярным обменом в среде высокого вакуума и теплообменом излучением в непоглощающей среде, которая позволяет описывать математическим аппаратом алгебры лучистых потоков молекулярные течения. По сравнению с методом Монте-Карло метод угловых коэффициентов требует меньше машинного времени для расчета.

Что касается CFD-метода, то его практическое преимущество состоит в хорошо зарекомендовавших себя коммерческих программных кодах, которые могут справиться со сложной трехмерной геометрией, типичной для условий вакуума. Очевидно, что производители насосов видят в этих инструментах возможность дальнейшей оптимизации своей продукции и уменьшения стоимости прототипа, заменяя фактические эксперименты численными, как только инструмент будет надлежащим образом утвержден.

Отметим некоторые аспекты физики рабочих процессов вакуумного насоса, которые еще недостаточно изучены.

По типу конструкции МВН принято делить на четыре группы:

- 1) цилиндрического типа с кольцевыми каналами на роторе (насос Геде);
- 2) цилиндрического типа со спиральным каналом вдоль поверхности ротора (насос Хольвека);
- 3) дискового типа со спиральным каналом от внешнего диаметра к центру диска (насос Зигбана);
- 4) конического типа (система Холанда — Мартена) [3, 4].

В результате анализа научных работ выявлено, что в составе комбинированного турбомолекулярного насоса (ТМН) в настоящее время широко



Рис. 1. Молекулярная ступень Twiss Torr

применяется молекулярная ступень Зигбана, которая существенно модифицирована компанией Agilent Technologies и получила название Twiss Torr (рис. 1).

Движение молекул газа возможно в двух направлениях: от периферии к центру и в обратном направлении в последующей ступени. Конструкции статорных дисков зависят от откачных параметров. Для обеспечения быстроты действия необходимы большее число каналов на статоре и меньший угол закрутки спирали,

а меньшее число каналов на статоре и больший угол закрутки спирали способствуют обеспечению заданного отношения давлений.

Существует математическая модель течения газа в торцевом зазоре дискового вакуумного насоса в молекулярном режиме течения газа. Расчет основан на использовании метода Монте-Карло (метод пробной частицы). Взаимодействие молекул газа с поверхностью дисков описывает-

ся диффузным законом отражения при коэффициенте аккомодации, равном единице; распределение молекул по средним арифметическим скоростям теплового движения описывается законом Максвелла. Представленная модель позволяет определить проводимость зазора, величину потока перетеканий газа через зазор и максимальный перепад давлений на уплотнении при нулевом потоке перетеканий.

Компактные МВН. В последние годы в мире делается упор на разработку портативных устройств различного функционала в целях обеспечения высокой мобильности человека. Согласно международной патентной базе, в настоящее время ведется не так много разработок в области мобильных вакуумных насосов, известен, например, патент US7165931B2 «Компактный молекулярный вакуумный насос» (2007 г.) [5]. Устройство разработано для компактных и портативных химических и биологических датчиков, которые имеют множество потенциальных применений, например для быстрого тестирования загрязнителей окружающей среды на месте, для обнаружения присутствия боевых химических и биологических агентов портативными химическими анализаторами, системами обнаружения биологических объектов, для правоохранительных органов, проверяющих найденные неизвестные вещества. Обычные вакуумные насосы, способные обеспечить необходимый высокий вакуум, требуемый для высокоточного измерения и тестирования веществ при низких концентрациях (это уровень вакуума, при котором эффективность многих датчиков повышается), часто слишком велики и потребляют слишком много энергии для совместимости с портативными сенсорными системами. Испробовано несколько других решений для достижения более высокого вакуума в небольшом устройстве, включая использование криогенных, адсорбционных и диафрагменных вакуумных насосов. Насколько известно, они не обеспечили нужный уровень вакуума при малых габаритных размерах устройства. Поэтому была предпринята попытка создания компактного вакуумного насоса с молекулярными ступенями, поскольку они считаются перспективными для применения в данной области (рис. 2).

Устройство включает в себя высокоскоростной вращающийся диск (ротор), расположенный внутри корпуса. В корпусе со стороны вращающегося диска высечены спиральные канавки, газ увлекается путем взаимодействия молекул газа с поверхностями вращающегося диска последовательно. Соответствующие уплотнительные пластины с треугольными выступами расположены рядом с вращающимся диском для направления потока газа в сторону всасывания. Любая утечка через уплотнительную

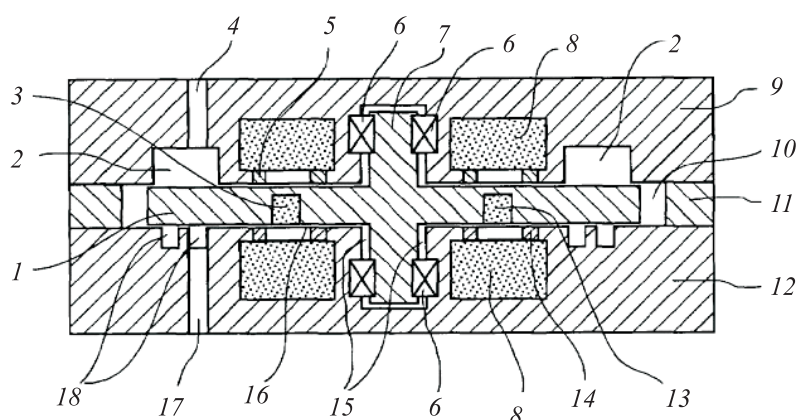


Рис. 2. Конструктивная схема компактного МВН:

1 — ротор; 2 — первая канавка верхней части корпуса; 3 — карманы с постоянными магнитами; 4 — впускное отверстие; 5 и 14 — D-образные катушки встроенного двигателя; 6 — подшипники с жидким смазочным материалом (используется жидкость с низким давлением пара); 7 — вал ротора; 8 — мягкие ферритовые кольца; 9 — верхняя крышка; 10 — второй нагнетательный канал, расположенный у края ротора; 11 — прокладка; 12 — выпускная крышка; 13 — круг из постоянных магнитов, используемый для имитации характеристик двухполюсной пары цилиндрического магнита; 15 — внутренняя полость; 16 — воздушный зазор между катушками и ротором; 17 — выпускное отверстие; 18 — третий нагнетательный канал, имеющий спиральную конфигурацию (канал высокого давления)

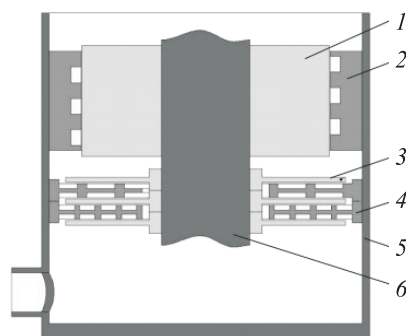
пластину возможна через небольшой зазор между пластиной и ротором. Другой особенностью этого насоса, которая способствует уменьшению перетекания газа, является наличие постоянных магнитов, установленных в роторе. Магниты проходят не сквозь ротор, они располагаются в специальных карманах, т. е. для газа нет пути, по которому он мог бы просачиваться со стороны высокого давления на сторону низкого давления через зазоры между ротором и магнитами [6].

Комбинированные МВН. Такие МВН с комбинированной проточной частью способны обеспечить результативную безмасляную откачку газа при давлении от 1 до 100 Па. Они не имеют аналогов, но имеют конкурентные преимущества. В целях расширения диапазона работы стандартных МВН осуществлена попытка изучения комбинации двух видов МВН — цилиндрического (ЦМВН) и дискового (ДМВН) [7]. Схема экспериментального устройства приведена на рис. 3.

Расчет оптимальных параметров проточной части комбинированного МВН (КМВН) приведен в [8], где выполнен сравнительный анализ объемов проточных частей ЦМВН, ДМВН и КМВН, работающих в оптимальных диапазонах рабочих давлений. Критерием оптимальности выбран

Рис. 3. Принципиальная схема КМВН:

1 — гладкий ротор цилиндрической ступени МВН; 2 — статор цилиндрической ступени с фрезерованным каналом; 3 — роторные гладкие диски дисковой ступени; 4 — статорные диски с нарезанными в них каналами в форме архимедовой спирали; 5 — корпус; 6 — вал



объем проточной части насоса. По данному критерию выполнялась оптимизация конструкции. При равных заданных параметрах (род откачиваемого газа, начальный диапазон рабочих давлений, значения требуемой быстроты откачки и число оборотов вала) для КМВН необходимы в разы меньшие объемы проточной части, чем для ЦМВН и ДМВН по отдельности.

Комбинированный МВН имеет весомое преимущество перед существующими типами, такими как ЦМВН и ДМВН — рабочие откачные характеристики, а именно массогабаритные параметры при давлении всасывания $0,1 \dots 200$ Па и нагнетания 200 Па значительно лучше. Данный факт указывает на то, что КМВН является современным и перспективным средством откачки.

Молекулярно-вязкостные вакуумные насосы. Такие вакуумные насосы являются важной современной разработкой. Для проектирования молекулярно-вязкостных вакуумных насосов (МВВН) сформулированы практические рекомендации, математически смоделирован процесс откачки газа проточной части МВВН на молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Исследовано влияние как динамических, так и геометрических параметров на откачные характеристики проточной части МВВН, благодаря которым обеспечивается необходимая откачная характеристика насоса. Для работы МВВН на молекулярно-вязкостном режиме течения газа разработан метод расчета откачных параметров данного насоса [9].

Отличительная способность МВВН — работа на любых режимах течения газа. Режимы течения газа зависят от таких показателей, как давление, вид газа и геометрические размеры каналов насоса. Для молекулярно-вязкостного режима в МВВН характерно давление $1 \dots 10^3$ Па на всасывании при различной геометрии канала. Диапазон давления, который в состоянии обеспечить МВВН при откачке вакуумных установок, составляет $10^{-5} \dots 10^5$ Па при скорости действия $10^{-3} \dots 1$ м³/с. Приведен-

ный диапазон давления соответствует предельному остаточному давлению большей части низковакуумных насосов, таких как винтовые, ротационно-пластинчатые, мембранные, кулачково-зубчатые, спиральные. Сравнивая МВВН с низковакуумными насосами, получаем, что МВВН имеют преимущества в скорости действия и большем диапазоне рабочих давлений, массогабаритных характеристиках, отсутствии загрязнения откачиваемого объема парами углеводородов.

