



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА

ЗАОЧНЫЙ
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

МОСКВА • МАШИНОСТРОЕНИЕ • 1980

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I. Насосы для получения низкого и среднего вакуума . . .	3
1. Объемные вакуум-насосы	3
2. Лопаточные вакуум-насосы	23
Раздел II. Насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума	25
Вопросы для самопроверки	52
Список литературы	52

Владислав Диомидович ЛУБЕНЕЦ,
Владимир Иванович ВАСИЛЬЕВ,
Инна Владиславовна АВТОНОМОВА,
Лев Алексеевич БЕЛЯЕВ

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Редактор Ф.Г. Тубянская
Технический редактор Л.В. Наделяева
Корректор Е.П. Утанина

Подписано в печать 8.04.80

Т — 06654

Формат 60x90 1/16

Бумага офсетная №1

Ротапринт

Усл. печ. л. 3,25

Уч. -изд. л. 3,4

Тираж 1500 экз.

Заказ 2745 Бесплатно

Издательство "Машиностроение", 107076, Москва, Б-76,
Стромынский пер., 4

Московская типография №9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

Москва, Волочаевская ул., 40

Авторы: В.Д. Лубенец, В.И. Васильев и И.В. Автономова (раздел I),
Л.А. Беляев (раздел II)

Редакционно-методический совет

Н.И. Глотов, А.В. Ерюкин, В.Я. Плисковский, Л.Н. Розанов (научный редактор), Л.Г. Садиков (ответственный за выпуск), Г.Л. Саксаганский (председатель), А.Б. Цейтлин (рецензент)

Механические вакуумные насосы/В.Д. Лубенец, В.И. Васильев,
И.В. Автономова, Л.А. Беляев. — М.: Машиностроение, 1980. — 52 с.

В первом разделе лекции — "Насосы для получения низкого и среднего вакуума" — освещены вопросы конструирования и расчета механических вакуумных насосов различных типов, приведена их классификация; кратко описаны конструктивные особенности и принцип действия; дана оценка перспективы развития серийно выпускаемых вакуумных насосов.

Во втором разделе "Насосы для получения высокого и сверхвысокого вакуума" наряду с краткими сведениями по устройству и эксплуатационным данным выпускаемых и разрабатываемых механических насосов высокого и сверхвысокого вакуума рассмотрены вопросы классификации, анализа рабочего процесса, расчета и конструирования перспективных молекулярных и турбомолекулярных насосов.

Материал лекции рассчитан на инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, изготовлением и эксплуатацией вакуумных установок, насосов и оборудования различного целевого назначения.

Табл. 6, ил. 18, список лит. 20 назв.

Выпущено по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР ЦП НТО Приборпром им. акад. С.И. Вавилова, 1980 г.

Раздел I

НАСОСЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО ВАКУУМА

1. ОБЪЕМНЫЕ ВАКУУМ-НАСОСЫ

Объемные вакуумные насосы (ВН) делятся на поршневые, ротационные, роторно-поршневые, жидкостно-кольцевые, мембранные и перистальтические.

Поршневые вакуум-насосы. В поршневых ВН откачка газа осуществляется вследствие периодического изменения объема цилиндра. Поршень вытесняет газ, создавая при обратном ходе разрежение со стороны откачиваемой системы. Поршневые ВН разделяются на сухие и мокрые. Сухие ВН откачивают газ, а мокрые — газожидкостные смеси. Для предотвращения гидравлического удара у мокрых ВН относительное мертвое пространство и размеры газораспределительных органов больше, чем у сухих. Поэтому у мокрых ВН предельное давление всасывания больше. Поршневые ВН могут быть изготовлены с цилиндрами простого или двойного действия, крейцкопфного или бескрейцкопфного типа, с водяным или воздушным охлаждением. Привод ВН может осуществляться с помощью понижающей передачи (редуктор, ременная передача и др.) или непосредственно от электродвигателя. Если разрежение в одной ступени поршневого ВН является недостаточным, то устанавливаются последовательно две машины, причем каждая из них может быть использована самостоятельно при параллельной работе. Для создания относительно небольших разрежений могут быть использованы обычные поршневые компрессоры с самодействующими клапанами. Предельное остаточное давление $p_{в\ min} \approx 40 \dots 100$ мм рт. ст. будет определяться жесткостью пружины всасывающего клапана, величиной мертвого пространства цилиндра и герметичностью рабочей полости.