Недостатками МВВН являются сложность конструкции и необходимость соблюдения высокой точности при изготовлении проточной части, причем как ТМН, так и МВН.

В основе конструкции МВВН (рис. 4) находится вал, который вращается в корпусе.

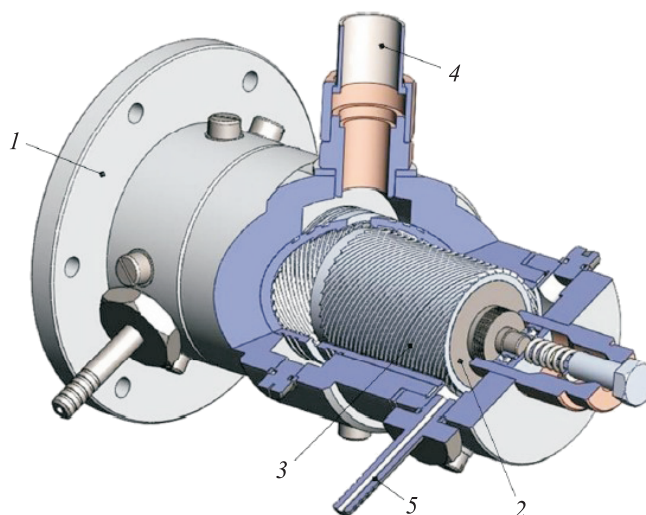


Рис. 4. Конструкция МВВН:

1 — корпус; 2 — вал; 3 — проточная часть насоса; 4 — всасывающий патрубок;
5 — нагнетательный патрубок

Газ поступает в насос через всасывающий патрубок, затем газ разделяется на два потока, после чего проходит к форвакуумным патрубкам через проточную часть. Для откачки газа из форвакуумной части используется вспомогательный форвакуумный насос. Возможно использование МВВН без форвакуумного насоса, в таком случае газ из форвакуумной части выходит в атмосферу. Винтовые каналы на смежных поверхностях ротора и статора образуют проточную часть МВВН (рис. 5).

Принцип действия проточной части МВВН [10] такой же, как и у кинетических вакуумных насосов — при попадании в каналы, которые образуют статор и ротор, молекулы газа приобретают дополнительное количе-

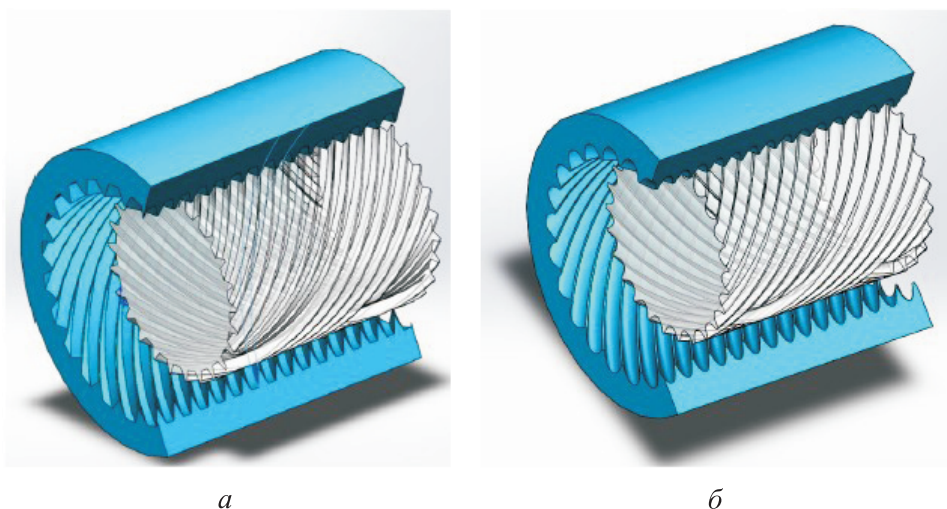


Рис. 5. Проточная часть МВВН с различными профилями каналов:
a — трапеция; *б* — эллипс

ство движения относительно каналов в направлении нагнетания. Передача молекулам газа дополнительного количества движения осуществляется вращающимся ротором при перемещении газа по каналам статора. Молекулы газа получают дополнительное количество движения относительно каналов ротора в результате их торможения при взаимодействии с поверхностью статора. Приращение динамического давления в каналах ротора преобразуется в статическое давление в неподвижных каналах статора. В результате по всей длине канала происходит увеличение давления. Перепад давлений воздействует на частицы газа в направлении, близком к направлению нормали к каналу. Движение молекул газа по спирали осуществляется за счет воздействия каналов на молекулы газа.

Впервые метод расчета откачных параметров МВВН и математическая модель процесса откачки газа проточной частью МВВН в молекулярно-вязкостном режиме течения приведены в работе [11]. Расчет модели базируется на предположительном ламинарном режиме течения газа, которое в молекулярно-вязкостной проточной части представляется как слоистое, при этом используются методы сплошной среды, описывающие течение Пуазейля.

При расчете также во внимание принимались полная симметрия каналов ротора и статора и принцип относительности движения, рассматривалось перемещение газа в отдельных проточных частях насоса, которые разделены фиктивной поверхностью (рассматривалась перфорированная поверхность из-за малого расстояния между статором и ротором).

Данная поверхность имеет свойства ротора для каналов статора и статора для каналов ротора. Поэтому рассматривается предположение об эффекте прилипания газа к поверхности, т. е. скорость газа на фиктивной поверхности равна скорости ротора.

Согласно патентной базе, на данный момент существуют патенты на полезную модель конструктивных схем МВВН № 2016149254 и № 2016149256 (2016 г.), также патенты РФ на изобретение № 2016149250 и № 2016149252 (2016 г.). Патент RU 169121 U1 «Многопоточный молекулярно-вязкостный вакуумный насос» в 2018 г. потерял свою силу. Однако патенты на полезную модель молекулярно-вязкостных проточных частей насосов различных форм все еще защищены патентами РФ на полезную модель RU 164000 U1 «Молекулярно-вязкостная проточная часть» и RU 166526 U1 «Молекулярно-вязкостная проточная часть вакуумного насоса» [12, 13].

Турбомолекулярные вакуумные насосы. В настоящее время наиболее распространенными ВМН в промышленности являются ТМН. Они активно применяются для откачки газов в диапазоне рабочих давлений $10^{-9} \dots 10^{-4}$ Па и относятся к кинетическим вакуумным насосам. Первая конструктивная схема ТМН была предложена Беккером в 1958 г.

Процесс откачки в установке, состоящей из лопастей ротора и статора, создается за счет передачи импульсов от вращающихся лопастей ротора к молекулам откачиваемого газа по направлению откачки [14]. Соприкасаясь с лопастями, молекулы газа адсорбируются и спустя определенный промежуток времени вновь их покидают. Скорость лопастей и средняя арифметическая скорость теплового движения молекул по результатам этого процесса суммируются. Причем в целях сохранения составляющей скорости, которая передается лопастями вследствие столкновения с другими молекулами, необходимо преобладание молекулярного режима течения газа в проточной части вакуумного насоса.

Основным отличием ТМН от МВН является направление перемещения рабочих поверхностей и молекул газа — в МВН они совпадают, а в ТМН взаимно перпендикулярны.

По сравнению с другими высоковакуумными насосами ТМН имеют следующие преимущества: отсутствует загрязнение откачиваемого объема парами углеводорода или другими рабочими телами; быстрота действия слабо зависит от рода газа; высокая надежность и простота в обслуживании; способны выдерживать порывы атмосферного воздуха; требуемая быстрота откачки обеспечивается в широком диапазоне рабочих давлений на всасывании. В настоящее время существует большое число разнообразных конструкций ТМН, их классификация приведена на рис. 6.

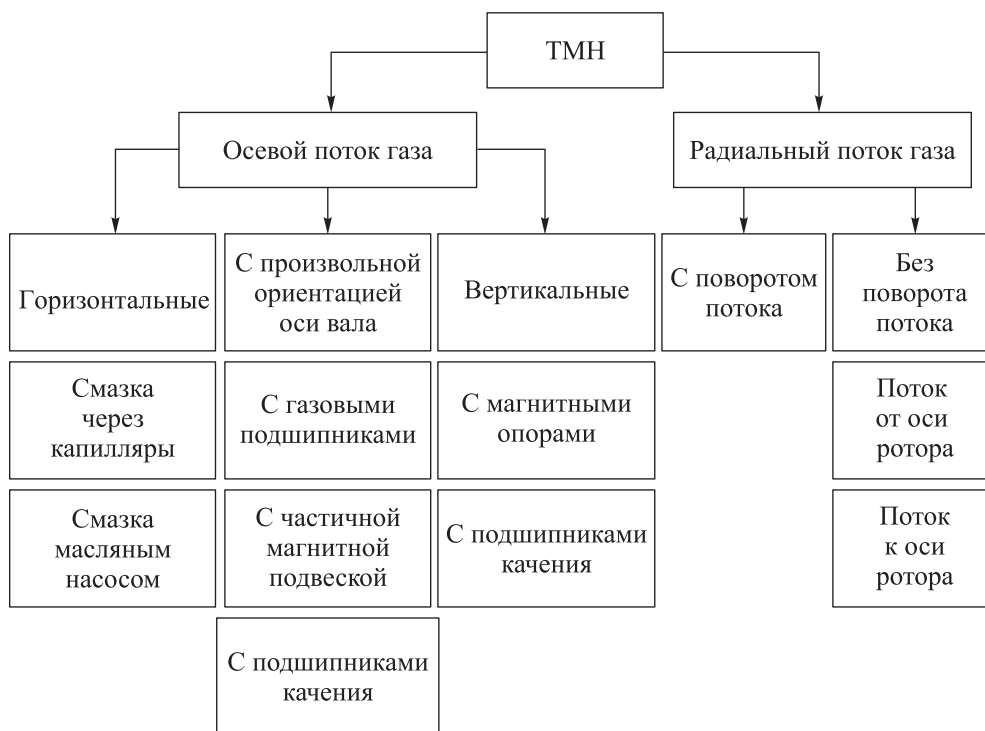


Рис. 6. Классификация ТМН

Необходимо также отдельно выделить следующие виды ТМН: двух- и однопоточные. Конструктивно эти виды различны по способу расположения проточной части и отличаются характером прохождения откачиваемого потока газа в насосе.

Преимущества двухпоточных насосов по сравнению с однопоточными следующие: большая легкость балансировки и ремонта, меньшая чувствительность к попаданию твердых частиц, вносимых с откачиваемым газом, а также меньшее воздействие порывов атмосферного воздуха. Главными достоинствами однопоточных конструкций ТМН являются простота изготовления, относительно легкая встраиваемость в вакуумные установки, что позволяет сохранять быстроту действия насоса за счет того, что обеспечивается возможность монтажа насоса в вакуумной системе в произвольном положении без переходных присоединительных патрубков.

Уменьшить гироскопические нагрузки на опоры ротора в конструкции двухпоточного насоса позволяет расстояние между опорами, которое увеличено по сравнению с однопоточными, но при этом двухпоточному насосу требуется более жесткий тяжелый корпус. Еще одним весомым преимуществом конструкции двухпоточного насоса является взаимное уравновешивание сил, которые возникают в двух проточных частях при работе

в вязкостном режиме течения или при порыве атмосферного воздуха. В этом случае на опоры ротора не действуют дополнительные «вертолетные» силы, что крайне важно для ТМН, работающего в вязкостном режиме течения газа [15].

Различия между одно- и двухпоточными насосами еще более уменьшаются с появлением однопоточных насосов, работающих при горизонтальном или ином положении ротора, и с возможностью поворота впускного патрубка вокруг оси двухпоточного насоса. Применение самобалансирующихся устройств на роторах уменьшит и это различие. Из теории гироскопов давно известна возможность выполнения вертикального самобалансирующегося ротора [16], опоры которого жестко не фиксируют его положение. Это свойство еще более увеличит преимущества ТМН перед другими вакуумными насосами, особенно, если учесть, что в процессе откачки в напылительных камерах возможно налипание на ротор испаряющегося рабочего материала.

Еще одним видом классификации ТМН является разделение их по типу рабочих колес: лопаточные и дисковые.

При одинаковых наружных диаметрах лопаточные колеса обеспечивают большую быстроту откачки по сравнению с дисковыми, поскольку межлопаточные каналы в этом случае имеют большую относительную площадь. Как показали теоретические исследования [17], при разных значениях наружного диаметра увеличения скорости откачки различны. При скорости откачки $S = 50...200 \text{ дм}^3/\text{с}$ увеличение скорости откачки не превышает 20 %. В насосе с скоростью действия $S = 400...500 \text{ дм}^3/\text{с}$ применение лопаточных колес по сравнению с дисковыми колесами уменьшает примерно на 10...12 % наружный диаметр.

В вакуумном ТМН скорость действия составляет 400...500 $\text{дм}^3/\text{с}$, что указывает на целесообразность выполнения рабочих колес в виде дисков с радиальными пазами. Подобная конструкция колеса проста в изготовлении и достаточно технологична. Колеса подобной конструкции имеют возможность обеспечения заданной скорости откачки при относительно малом наружном диаметре.

Рабочие колеса с радиальными пазами в вакуумных ТМН с скоростью действия более 400 $\text{дм}^3/\text{с}$ имеют такие недостатки, как ограничение скорости действия насоса, увеличение радиального размера и усложнение технологии изготовления. Поэтому в таких насосах обычно используют лопаточные колеса. В общем случае существует три типа лопаток, применяемых в рабочих колесах насоса: ширина и толщина лопаток линейно уменьшают-

ся по радиусу; ширина лопаток колеса увеличивается к периферии, что обеспечивает постоянную эффективность межлопаточного канала по радиусу, т. е. неизменность относительной ширины рабочего канала.

Для обеспечения заданных параметров откачки в широком диапазоне рабочих давлений используют колесо с неизменной геометрией межлопаточного канала. Однако при этом происходит увеличение осевого размера проточной части и насоса. Рабочие колеса с лопатками постоянной толщины получили наибольшее распространение. Лопаточные рабочие колеса по сравнению с дисковыми имеют более высокий коэффициент задействия торцевой поверхности в целях переноса молекул откачиваемого газа через межлопаточные каналы.

Задачи обеспечения определенной быстроты откачки ТМН в заданном диапазоне давлений, уменьшения массогабаритных характеристик решаются с помощью построения математической модели процессов, которые протекают в проточной части насосов, а также разработки методов расчета оптимальных параметров проточной части ВМН по определенным критериям оптимальности. В настоящее время получение максимально приближенных к экспериментальным данным аналитических результатов возможно благодаря применению мощного современного вычислительного оборудования, а также постоянному совершенствованию используемых алгоритмов расчета. Все это дает возможность снизить затраты на производство за счет уменьшения числа создаваемых прототипов, а в ближайшем будущем позволит разрабатывать насосы без последующей экспериментальной проверки и доводки образцов.

В различных отраслях промышленности широко применяются комбинированные ТМН. Метод расчета основных параметров комбинированного вакуумного ТМН приведен в [18]. Структура проточного канала рассматриваемого ТМН определяется ротором с двумя ступенями — турбомолекулярной и молекулярной. Приняты следующие допущения.

1. Распределение молекул по скоростям соответствует закону распределения Максвелла во входной и форвакуумной секциях.
2. Режим течения в канале молекулярный.
3. Процесс переноса молекул газа считается квазистационарным.

Для определения геометрических параметров рабочего колеса применяются теоретические модели перехода молекул газа через колесо, учитывается их взаимодействие со стенками молекулярной ступени [18].

Для выявления наиболее перспективных путей развития вакуумных ТМН обратимся к некоторым достаточно давно разработанным кон-

струкциям вакуумных насосов, чтобы оценить их преимущества и недостатки, на основе которых ведутся работы по созданию современных более совершенных моделей ВМН.

Насос «Турбовак-450» (рис. 7) фирмы «Лейбольд — Хераус» имеет отличия, заключающиеся в используемой смазочной системе, расположении электродвигателя, а также технологии изготовления ротора. Сама форма ротора насоса — колоколообразная. Ротор изготовлен из цельной заготовки, на его поверхности продольным фрезерованием выполнены лопатки. Смазочная система в насосе устроена следующим образом. Конец вала, в нижней части которого выполнено конусное сверление, вершиной вниз погружен в масляную ванну, сам же вал полый. При вращении под действием центробежной силы масло начинает подниматься вверх по валу и поступает в подшипник насоса в виде капель через две канавки над верхним подшипником. Масло стекает в маслосборник, расположенный под нижним подшипником. Из верхнего подшипника в нижний масло поступает по проточкам на стенках охлаждаемого корпуса. Для предотвращения загрязнения насоса на его всасывающем патрубке установлена защитная сетка. В насосе «Турбовак-450» применены рабочие колеса с наружным диаметром 240 мм, частота вращения ротора составляет 400 об/с, что в целом обеспечивает в рабочем диапазоне давлений $10^{-8} \dots 1$ Па быстроту действия по азоту, равную $450 \text{ дм}^3/\text{с}$. Главным и существенным недостатком используемой смазочной системы является то, что насос должен принимать строго вертикальное положение.

Первым промышленным образцом насоса с электромагнитными опорами был насос «Турбовак-550М» фирмы «Лейбольд — Хераус» (рис. 8). Такая конструкция насоса имеет две радиальные и одну осевую электромагнитные активные опоры, ротор насоса подвешен на них, а электродвигатель установлен между двумя радиальными магнитными подшипниками. Сам ротор выполнен полым, внутри него расположен опорный стержень. В верхней части ротора находится осевой магнитный подшипник. Предусмотрена также аварийная остановка насоса, тогда ротор опускается на шарикоподшипники, установленные с трением без смазочного материала в нижней и верхней частях стержня.

Чтобы исключить работу шарикоподшипников во время вращения ротора, между ротором и наружными кольцами шарикоподшипников выполнен зазор $\sim 0,1$ мм. При остановке насоса зазор «выбирается» и ротор тормозится на шарикоподшипниках. Применение магнитных подшипников позволяет снизить уровень вибраций. Такая конструкция имеет множество

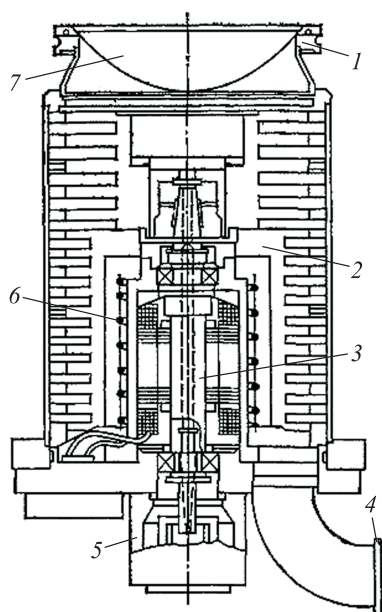


Рис. 7. Конструктивная схема насоса «Турбовак-450»:

1 — всасывающий патрубок; 2 — ротор; 3 — вал; 4 — нагнетательный патрубок; 5 — маслосборник; 6 — корпус; 7 — защитная сетка

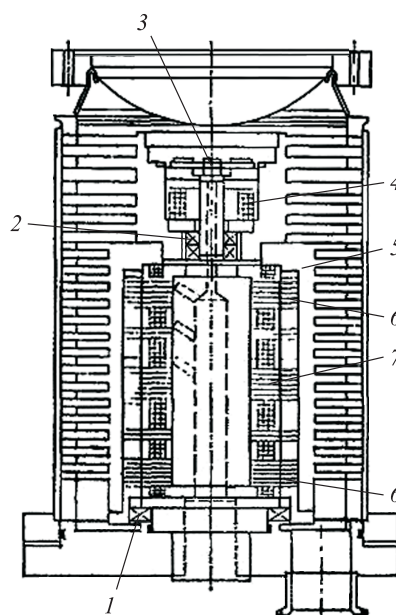


Рис. 8. Конструктивная схема насоса «Турбовак-550М»

1 и 2 — нижняя и верхняя части стержня; 3 — опорный стержень; 4 — осевой магнитный подшипник; 5 — ротор; 6 — радиальные магнитные подшипники; 7 — электродвигатель

недостатков, среди которых ограниченность в размещении насоса в пространстве, необходимость высокоточной балансировки и сложность системы управления электронным блоком.