Для получения более глубокого вакуума применяется перепуск газа из одной полости цилиндра в другую в конце хода поршня с помощью перепускных каналов. Перепуск газа может осуществляться в полость картера ВН. Газораспределение в этом случае происходит с помощью самодействующих всасывающих и нагнетающих клапанов, а перепуск — с помощью перепускных каналов, выполненных на зеркале цилиндра в мертвых точках. В верхней мертвой точке газ из рабочей полости перепускается в картер, в нижней мертвой точке наоборот — из картера в полость цилиндра. Недостатком данной конструкции ВН является обязательная герметизация картера.

Золотниковое распределение в отличие от клапанного позволяет получить большую величину вакуума. Однако конструктивно ВН с золотниковым распределением более сложны. Различают три типа золотникового газораспределения: а) с плоским золотником; б) с круглым золотником кранового типа; в) с круглым золотником поршневого типа.

Вакуум-насос с плоским золотником (рис.1,а). Поршень 2 и золотник 5 приводятся в движение от одного кривошипно-шатунного механизма 8. Золотник осуществляет газораспределение и перепуск газа. Плоский золотник совершает

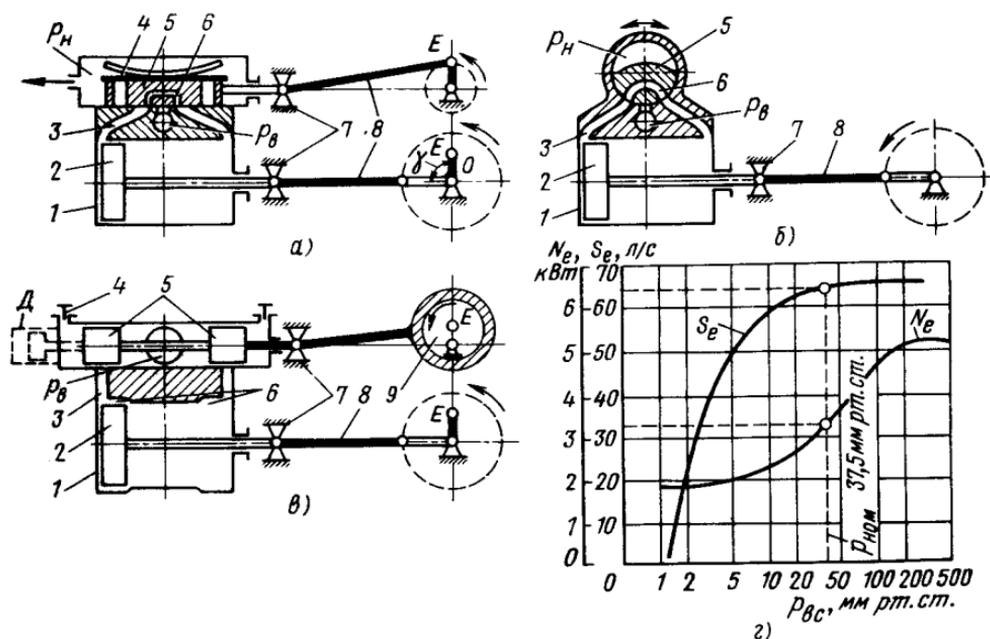


Рис. 1. Схемы поршневых ВН с золотниковым распределением:
 а — ВН с плоским золотником;
 б — ВН с круглым золотником кранового типа;
 в — ВН с круглым золотником поршневого типа;
 г — пример рабочей характеристики 3ВНП-3

возвратно-поступательное движение и отстает по фазе от возвратно-поступательного движения поршня на угол γ от 90° до 105° . Таким образом, если поршень находится в крайних мертвых точках, то золотник занимает среднее положение и сообщает обе полости цилиндра 1. При этом происходит перепуск газа через цилиндрические каналы 3 и внутреннюю полость золотника 6. При движении поршня вправо из ВМТ к НМТ золотник сообщает левую полость цилиндра со всасывающим патрубком, а правую с нагнетательным клапаном. В НМТ поршня золотник снова займет среднее положение, отсоединит полости цилиндра от всасывания и нагнетания. После этого происходит перепуск газа, и процесс откачки повторяется. Для уменьшения потребляемой мощности на золотнике установлены самодействующие нагнетательные клапаны 4 пластинчатого типа. Предельное давление достигает 6 мм рт. ст. в одноступенчатых и $1,5 \cdot 10^3$ мм рт. ст. в двухступенчатых ВН. Из выпускавшихся ВН с плоским золотником необходимо прежде всего отметить ВНП-3.