Существуют также ТМН с модульными конструкциями, например, «Турбовак-1000», изготовленный фирмой «Лейбольд — Хераус» [17]. Модульная конструкция предполагает использование шпиндельного принципа опор, что позволяет проводить балансировку ротора вне насоса. Суть в следующем: есть единый вращающийся модуль (состоящий из ротора, шпинделя и ротора двигателя), который можно извлечь из насоса и выполнить балансировку. Ротор насоса «Турбовак-1000» (рис. 9) насаживается на верхний конец вала шпинделя. На нижнем конце вала шпинделя размещается ротор двигателя. Верхний конец вала шпинделя представляет собой собранный подшипниковый узел. Такая конструкция позволяет насосу работать в любом положении, при этом значительно снижается уровень вибраций всего устройства.

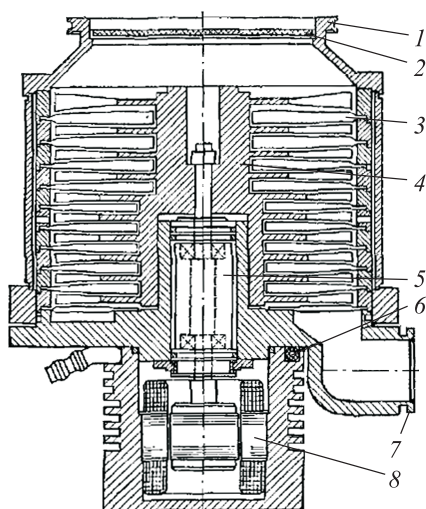


Рис. 9. Конструктивная схема насоса «Турбовак-1000»:

- 1 — фланец; 2 — защитная сетка;
 3 — статорный пакет; 4 — ротор;
 5 — шпиндельный модуль с шарикоподшипниками; 6 — водяное охлаждение; 7 — форвакуумный фланец;
 8 — электропривод

Японской фирмой «Осака Шинку Кики» создан насос типа TG550 с шарикоподшипниковыми опорами ротора. Осевые и молекулярные ступени в этом насосе установлены на валу последовательно. Вакуумный насос работает с большой быстротой действия в области повышенных давлений при выпускном давлении 400...500 Па. Быстрота действия в области сверхвысокого вакуума составляет 500 дм³/с.

По результатам проведенных на данный момент исследований предложен ряд технических решений по совершенствованию селективности откачки, а также по улучшению наиболее значимых параметров насоса: отношение давлений и быстрота действия без увеличения габаритных размеров насоса.

Примером такого решения может служить ТМН, позволяющий увеличить откачиваемый поток газа, а также практически исключить применение масляных форвакуумных насосов [19]. Это становится возможным при использовании в проточной части насоса, а именно в специальных пазах на статорных колесах, адсорбента, охлаждаемого жидким азотом. Предлагается также совместить с помощью такого вспомогательного устройства, как геттерный насос, проточную часть вакуумного ТМН с поглощающим средством откачки. Данная конструкция позволяет получить те же преимущества, а также в определенной степени увеличить селективность откачки ТМН.

Турбомолекулярные насосы барабанного типа. В ТМН барабанного типа газовый поток направлен радиально. Турбомолекулярные насосы такого типа имеют хорошие перспективы дальнейшего развития [6], а также много преимуществ, среди которых следует отдельно выделить

улучшенную характеристику межлопаточного канала. При откачке, когда сторона всасывания находится в центре, а нагнетание — на периферии, значение скорости перемещения канала может увеличиваться в пакете колес в направлении откачки. Однако скорость перемещения канала остается постоянной по всей его длине. При таких условиях на стороне нагнетания обеспечивается максимальная степень отношения давлений, что позволяет проводить более эффективную откачку легких газов — тех, у которых молекулярная масса сравнительно мала.

У данных насосов также есть и недостатки. По сравнению с ТМН с осевым потоком откачиваемого газа у ТМН барабанного типа максимально допустимая окружная скорость барабана несколько ниже. В соответствии с результатами проведенных исследований значения окружной скорости уменьшаются на 15...20 %. Кроме того, негативное влияние на параметры в проточной части насоса оказывает возрастание силовой нагрузки, которая действует на лопатки роторных колес. При прочих равных условиях эти насосы имеют сравнительно малое сопротивление потоку откачиваемого газа по всасывающей магистрали. Их удобно собирать и монтировать в установке. Основные конструктивные схемы вертикальных ТМН барабанного типа приведены на рис. 10.

Турбомолекулярные насосы с направлением потока газа от центра ротора к его периферии (рис. 10, а) имеют меньшее число колес в проточной части за счет обеспечения повышенных значений отношений давлений, создаваемых в размещенных на стороне нагнетания ступенях. Торцевая площадь межлопаточных каналов в таких насосах больше. Это необходимо для компенсации малой окружной скорости на стороне всасывания, что способствует увеличению габаритных размеров ТМН. При такой компоновке насоса размеры рабочего колеса на стороне нагнетания оказывают существенное влияние на габаритные размеры насоса в целом. Для уменьшения габаритных размеров ТМН барабанного типа можно использовать поворот потока газа (рис. 10, б). Благодаря повороту поток газа в данной компоновке насоса движется от периферии к центру, таким образом, на всасывании насоса рабочие колеса имеют максимальную скорость, а на нагнетании — минимальную. Следовательно, отношение давлений, создаваемое на нагнетании одной ступенью, будет значительно ниже, чем в предыдущем случае, т. е. необходимо увеличивать число ступеней в проточной части. Всасывающая магистраль в данной компоновке ТМН мала, это приводит к увеличению сопротивления откачиваемого газа и к увеличению габаритных размеров насоса. Поэтому из приведенных конструктивных схем ТМН барабанного типа выгодно выделяются ТМН с пото-

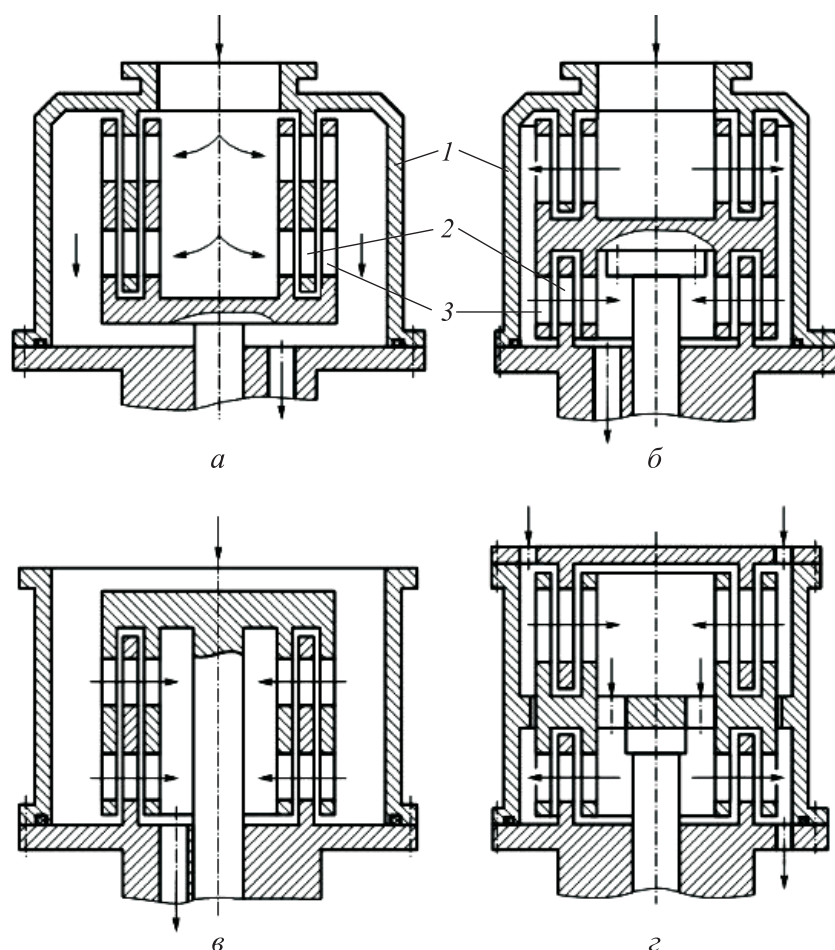


Рис. 10. Конструктивные схемы (а-г) ТМН барабанного типа:
1 — корпус ТМН; 2 — пакет статорных колес; 3 — пакет роторных колес

ком газа, направленным от периферии к центру, и увеличенной полостью всасывания (рис. 10, в) и ТМН, в котором обеспечивается поворот потока газа в одной конструкции (рис. 10, г). Последняя схема может показаться крайне перспективной в силу того, что обеспечивает максимальную окружную скорость рабочих колес как при всасывании, так и нагнетании. Однако она имеет существенный недостаток: обеспечение надежной изоляции зон всасывания и нагнетания представляет собой сложную техническую задачу, поскольку они находятся в непосредственном контакте. Решение этой проблемы самыми простыми способами лишает ТМН подобной компоновки такого преимущества перед МВН, как простота конструкции. Кроме того, радиальные зазоры, значения которых в ТМН относительно высоки, уменьшаются. Из чего следует, что среди приведенных

конструкционных схем ТМН барабанного типа наиболее выгодно выделяется третья схема (см. рис. 10, в). Такая компоновка ТМН делает возможным установку насоса непосредственно в откачиваемом объеме без корпуса, что минимизирует сопротивление потоку газа на всасывании [6].

Имеются данные о разработке по этой схеме насосов НВТ-1000 и НВТ-6300Д, которые, однако, не получили промышленного воплощения.

Комбинированные (гибридные) ТМН. В настоящее время наиболее широкое практическое применение получили высоковакуумные кинетические насосы именно этого типа, а также именно в данной области проводится наибольшее число исследований и разработок. Такое признание получено благодаря широким диапазонам давлений всасывания и довольно высокой скоростью действия по сравнению с МВН. Следует отметить, что по сравнению с обычно необходимыми форвакуумными давлениями ТМН для работы гибридных ТМН требуется более высокое давление. В последнее время наиболее популярны в применении комбинированные ТМН с интегрированной молекулярной, вихревой или молекулярно-вязкостной ступенями. По сравнению с поглощающими насосами разных типов и ТМН такая схема имеет преимущества — отсутствие достаточно сложных азотных систем охлаждения и необходимости регенерации. Все приведенное делает совершенствование гибридных ТМН наиболее приоритетным направлением развития ВМН. Отметим, что гибридные ТМН отличаются множеством вариантов конструкций и применяемых технологических решений. В России и за рубежом такие машины совершенствуются уже на протяжении нескольких десятилетий [20–28].