Существенным недостатком ВН с плоским золотником является их тихоходность. Они имеют большую удельную массу и большие потери на трение. Средняя скорость поршня обычно не превышает 1 м/с, а золотника $\sim 0,3$ м/с. Большие скорости скольжения плоского золотника приводят к чрезмерному износу рабочих поверхностей и ко внутренним перетеканиям газа. В результате этого ухудшается предельный вакуум, уменьшается производительность и возрастают механические потери.

Вакуум-насос с круглым золотником кранового типа. На рис. 1,6 показана кинематическая схема такого ВН. Круглый цилиндрический золотник совершает возвратно-колебательные движения и приводится от крейцкопфа 7 или коленчатого вала. Принцип действия данного ВН тот же, что и ВН с плоским золотником. Для уменьшения отрицательного влияния мертвого пространства вместо одного золотника ставят два, расположенных в непосредственной близости от мертвых точек. В круглом золотнике имеется устройство, позволяющее компенсировать износ рабочих поверхностей и тем самым повысить долговечность работы ВН. Это является достоинством данной схемы.

Вакуум-насос с круглым золотником поршневого типа системы МВТУ. Повысить быстроходность поршневого ВН в 2,0 — 2,5 раза можно в случае применения круглого золотника поршневого типа. Такой золотник, снабженный поршневыми кольцами, хорошо герметизирует рабочие полости и компенсирует износ трущихся пар. Каждой полости цилиндра соответствует своя полость золотниковой коробки, снабженная самодействующим нагнетательным клапаном.

Объем золотниковой коробки в 5—7 раз меньше объема полости цилиндра. Перепуск газа осуществляется через перепускные каналы 6, расположенные вблизи мертвых точек поршня. Привод золотника осуществляется от эксцентрика 9, консольно расположенного на конце коленчатого вала (рис. 1,в). Отличительной особенностью данной конструкции ВН является то, что при малых давлениях всасывания золотниковая полость выполняет роль второй ступени сжатия. Это дает возможность получения более глубокого вакуума. Переход с одноступенчатого режима работы к двухступенчатому и наоборот осуществляется автоматически. Минимальное остаточное давление равно 3 мм рт. ст. (0,4 кПа).

На рис. 1,в пунктиром слева показан дополнительный цилиндр ступени сжатия простого действия Д, поршень которого приводится в движение от золотника. По такой схеме построен 2ДВНП-6, создающий остаточное давление $\sim 0,3$ мм рт. ст. Привод ВН осуществляется через клиноременную передачу от двигателя, установленного на насосе. Смазка ВН производится компрессорным маслом КС-19 ГОСТ 9243—75 или МС-20.

Зависимость быстроты действия и потребляемой мощности от давления всасывания для 3ВНП-3 показана на рис. 1,г, а основные характеристики отечественных поршневых ВН даны в табл. 1.

Для отсасывания насыщенных паров растворов из вакуум-аппаратов применяются мокрые ВН 2ВНК-3МА и 2ВНК-3МБ. Перед входом в ВН пары предварительно конденсируются в специальном конденсаторе. Эти ВН не пригодны для работы на сухом газе и для откачки паровоздушных смесей, не имеющих капельной влаги.

Ротационные вакуум-насосы. Конструкции объемных вакуум-насосов РВН отличаются большим разнообразием, чем любой другой тип ВН. РВН подразделяются на ВН с обкатываемыми профилями, жидкостнокольцевые, пластинчатые, с катящимся ротором и перистальтические. У РВН отсутствуют всасывающие, а у многих из них и нагнетательные клапаны, что является существенным преимуществом, так как упрощается конструкция и повышается надежность работы. За счет большой частоты вращения ротора РВН при сравнительно малых размерах обладают большой быстротой откачки. Почти все РВН полностью уравновешены, обеспечивают равномерность откачки газа. У большинства РВН откачиваемый газ не загрязняется смазкой. Если степень повышения давления в одной ступени ВН является недостаточной, то устанавливаются последовательно две или три ступени и каждая может быть использована самостоятельно. Для уменьшения времени откачки РВН могут переключаться с последовательной работы на параллельную. К недостаткам РВН относятся: протечки газа через зазоры и высокий уровень шума при работе.