К недостаткам комбинированных ТМН можно отнести сложность конструкции и наличие небольшого зазора в форвакуумной проточной части.

Несомненными достоинствами комбинированных ТМН, перекрывающими указанные недостатки, являются лучшие откачные характеристики насоса и увеличение диапазона рабочих давлений всасывания благодаря сочетанию проточных частей различных типов. Например, насос имеет две проточные части: турбомолекулярную, размещенную в области высокого вакуума, и молекулярную, расположенную на нагнетании турбомолекулярной проточной части. Вместо молекулярной проточной части можно использовать молекулярно-вязкостную проточную часть [20], быстрота действия которой значительно выше, чем у молекулярной проточной части. На это влияет в первую очередь сама конструкция молекулярно-вязкостной проточной части. Отметим, что существуют кон-

струкции МВН, в которых рабочие каналы выполнены как на роторе, так и на статоре [29], однако, исследований рабочих процессов в проточной части МВН при таком исполнении не приводится.

Благодаря подробному рассмотрению достоинств и недостатков высоковакуумных насосов можно утверждать, что с помощью комбинированных ТМН можно добиться требуемой чистоты вакуума в широком диапазоне скорости действия и рабочих давлений газа, уменьшить габаритные размеры и минимизировать стоимость установки, а также ее энергетические затраты.

В силу того, что разработки гибридных ТМН ведутся уже давно, можно привести некоторую классификацию комбинированных МН:

- ТМН + МВН;
- ТМН + МВН + Вихревой вакуумный насос;
- ТМН + МВН + МВВН;
- ТМН + МВВН;
- ТМН + Дисковый насос;
- МВН + Вихревой насос;
- ТМН с осевым потоком + ТМН с радиальным потоком.

Рассмотрим более подробно первые четыре возможные комбинации гибридных ТМН, а именно насосы с молекулярной вакуумной ступенью.

Работа насоса в молекулярном и вязкостном режимах течения газа осуществляется за счет использования молекулярных ступеней в комбинированных насосах в качестве промежуточных или последних ступеней пакета. Условия сжатия газа от давления $\sim 0,1$ Па, которое обеспечивает движение рабочих колес ТМН в молекулярном режиме течения, до давления $\sim 10^{-3}$ Па, где эффективность молекулярных ступеней резко снижается, определяют число молекулярных ступеней.

Наибольшее распространение получили комбинированные ТМН с интегрированной молекулярной ступенью Хольвека (рис. 11, а) и Холланда — Мартена (рис. 11, б). Исследования комбинированных ТМН фирмы Varian описаны в [30]. Данные о разработке комбинированных ТМН с интегрированной молекулярной ступенью Зигбана (рис. 12) и высокой эффективности данного конструкционного решения приведены в [31].

Основные сложности при проектировании комбинированных ТМН возникают в согласовании работы турбомолекулярной и молекулярной ступеней [31–36]. При откачке ТМН без молекулярных ступеней рабочей среды через некоторое время в вакуумной камере остается достаточно большое количество легких газов. Например, процентное содержание водорода

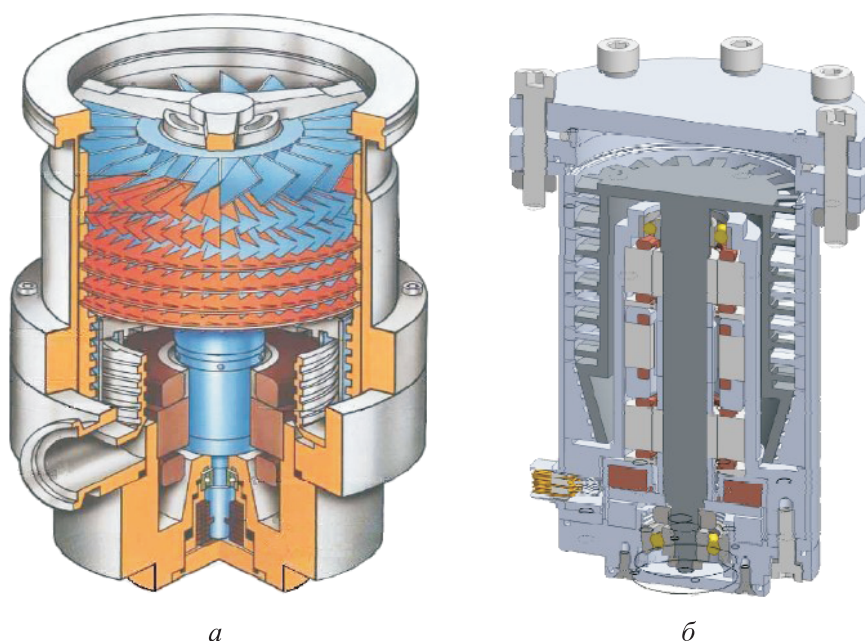


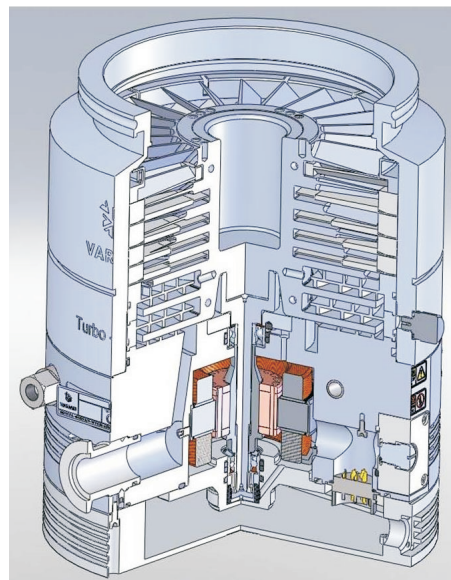
Рис. 11. Комбинированные ТМН:

a — с молекулярной ступенью Хольвека; *б* — с конической молекулярной ступенью Холланда — Мартена

Рис. 12. Комбинированный ТМН с молекулярной ступенью Зигбана (TwisTorr—Varian)

порой составляет 90 %. Все откачные характеристики ТМН в основном рассчитаны для азота или других газов, но не для водорода, в результате чего характеристика насоса значительно ухудшается. Улучшить ее можно, установив в качестве форвакуумных ступеней молекулярные и молекулярно-вязкостные ступени, что позволяет с сохранением в последних колесах

молекулярного режима течения газа разгрузить турбомолекулярные ступени насоса. В результате происходит увеличение давления нагнетания всего насоса, что указывает на фактическое расширение рабочего диапазона давлений всасывания.



В комбинированных ТМН последние ступени работают в вязкостном и переходном режимах течения.

В связи с этим при согласовании их работы возникает ряд технологических и расчетных трудностей при обеспечении быстроты действия проточных частей разных типов. Решить вопросы с быстротой действия можно, установив молекулярно-вязкостную проточную часть вместо молекулярной.

Известна также конструкция вакуумного насоса со ступенью Зигбана — US20100104428A1 (2010 г.) [37] (рис. 13).

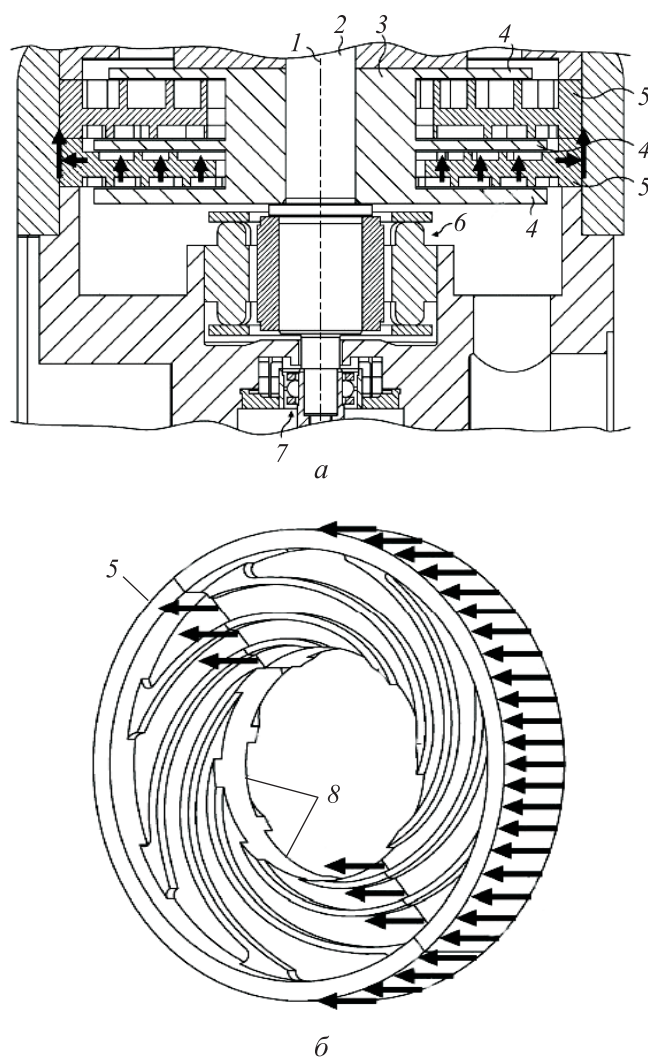


Рис. 13. Конструктивная схема вакуумного насоса с молекулярной ступенью Зигбана (Edwards) (а) и элемент статора механизма (б):

1 — продольная ось; 2 — приводной вал; 3 — рабочее колесо; 4 — роторные элементы насосного механизма Зигбана; 5 — статорный элемент; 6 — двигатель; 7 — комплект подшипников; 8 — проточные каналы

Вакуумный насос может содержать, по меньшей мере, одну турбомолекулярную ступень перед механизмом Зигбана. Такой вакуумный насос может также содержать дополнительные молекулярные ступени или жидкостные ступени после насосного механизма Зигбана. Примеры этих последующих ступеней включают в себя механизмы Хольвека, Геде или ступени регенеративной откачки [37].

Существует вариант ТМН, а именно патент SU1810610A1 (рис. 14), который, помимо турбомолекулярной и молекулярной ступеней, включает в себя дополнительную ступень для улучшения откачных характеристик [38].

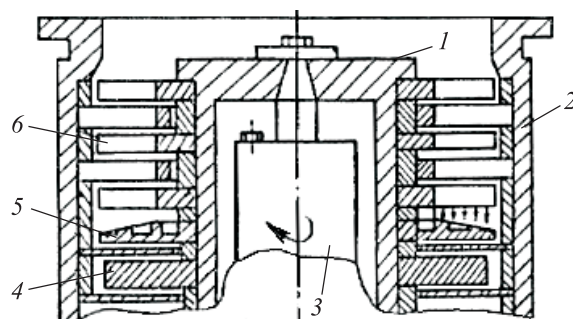


Рис. 14. Конструктивная схема ТМН с дополнительной ступенью в виде усеченного к периферии диска:

1 — ротор; 2 — корпус; 3 — двигатель; 4 и 6 — пакеты молекулярных и осевых колес; 5 — переходная ступень

Конструкция насоса включает в себя корпус, ротор, расположенный соосно с патрубком всасывания, электродвигатель, пакеты осевых и молекулярных колес, находящихся в высоковакуумной и форвакуумной областях, переходную ступень с каналами, окно всасывания молекулярной ступени. Принцип работы насоса следующий: в корпусе насоса создается предварительное разрежение, после чего ротор раскручивается до номинальной частоты вращения, начинается процесс откачки — в высоковакуумной области этому способствует пакет осевых колес, откачанные ими молекулы газа перед тем, как пройти на всасывание молекулярной ступени, попадают на переходную ступень. Тут же, при взаимодействии с каналами, молекулам газа сообщается импульс в направлении окна всасывания молекулярной ступени. Переходная ступень имеет форму усеченного к периферии диска, на наружной поверхности которого выполнены криволинейные каналы, что позволяет улучшить откачные характеристики. Предлагаемая конструкция по сравнению с прототипом уменьшает на 40 % сопротивление на входе в молекулярную ступень.

Можно также упомянуть существующее изобретение — патент RU2543917C1 «Двухпоточный турбомолекулярный вакуумный насос с гибридными проточными частями» (2015 г.) [39] (рис. 15).

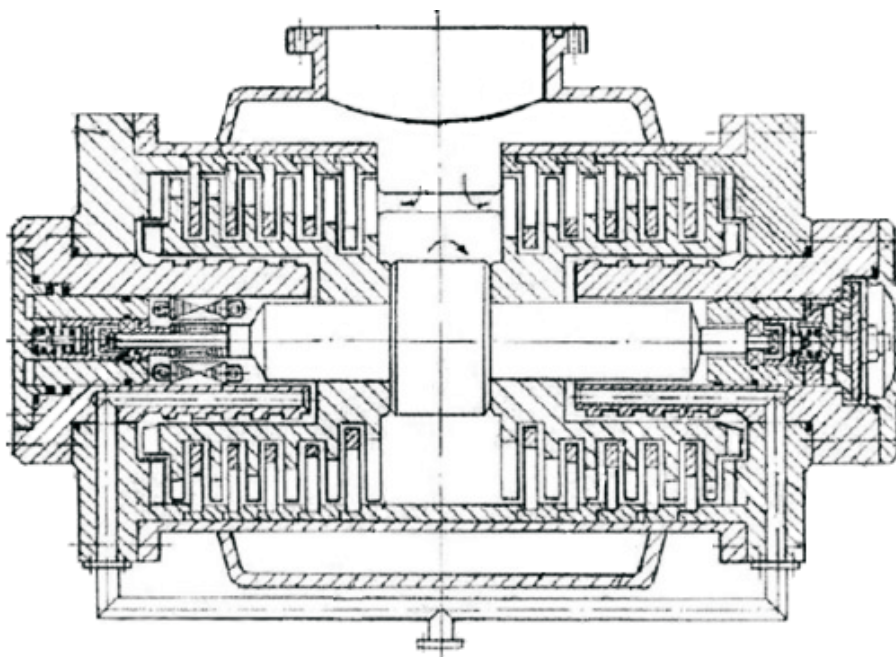


Рис. 15. Конструктивная схема двухпоточного ТМН с гибридными проточными частями

Двухпоточность данного ТМН обеспечивается наличием двух проточных частей и их расположением в корпусе относительно патрубков всасывания. Проточные части располагаются симметрично относительно патрубков всасывания. Каждая проточная часть ТМН такого типа включает в себя три ступени: турбомолекулярную (высоковакуумную), промежуточную и молекулярную, которая располагается на нагнетании проточной части. Статорные и роторные колеса высоковакуумной ступени имеют радиально расположенные лопатки с определенными углами наклона. Лопатки на роторном колесе выполнены зеркально-отраженными лопаткам статорного колеса. Промежуточная ступень образуется двумя концентрично расположенными относительно друг друга молекулярными ступенями, с центром на оси вращения вала. Между стороной нагнетания турбомолекулярной ступени и стороной всасывания второй кольцевой молекулярной ступени находится торцевая поверхность крышки, на которой установлена первая молекулярная ступень. Последняя молекулярная ступень располагается между стороной нагнетания первой молекулярной ступени

и стороной всасывания выходной ступени с формированием потока откачиваемого газа от периферии к центру на сторону всасывания выходной ступени. Повышение степени сжатия становится возможным благодаря пазам первой и второй ступеней, которые оптически закрыты, и развитой структуре межлопаточных пазов, а также приближенным значениям окружной скорости ступеней и окружной скорости роторного диска со стороны нагнетания турбомолекулярной ступени. Выходная ступень представляет собой два эквидистантных цилиндрических участка между внутренней поверхностью (гибридного) ротора и наружной поверхностью корпуса подшипникового узла. На наружной поверхности корпуса узла выполнены многозаходные винтовые канавки.

Наличие указанных отличительных признаков позволяет увеличить степень повышения давления всего насоса в целом, уменьшить обратные потоки и увеличить быстроту действия насоса. Задача данного изобретения — уменьшение предельного остаточного давления, улучшение откачных характеристик вакуумного насоса благодаря увеличению ступеней повышения давлений промежуточной и выходной ступеней, повышение быстроты откачки. Такой насос может работать в периодическом режиме, что обеспечивает экономию электроэнергии, увеличивает срок службы самого форвакуумного насоса, а также улучшает экологические условия окружающей среды.

Известен патент №216.013.6F93 (2015 г.) на однопоточный четырехступенчатый ТМН [40] (рис. 16).

Особенность однопоточного ТМН заключается в наличии в его проточной части четырех ступеней, расположенных последовательно. За первой осевой ступенью I расположена вторая переходная торцевая молекулярная ступень II. Две цилиндрические молекулярные ступени III и IV расположены следом, концентрично напротив друг друга.

В среднем корпусе выполнены цилиндрический выступ, сквозные продольные отверстия, а также радиальные отверстия, которые необходимы для соединения стороны нагнетания ступени IV с системой форвакуумной откачки и нижним корпусом. Статорные диски ступени I и статор расположены на внутренней поверхности внешнего корпуса. Роторные диски ступени I и тонкостенный цилиндр размещены на комбинированном роторе, который консольно закреплен на валу. Ротор электродвигателя закреплен напротив статора электродвигателя на валу, который установлен в подшипниковый узел в среднем корпусе ТМН.

Торцевая поверхность статора выполнена в форме плоского кольца с многозаходными дугообразными пазами, образованными дугами окруж-

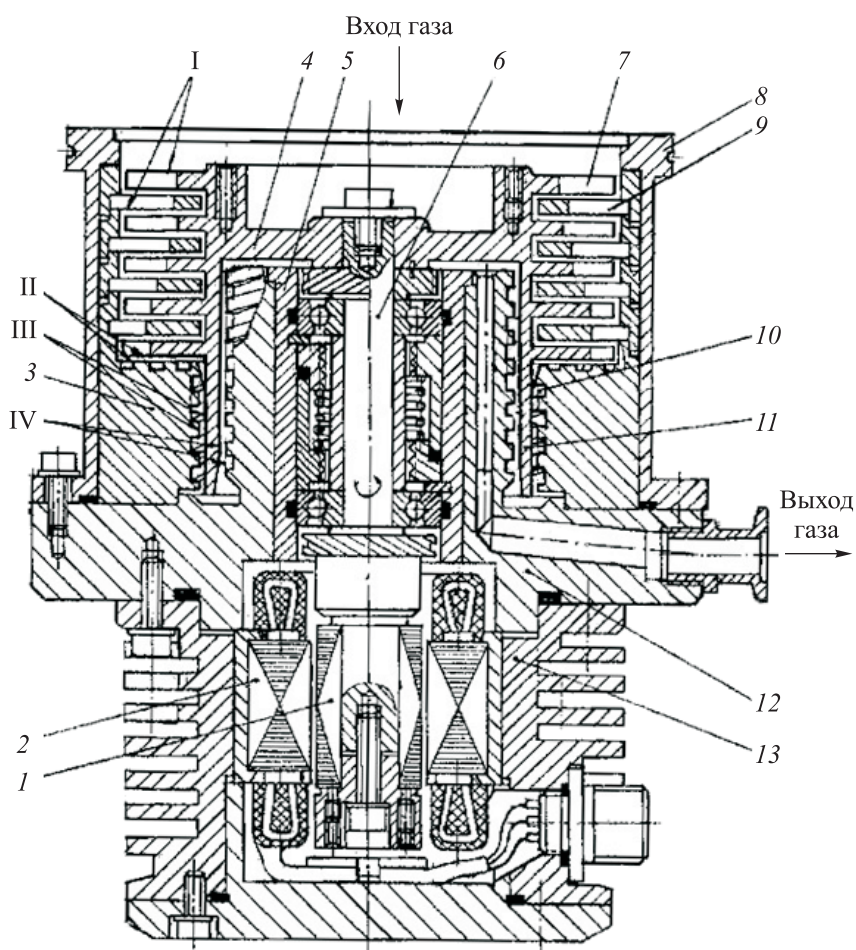


Рис. 16. Конструкционная схема однопоточного четырехступенчатого гибридного ТМН:

- 1 и 2 — ротор и статор электродвигателя; 3 — статор; 4 — комбинированный ротор;
 5 — подшипниковый узел; 6 — вал; 7 и 9 — роторные и статорные диски ступени I;
 8, 12 и 13 — внешний, средний и нижний корпуса; 10 — винтовые канавки;
 11 — полый тонкостенный цилиндр

ностей с центрами, равномерно расположенными на центральной окружности, и с углом наклона против вращения ротора. Цилиндрическая поверхность статора выполнена с многозаходными винтовыми канавками с углом наклона против вращения ротора. Межлопаточные каналы оптически закрыты и образуют переходную торцевую молекулярную ступень.