Вакуум-насос с обкатываемыми профилями. У ВН с обкатываемыми профилями основным органом яв-

Основные характеристики отечественных поршневых ВН

	Наименование параметров			Сухие ВН		Мокрые ВН	
	ЗВНП-3	ВНП-6	2ДНВП-6	2ВНК-3МА	2ВНК-3МБ		
1. Быстрота действия при давлении всасывания:	63±6	100±10	—	60*	60*		
37,5 мм рт. ст., л/с	—	—	100±10	—	—		
7,5 мм рт. ст., л/с	3	3	0,3	37,5	37,5		
2. Остаточное давление (не более), мм рт. ст.	787,5	787,5	825	802,5	802,5		
3. Выпускное давление (не более), мм рт. ст.	3,6	7,2	7,2	2,8	2,8		
4. Номинальная частота вращения, с ⁻¹	3,2	6,3	—	5,5**	7,5**		
5. Потребляемая мощность при давлении всасывания:	—	—	3,7	—	—		
37,5 мм рт. ст., кВт	8	11	14	—	—		
7,5 мм рт. ст., кВт	0,14	0,22	0,25	—	—		
6. Расход масла на смазку цилиндров и сальников, мг/с	840	840	900	(900)	(1035)		
7. Номинальный расход воды при t не выше 30° С, л/с	1,430	1,430	1,770	(2,500)	(2,500)		
8. Масса насоса с электродвигателем (установки), кг	0,795	0,795	0,795	(0,710)	(0,710)		
9. Габариты насоса (установки):	0,925	0,925	0,925	(0,900)	(0,900)		
длина, м							
ширина, м							
высота, м							

* По описанному объему

** Мощность электродвигателя

ляется неподвижный корпус, в котором равномерно вращаются роторы. Профили зубьев роторов очерчены специально подобранными кривыми таким образом, чтобы при внешнем зацеплении и взаимной обкатке они сопрягались теоретически беззазорно. При вращении роторы ВН не касаются корпуса и друг друга, что обеспечивается зазорами (радиальными, боковыми, торцовыми), подшипниками и синхронизирующей передачей. В некоторых конструкциях маслозаполненных РВН синхронизирующая передача отсутствует и, следовательно, роторы соприкасаются профильными поверхностями. Газораспределение осуществляется непосредственно роторами. Наибольшее распространение получили РВН с двумя роторами, хотя принципиально возможны конструкции с тремя и более валами.

Двухроторные вакуум-насосы с внешним сжатием. У ВН с внешним сжатием газ сжимается только в процессе его нагнетания. Рабочий процесс таких ВН менее совершенен, и их применяют в том случае, когда потери от внешнего сжатия становятся незначительными по сравнению с другими видами потерь.

Наиболее известным ВН данного типа является двухроторный ВН типа Рутс (рис. 2, а). Он состоит из корпуса 1, в котором вращаются два одинаковых по профилю ротора 2, двух торцовых крышек, подшипников, синхронизирующей передачи и сальников (последние на рисунке не показаны). Откачка и сжатие газа происходят вследствие заполнения газом образуемой в ВН рабочей камеры, которая переносится без сжатия из полости всасывания в полость нагнетания. После сообщения рабочей камеры с нагнетанием давление в ней возрастает за счет газа, перетекающего из нагнетательного окна.

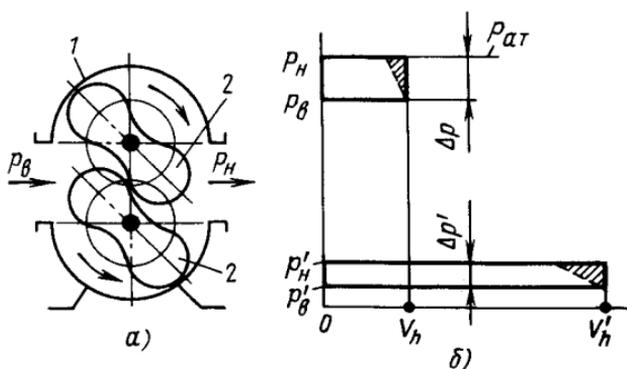


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и теоретическая индикаторная диаграмма (б) ВН типа Рутс

Основные достоинства двухроторных ВН с внешним сжатием: большая производительность, отсутствие масла в сжимаемом газе, полная уравнированность, быстроходность, равномерность откачки газа, надежность и долговечность.

К недостаткам машин данного типа относятся: небольшая степень повышения давления, несовершенство процесса сжатия, более высокая температура газа на нагнетании и высокий уровень шума.