Такая компоновка ТМН, а именно наличие дополнительной переходной торцевой молекулярной ступени, расположенной в проточной части ТМН, и ее дополнение второй цилиндрической молекулярной ступени

пенью на стороне нагнетания насоса позволит значительно улучшить откачные характеристики ТМН при сохранении массогабаритных параметров.

Снижение вибрационных характеристик, следовательно, и давления на подшипники при прохождении высокочастотным ротором критических скоростей достигается благодаря конструкции подшипникового узла, выполненного с двумя шариковыми радиально-упорными подшипниками с консистентным смазочным материалом, установленными непосредственно на упругих кольцевых элементах. Это обеспечит большую надежность подшипникового узла и насоса. Поскольку два радиально-упорных подшипника выполнены плавающими, то повышается надежность подшипникового узла и насоса — обеспечивается сохранность подшипников в случае несанкционированной осевой силы. Принятые технические решения при разработке данной конструкции насоса позволяют не только продлить срок службы устройства, но и уменьшить затраты на его производство.

Выводы. Проведенный обзор методов математического оптимизационного моделирования ВМН различных типов, экспериментальных исследований, состояния разработок и практического применения ВМН в разных отраслях промышленности позволяет сделать вывод о высоком потенциале ВМН. Область их практического применения широка, поэтому современные инженеры и исследователи разрабатывают математические модели рабочих процессов, методы расчета основных параметров в целях улучшения откачных характеристик ВМН. Перспективы в любом указанном возможном направлении развития ВМН велики [7, 41–47]. Судя по числу разрабатываемых патентов, большинство инженеров придерживается пути создания гибридных ТМН, а также наблюдаются тенденции в области оптимизации ВМН и создания новых оптимальных конструкций. Исследования по созданию новых улучшенных математических моделей рабочих процессов и методов расчета основных откачных характеристик будут способствовать ускорению процесса достижения конструкционного совершенствования современных комбинированных ВМН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Молекулярные потоки в высоковакуумных системах. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [2] Берд Г. Молекулярная газовая динамика. М., Мир, 1981.
- [3] Gaede W. Die Molekularluftpumpe. *Ann. Phys.*, 1913, vol. 346, no. 7, pp. 337–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133460707>

- [4] Леонов Л.Б. О скорости действия турбомолекулярного вакуумного насоса. *Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы*, 1980, № 4, с. 36–39.
- [5] Compact molecular-drag vacuum pump. Patent US 7165931. Appl. 03.01.2005, publ. 02.06.2005.
- [6] Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
- [7] Демихов К.Е., Очков А.А. Математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне давлений. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 200–209. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/1214.0748304>
- [8] Демихов К.Е., Очков А.А., Цакадзе Г.Т. Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 5 (116), с. 98–104. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-5-98-104>
- [9] Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-754>
- [10] Никулин Н.К., Свичкарь Е.В., Соловьев И.В. Молекулярно-вязкостная проточная часть. Патент РФ 164000. Заявл. 16.12.2015, опубл. 20.08.2016.
- [11] Свичкарь Е.В. Разработка математической модели процесса откачки газа и метода расчета откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [12] Никулин Н.К., Свичкарь Е.В., Соловьев И.В. Многопоточный молекулярно-вязкостный вакуумный насос параллельного действия. Патент РФ 169114. Заявл. 15.12.2016, опубл. 03.03.2017.
- [13] Hofmann J., Zipp A. Vacuum pump. Patent US 2295812. Appl. 28.05.2010, publ. 16.03.2011.
- [14] Фролов Е.С., ред. Механические вакуумные насосы. М., Машиностроение, 1989.
- [15] Павлов В.А. Гироскопический эффект, его проявления и использование. Л., Судостроение, 1978.
- [16] Gordon E., Osterstrom V. A new type of turbomolecular vacuum pump bearing. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 1983, vol. 1, no. 2, art. 224. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.572077>
- [17] Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Development of a calculation method of the main parameters of the multistage turbomolecular pump. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 781, art. 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/781/1/012010>
- [18] Вакуумное оборудование. М., ЦИНТИХимнефтемаш, 1981.

- [19] Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Расчет параметров откачной характеристики кинетического высоковакуумного насоса. *Машиностроитель*, 2015, № 2, с. 33–42.
- [20] Naris S., Tantos C., Valougeorgis D. Kinetic modeling of a tapered Holweck pump. *Vacuum*, 2014, vol. 109, pp. 341–348.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.04.006>
- [21] Nishide A., Kaneto S., Ikegami T., et al. Influence of magnetic fields on a large-sized turbomolecular pump. *J. Vac. Sc. Technol.*, 1978, vol. 20, no. 4, art. 1105.
DOI: <https://doi.org/10.1116/1.571578>
- [22] Goetz D.G. Large turbomolecular pumps for fusion research and high-energy physics. *Vacuum*, 1982, vol. 32, no. 10-11, pp. 703–706.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(82\)94052-0](https://doi.org/10.1016/0042-207X(82)94052-0)
- [23] Dushman S. Scientific foundations of vacuum technique. New York, Jhon Wiley & Sons, 1949.
- [24] Ogiwara N., Kanazawa K., Inohara T., et al. Influence of magnetic fields on turbo-molecular pumps. *Vacuum*, 2010, vol. 84, no. 5, pp. 718–723.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.06.029>
- [25] Зотов И.В., Лисиенко В.Г. Усовершенствование методики расчета радиальных активных магнитных подшипников. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2012, т. 8, № 6, с. 54–56.
- [26] Верещагин В.П., Клабуков В.А. Математическая модель магнитного подшипника. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2009, т. 112, № 5, с. 17–22.
- [27] Поляхов Н.Д., Стоцкая А.Д. Об электромагнитных процессах в активных магнитных подшипниках. *Мягкие вычисления и измерения SCM'2012. Тез. докл. междунар. конф.* СПб., 2012, с. 143–145.
- [28] Богданова Ю.В., Гуськов А.М. Моделирование динамики ротора электрошпинделя на магнитных подшипниках. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 1, с. 201–220. DOI: <https://doi.org/10.7463/0115.0753146>
- [29] Bo Z., Zixue G., Quanxin X., et al. Study of optimization and design for disk-type molecular pump based on DSMC method. *IJAPM*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 244–246.
DOI: <https://doi.org/10.7763/IJAPM.2013.V3.213>
- [30] Cozza I.F., Campagna L., Emelli E. A kinetic approach in modelling compact siegbahn molecular drag stages: physical and numerical aspects. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*, 2011. URL: https://www.itep.kit.edu/downloads/7_Cozza.pdf (дата обращения: 15.12.2021).
- [31] Tollner M.E., Spitteler M. Molecular drag pumping mechanism. Patent US 20100104428. Appl. 25.07.2007, publ. 29.04.2010.
- [32] Kimman M.H., Langen H.H., Munnig Schmidt R.H. A miniature milling spindle with active magnetic bearings. *Mechatronics*, 2010, vol. 20, no. 2, pp. 224–235.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.11.010>

- [33] Grzebyk T. MEMS vacuum pumps. *J. Microelectromech. Syst.*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 705–717. DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2676820>
- [34] Sagdeev D.I., Gabitov I.R., Fomina M.G., et al. Viscosity and density of vacuum oils for diffusion pumps. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1385, art. 012058. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1385/1/012058>
- [35] Sagdeev D., Fomina M., Alyaev V., et al. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. *J. Chem. Eng. Data.*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 1698–1705. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00028>
- [36] Waltrich P., Herrmann H. High vacuum pumping system. Patent US 4722191. Appl. 21.07.1987, publ. 02.02.1988.
- [37] Демихова О.А., Демихов Р.К. Турбомолекулярный насос. Патент РФ 1810610. Заявл. 28.06.1991, опубл. 23.04.1993.
- [38] Сергеев В.П., Воронин А.Г. Двухпоточный турбомолекулярный вакуумный насос с гибридными проточными частями. Патент РФ 2543917. Заявл. 24.03.2014, опубл. 10.03.2015.
- [39] Воронин А.Г., Сергеев В.П. Однопоточный четырехступенчатый турбомолекулярный насос. Патент РФ 2560133. Заявл. 10.10.2014, опубл. 20.08.2015.
- [40] Демихов К.Е. Современные направления развития высоковакуумных механических насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5 (98), с. 3–11.
- [41] Клосс Ю.Ю., Мартынов Д.В., Черемисин Ф.Г. Компьютерное моделирование и анализ насоса Хольвека в переходном режиме. *ЖТФ*, 2012, т. 82, № 4, с. 25–30.
- [42] Giors S., Colombo E., Inzoli F., et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1584–1591. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.2178362>
- [43] Шостак Ю.А., Никулин Н.К. Моделирование течения газа в проточной части комбинированного турбомолекулярного насоса с дисковой ступенью. *Вакуумная техника и технология*, 2018, т. 28, № 4, с. 17–21.
- [44] Демихов К.Е., Никулин Н.К. Влияние состава проточной части комбинированного ТМН на его откачные характеристики. *Вакуумная техника, материалы и технология. Матер. V Междунар. науч.-техн. конф.* М., Новелла, 2010, с. 63–68.
- [45] Liu K., Gu X.G., Ba D.C., et al. Numerical research on flow characteristics of vortex stage in dry high vacuum pump. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 32, pp. 127–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.529>
- [46] Демихов К.Е., Очков А.А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 5 (110), с. 89–95. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-5-89-95>

[47] Демихов К.Е., Очков А.А. Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 6 (117), с. 134–143.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-6-134-143>

Очков Андрей Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Очков А.А. Перспектива создания современных высоковакуумных механических насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 1 (140), с. 103–137. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-103-137>