Быстрота действия ВН типа Рутс находится в пределах 0,3...28000 л/с. Степень повышения давления в ВН, работающих в эксгаустерном режиме, не превышает 1,4...1,8 мм рт. ст. (допустимый вакуум не более 225...337 мм рт. ст.), а в вакуумном режиме при работе в области среднего вакуума ~ 50 и более. ВН с внешним сжатием применяются в металлургической, химической и пищевой промышленности. Теоретическая индикаторная диаграмма ВН типа Рутс примерно имеет форму прямоугольника (рис. 2,б — верхняя диаграмма для эксгаустерного, а нижняя для вакуумного режима). Для сравнения пунктиром показана кривая сжатия в ВН с внутренним сжатием, заштрихованная площадка характеризует дополнительную работу. Из рис. 2,б видно, что при одинаковых относительных потерях от внешнего сжатия уменьшение давления всасывания приводит либо к увеличению объемной производительности ВН, либо к снижению разности давлений $\Delta p = p_H - p_B$, либо к частичному изменению обоих параметров. При этом отношение давлений τ возрастает.

Роторы типа Рутс имеют две-три лопасти, как правило, прямозубые. Диаметр ротора колеблется от 18 до нескольких сотен миллиметров. Окружная скорость вращения определяется в основном прочностью роторов и тепловым режимом и не превышает 40 м/с. Максимальная скорость вращения в отдельных экспериментах доходила до 100 м/с. При повышении частоты вращения роторов относительные внутренние перетечки уменьшаются, а уровень шума резко возрастает. Зазор между роторами и корпусом не превышает 0,0015...0,0025 наружного радиуса ротора, а между роторами и торцовыми крышками зазор выполняется приблизительно в 1,5 раза больше.

Для нормальной работы ВН большое значение имеет режим охлаждения. Особенно это относится к бустерным ВН, у которых с нагнетаемым газом отводится незначительное количество тепла. Охлаждение роторов ВН средней и большой производительности осуществляется специальным холодильником, установленным в нагнетательном окне в непосредственной близости от роторов, либо подаваемым внутрь роторов маслом. Роторы ВН малой производительности обычно не охлаждаются, а корпус имеет воздушное охлаждение.

Выпускаются двухроторные ВН типа Рутс с воздушным охлаждением и с непосредственным приводом от электродвигателя

для работы в эксгаустерном режиме двух исполнений: 1А — для откачки воздуха и газов, не агрессивных к маслу, и 1Г — для откачки воздуха, инертных и токсичных газов.

Быстрота действия ВН находится в пределах от 6,5 до 400 л/с. Максимальный допустимый вакуум 337 мм рт. ст. Широкое распространение получили ВН типа Рутс для работы в области низкого и среднего вакуума. При уменьшении рабочего давления протечки через зазоры снижаются, а коэффициент откачки возрастает. Выпускаются ВН для работы в интервале давлений всасывания $1 - 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. быстротой откачки от 5 до 150 л/с (рис. 3). Полное остаточное давление одноступенчатых ВН $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., а двухступенчатых $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Парциальное давление одноступенчатого ВН по воздуху — от $1 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Наибольшее выходное рабочее давление — от 1 до 10 мм рт. ст. Роторы — прямозубые, двухлопастные. Эти ВН предназначены для использования в агрегатах типа АВР-50 и АВР-150 с ВН предварительного разрежения, смонтированными на общем основании. Двухроторные ВН типа 2ДВН-500 и 2ДВН-1500 с быстротой действия 500 и 1500 л/с комплектуются маслозаполненными ВН предварительной откачки типа ВН-4Г и ВН-6Г (соответственно) и предназначены для откачки воздуха и неагрессивных взрывоопасных газов, не содержащих твердых взвешенных частиц. Роторы — двухлопастные, пустотелые, литые, чугунные, с залитым стальным валом. Полное остаточное давление $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., а остаточное давление примерно на два порядка ниже.

Дальнейшее развитие ВН типа Рутс должно идти по линии совершенствования рабочего процесса, повышения экономичности, увеличения быстроходности, расширения диапазона давлений, совершенствования технологии изготовления, применения неметаллических материалов для основных рабочих органов, увеличения ресурса работы и снижения уровня шума.