PROSPECTS FOR DEVELOPING MODERN HIGH-VACUUM MECHANICAL PUMPS

A.A. Ochkov

aochkov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

High-vacuum mechanical pumps are widely used in various fields of science and technology for research and industrial applications. Modern high-vacuum mechanical pumps include molecular vacuum pumps, turbomolecular vacuum pumps and hybrid turbomolecular vacuum pumps, i.e., designs that represent a turbomolecular vacuum pump with one or more additional molecular stages. There are also a number of experimental and theoretical developments that propose combinations of different types of high-vacuum pumps in which, as a rule, on the suction side the main pumping is carried out by an axial turbomolecular stage. These schemes belong to the class of modern high-vacuum mechanical pumps. The paper examines the designs and analyzes scientific studies of modern high-vacuum mechanical pumps. Relying on this overview, we found the unsolved problems of designing and mathematical modeling of high-vacuum mechanical pumps working processes, which could give further prospects for vacuum technology development

Keywords

High vacuum mechanical pumps, turbomolecular vacuum pumps, molecular vacuum pumps, optimization, pumping characteristics

Received 13.07.2021

Accepted 26.08.2021

© Author(s), 2022

The study was carried out with the financial support of the RFBR (project no. 20-18-50177)

REFERENCES

- [1] Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Molekulyarnye potoki v vysokovakuumnykh sistemah [Molecular fluxes in high vacuum systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013.
- [2] Bird G.A. Molecular gas dynamics. Oxford University Press, 1976.
- [3] Gaede W. Die Molekularluftpumpe. *Ann. Phys.*, 1913, vol. 346, no. 7, pp. 337–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133460707>
- [4] Leonov L.B. On working speed of turbomolecular vacuum pump. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, 1980, no. 4, pp. 36–39 (in Russ.).
- [5] Compact molecular-drag vacuum pump. Patent US 7165931. Appl. 03.01.2005, publ. 02.06.2005.
- [6] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010.
- [7] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Mathematical model of pumping gas process by the cylindrical molecular vacuum pump in the wide range of pressures. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 12, pp. 200–209 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/1214.0748304>
- [8] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Tsakadze G.T. A technique for computing optimum parameters of a combined molecular drag vacuum pump. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 5 (116), pp. 98–104 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-5-98-104>
- [9] Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Prospects in combined turbomolecular vacuum pumps development. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 5 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-754>
- [10] Nikulin N.K., Svichkar' E.V., Solov'yev I.V. Molekulyarno-vyazkostnaya protochnaya chast' [Molecular-viscous flow path]. Patent RU 164000. Appl. 16.12.2015, publ. 20.08.2016 (in Russ.).
- [11] Svichkar' E.V. Razrabotka matematicheskoy modeli protsessa otkachki gaza i metoda rascheta otkachnykh parametrov molekulyarno-vyazkostnogo vakuumnogo nasosa v molekulyarno-vyazkostnom rezhime techeniya gaza. Dis. kand. tekhn. nauk [Development of mathematical model of gas pump process and method for calculating pump parameters of viscous-molecular pump in viscous regime of gas flow. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2017 (in Russ.).
- [12] Nikulin N.K., Svichkar' E.V., Solov'yev I.V. Mnogopotochnyy molekulyarno-vyazkostnyy vakuumnyy nasos parallel'nogo deystviya [Multi-thread molecular viscosity vacuum pump of parallel action]. Patent RU 169114. Appl. 15.12.2016, publ. 03.03.2017 (in Russ.).

- [13] Hofmann J., Zipp A. Vacuum pump. Patent US 2295812. Appl. 28.05.2010, publ. 16.03.2011.
- [14] Frolov E.S., ed. Mekhanicheskie vakuurnnye nasosy [Mechanical vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [15] Pavlov V.A. Girokopieskiy effekt, ego proyavleniya i ispol'zovanie [Gyroscopic effect, its occurrence and application]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978.
- [16] Gordon E., Osterstrom V. A new type of turbomolecular vacuum pump bearing. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 1983, vol. 1, no. 2, art. 224.
DOI: <https://doi.org/10.1116/1.572077>
- [17] Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Development of a calculation method of the main parameters of the multistage turbomolecular pump. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 781, art. 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/781/1/012010>
- [18] Vakuurnnoe oborudovanie [Vacuum equipment]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1981.
- [19] Svichkar' E.V., Nikulin N.K., Demikhov K.E. Dimensioning of the pumping characteristics of the kinetic high-vacuum pump. *Mashinostroitel'*, 2015, no. 2, pp. 33–42 (in Russ.).
- [20] Naris S., Tantos C., Valougeorgis D. Kinetic modeling of a tapered Holweck pump. *Vacuum*, 2014, vol. 109, pp. 341–348.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.04.006>
- [21] Nishide A., Kaneto S., Ikegami T., et al. Influence of magnetic fields on a large-sized turbomolecular pump. *J. Vac. Sc. Technol.*, 1978, vol. 20, no. 4, art. 1105.
DOI: <https://doi.org/10.1116/1.571578>
- [22] Goetz D.G. Large turbomolecular pumps for fusion research and high-energy physics. *Vacuum*, 1982, vol. 32, no. 10–11, pp. 703–706.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(82\)94052-0](https://doi.org/10.1016/0042-207X(82)94052-0)
- [23] Dushman S. Scientific foundations of vacuum technique. New York, Jhon Wiley & Sons, 1949.
- [24] Ogiwara N., Kanazawa K., Inohara T., et al. Influence of magnetic fields on turbomolecular pumps. *Vacuum*, 2010, vol. 84, no. 5, pp. 718–723.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.06.029>
- [25] Zotov I.V., Lisenko V.G. Improvement of the design procedure of the radial active magnetic bearings. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2012, vol. 8, no. 6, pp. 54–56 (in Russ.).
- [26] Vereshchagin V.P., Klabukov V.A. Mathematical model of magnetic bearing. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM* [Electromechanical Matters. VNIEM Studies], 2009, vol. 112, no. 5, pp. 17–22 (in Russ.).
- [27] Polyakhov N.D., Stotskaya A.D. [On electromagnetic processes in active magnetic bearings]. *Myagkie vychisleniya i izmereniya SCM'2012. Tez. dokl. mezhdunar. konf.* [Soft Calculations and Measurements SCM'2012. Abs. Int. Conf.]. St. Petersburg, 2012, pp. 143–145 (in Russ.).

- [28] Bogdanova Yu.V., Gus'kov A.M. Modeling the rotor dynamics of electrospindle on magnetic bearings. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 1 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.7463/0115.0753146>
- [29] Bo Z., Zixue G., Quanxin X., et al. Study of optimization and design for disk-type molecular pump based on DSMC method. *IJAPM*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 244–246.
DOI: <https://doi.org/10.7763/IJAPM.2013.V3.213>
- [30] Cozza I.F., Campagna L., Emelli E. A kinetic approach in modelling compact siegbahn molecular drag stages: physical and numerical aspects. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*, 2011. Available at: https://www.itep.kit.edu/downloads/7_Cozza.pdf (accessed: 15.12.2021).
- [31] Tollner M.E., Spitteler M. Molecular drag pumping mechanism. Patent US 20100104428. Appl. 25.07.2007, publ. 29.04.2010.
- [32] Kimman M.H., Langen H.H., Schmidt M.R.H. A miniature milling spindle with active magnetic bearings. *Mechatronics*, 2010, vol. 20, no. 2, pp. 224–235.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.11.010>
- [33] Grzebyk T. MEMS vacuum pumps. *J. Microelectromech. Syst.*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 705–717. DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2676820>
- [34] Sagdeev D.I., Gabitov I.R., Fomina M.G., et al. Viscosity and density of vacuum oils for diffusion pumps. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1385, art. 012058.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1385/1/012058>
- [35] Sagdeev D., Fomina M., Alyaev V., et al. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. *J. Chem. Eng. Data.*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 1698–1705.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00028>
- [36] Waltrich P., Herrmann H. High vacuum pumping system. Patent US 4722191. Appl. 21.07.1987, publ. 02.02.1988.
- [37] Demikhova O.A., Demikhov R.K. Turbomolekulyarnyy nasos [Turbomolecular pump]. Patent RU 1810610. Appl. 28.06.1991, publ. 23.04.1993 (in Russ.).
- [38] Sergeev V.P., Voronin A.G. Dvukhpotochnyy turbomolekulyarnyy vakuurnyy nasos s gibridnymi protochnymi chastyami [Two-flow turbomolecular vacuum pump with hybrid air-gas channels]. Patent RU 2543917. Appl. 24.03.2014, publ. 10.03.2015 (in Russ.).
- [39] Voronin A.G., Sergeev V.P. Odnopotochnyy chetyrehstupenchatyy turbomolekulyarnyy nasos [Single-flow four-stage turbomolecular pump]. Patent RU2560133. Appl. 10.10.2014, publ. 20.08.2015 (in Russ.).
- [40] Demikhov K.E. Current trends of high-vacuum pumps. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2014, no. 5 (98), pp. 3–11 (in Russ.).
- [41] Kloss Yu.Yu., Martynov D.V., Cheremisin F.G. Computer simulation and analysis of the Holweck pump in the transient regime. *Tech. Phys.*, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 451–456.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784212040159>

[42] Giors S., Colombo E., Inzoli F., et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1584–1591. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.2178362>

[43] Shostak Yu.A., Nikulin N.K. Modeling of gas flow in a path of combined turbomolecular pump with disk stage. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 17–21 (in Russ.).

[44] Demikhov K.E., Nikulin N.K. [Effect of flow path structure of combined TMN on its pump characteristics]. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya. Mater. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Vacuum Technics, Materials and Technology. Proc. V Int. Sc.-Tech. Conf.]. Moscow, Novella Publ., 2010, pp. 63–68 (in Russ.).

[45] Liu K., Gu X.G., Ba D.C., et al. Numerical research on flow characteristics of vortex stage in dry high vacuum pump. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 32, pp. 127–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.529>

[46] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Effective range of gas pressure at the suction side of the turbomolecular vacuum pump. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 5 (110), pp. 89–95 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-5-89-95>

[47] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Universal mathematical model of degassing process by molecular vacuum pump. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 6 (117), pp. 134–143 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-6-134-143>

Ochkov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ochkov A.A. Prospects for developing modern high-vacuum mechanical pumps. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 1 (140), pp. 103–137 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-103-137>