Двухроторные вакуум-насосы с частичным внутренним сжатием (ВНЧС). В ВНЧС осуществляется внутреннее сжатие до 70–80% всасываемого газа. Остальной

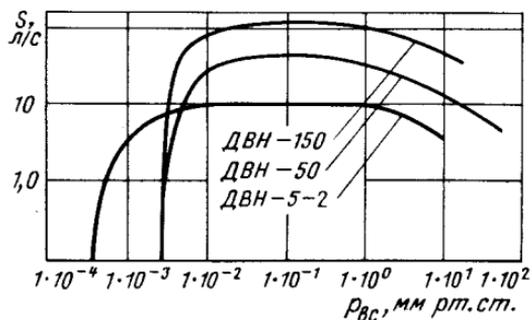


Рис. 3. Быстрота действия двухроторных ВН типа Рутс в функции давления всасывания

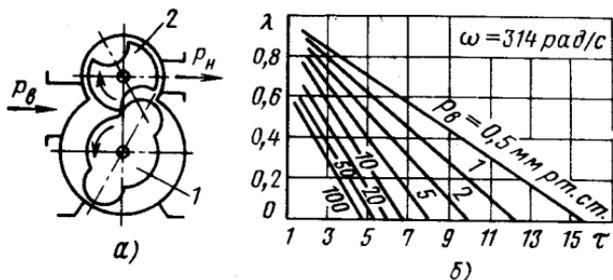


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и характеристика (б) ВНЧС:

1 — ведущий ротор; 2 — ведомый ротор

газ переносится со всасывания на нагнетание без внутреннего сжатия. Конструктивная схема ВНЧС аналогична конструктивной схеме ВН типа Рутс; однако у ВНЧС роторы неодинаковые и нагнетательное окно расположено в пределах расточки под ведомый ротор (рис. 4,а). Профиль выступа (впадины) ротора делается симметричным круговым или асимметричным. Профиль одного ротора взаимно дополняет другой. Характеристика ВНЧС $\lambda - \tau$ (λ — коэффициент откачки, τ — отношение давлений) дана на рис. 4,б. ВНЧС могут применяться для создания небольших разрежений, а также входить в состав многоступенчатых вакуумных установок (например, установка ВУ-500/0,5-МВТУ).

Двухроторные вакуум-насосы с внутренним сжатием. Данный тип ВН имеет наиболее совершенный рабочий процесс, так как сжатие газа происходит внутри рабочих полостей. Внутреннее сжатие осуществляется, например, в винтовых ВН. Основные достоинства винтовых ВН: быстроходность (до 150...180 м/с), полная уравновешенность, большой ресурс работы, небольшие габариты и масса. Одна ступень винтового ВН сухого сжатия создает остаточное давление порядка 150...200 мм рт. ст., а одна ступень маслозаполненного винтового ВН — от 20 до 60 мм рт. ст. В двухступенчатом ВН сухого сжатия остаточное давление равно ~ 100 мм рт. ст.

Поперечное сечение винтового ВН сходно с рассмотренным на рис. 4,а; однако число выступов у ведущего ротора чаще всего равно четырем, а число впадин у ведомого — шести. Оба ротора имеют форму винта с большим углом подъема. Форма выступа (впадины) может быть симметрична или асимметрична. Последняя более предпочтительна, так как винтовой ВН с асимметричным выступом ротора имеет более высокие технико-экономические показатели. К основным недостаткам винтовых ВН относятся внутренние протечки газа через зазоры и высокий уровень шума при работе. Винтовые ВН, имея ряд преимуществ по сравнению с другими роторными ВН, в настоящее время еще не получили широкого распространения. Оптимальная зона производительности ВН — от 150 до 3600 л/с.

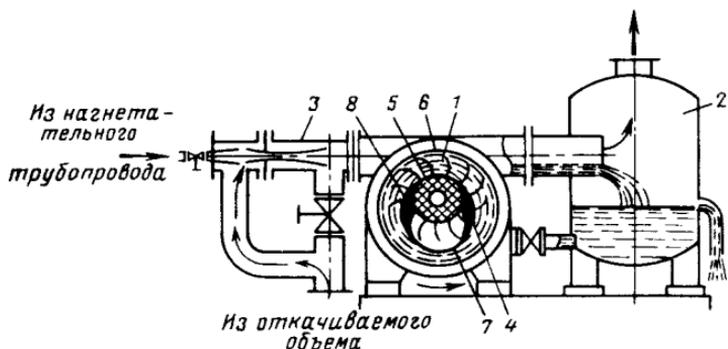


Рис. 5. Схема РЖВН с отделителем жидкости и эжектором

Ротационные жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (РЖВН). Отличительной особенностью РЖВН (рис. 5) является то, что сжатие газа в них осуществляется жидкостным кольцом 1, которое приводится в движение лопаточным рабочим колесом 5, эксцентрично расположенным в корпусе 6. Перед пуском насос до оси заполняется жидкостью. При вращении рабочего колеса жидкость лопатками отбрасывается к корпусу, и между ступицей рабочего колеса и жидкостным кольцом образуется серпообразное пространство 7, разделенное лопатками рабочего колеса на рабочие ячейки, объем которых изменяется в зависимости от угла поворота рабочего колеса. На угле поворота рабочего колеса, при котором объем рабочих ячеек увеличивается, они соединяются со всасывающим окном 8 и через него заполняются откачиваемым газом. Когда объем рабочей ячейки станет максимальным, она отсоединяется от окна всасывания. При дальнейшем повороте рабочего колеса объем рабочей ячейки уменьшается, и в ней происходит сжатие газа. На определенном угле поворота рабочая ячейка соединяется с нагнетательным окном 4, и газ благодаря уменьшению объема рабочей ячейки выталкивается через нагнетательное окно в нагнетательный трубопровод. Привод РЖВН осуществляется непосредственно от электродвигателя. Вал электродвигателя соединяется с валом РЖВН через упругую муфту. Так как газ в РЖВН сжимается жидкостью, в машине осуществляется хороший теплообмен между сжимаемым газом и жидкостью, и большая часть тепла сжатия отводится от газа. Чтобы жидкость нагревалась в РЖВН только до заданной температуры, в жидкостное кольцо постоянно подводятся новые порции холодной жидкости. Излишнее количество жидкости отводится из жидкостного кольца через нагнетательное окно и нагнетательный трубопровод в отделитель жидкости 2.

Протекание процесса сжатия с интенсивным теплообменом дает возможность откачивать с помощью РЖВН легко разлагающиеся, полимеризирующиеся, воспламеняющиеся и взрывоопасные газы и смеси. Наличие жидкостного кольца и отсутствие органов

газораспределения позволяет РЖВН откачивать газы, содержащие пары, капельную жидкость, твердые инородные включения типа пыли и даже абразивные частицы. Соответствующий подбор рабочей жидкости позволяет откачивать с помощью РЖВН агрессивные газы. Например, для перекачки хлора используется концентрированная серная кислота (концентрация H_2SO_4 — 97...98%).

РЖВН просты по конструкции, дешевы в изготовлении, не требуют квалифицированного обслуживающего персонала, надежны в эксплуатации. В настоящее время выпускаются РЖВН с быстротой действия от 0,33 до 300 м³/мин, давлением всасывания 20...70 мм рт. ст., а также РЖВН ВВН-50 с эжектором 3, который имеет остаточное давление порядка 1 мм рт.ст. Выпускаемый двухступенчатый агрегат 2РВНУ-4,25, выполненный на базе водокольцевых ВН, имеет производительность 4,25 м³/мин при давлении 8 мм рт. ст. и остаточное давление 1,2 мм рт. ст. Применение находят также двух- и трехступенчатые вакуумные агрегаты, выполненные на базе ВН типа Рутс и РЖВН.

Ротационные многопластинчатые вакуумные насосы (РВН). Насос этого типа состоит из цилиндрического корпуса 1 (рис.6,а и б), внутри которого эксцентрично вращается ротор 2, в котором имеются пазы, и в них возвратно-поступательно движутся стальные пластины 3. Для уменьшения трения пластин по зеркалу цилиндра в выточках цилиндра устанавливаются беговые кольца 4, вращаемые пластинами 3. При вращении ротора 2 пластины 3 под действием центробежной силы прижимаются к беговым кольцам 4 и делят пространство между цилиндрическим корпусом и ротором на отдельные рабочие ячейки. На угле поворота ротора, при котором объем рабочих ячеек увеличивается, они соединяются со всасывающим патрубком 5, и происходит всасывание. Затем рабочие ячейки отсоединяются от всасывающего патрубка, объем их уменьшается, и в них происходит сжатие откачиваемого газа. На определенном угле поворота ротора ячейки соединяются с нагнетательным патрубком 10, и благодаря уменьшению объема рабочих ячеек газ из рабочих ячеек выбрасывается в нагнетательный патрубок. Для уменьшения влияния на производительность РВН переноса газа со стороны нагнетания на сторону всасывания в защемленном объеме (защемленный объем — объем рабочей ячейки в момент, когда она отсоединилась от окна нагнетания) в нижней части цилиндрического корпуса 1 и торцовых крышках 6 выполнен ряд отверстий. Через эти отверстия сжатый газ из защемленного объема по кольцевым каналам перепускается в рабочую ячейку, в которой начался процесс сжатия. В полость сжатия для смазки трущихся деталей и уплотнения зазоров подается масло через трубопроводы 7. Для уплотнения торцовых зазоров применяются уплотнительные кольца 8, которые прижимаются к торцовым крышкам пружиной. Уплотнение вала осуществляется торцовым сальником 9. За нагнетательным патруб-

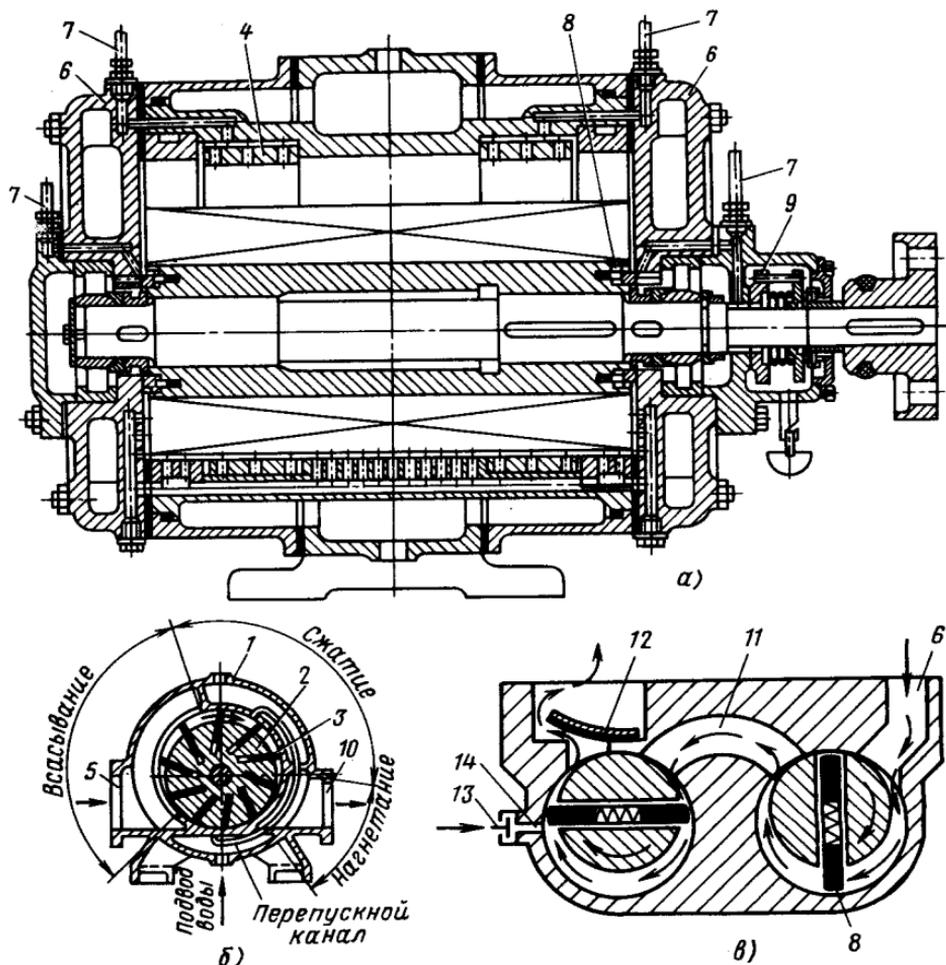


Рис. 6. Разрезы (а, б) многопластинчатого ВН и схема (в) двух-
ступенчатого пластинчато-роторного ВН

ком ВН обязательно помещается обратный клапан, который перекрывает нагнетательную сторону при остановке ВН. РВН применяют для работы при давлении на всасывании 320...8 мм рт. ст., при давлении 8 мм рт. ст. они могут работать только кратковременно. Параметры выпускаемых промышленностью ВН типа РВН-6, РВН-50 регламентируют ГОСТ 21757-76 и ГОСТ 18984-73.

Пластинчатороторные вакуумные насосы. Для получения остаточного давления порядка 10^{-3} мм рт. ст. применяются двухступенчатые насосы, соответствующие схеме, показанной на рис. 6, в. Число пластин 8 в рабочей камере — две,

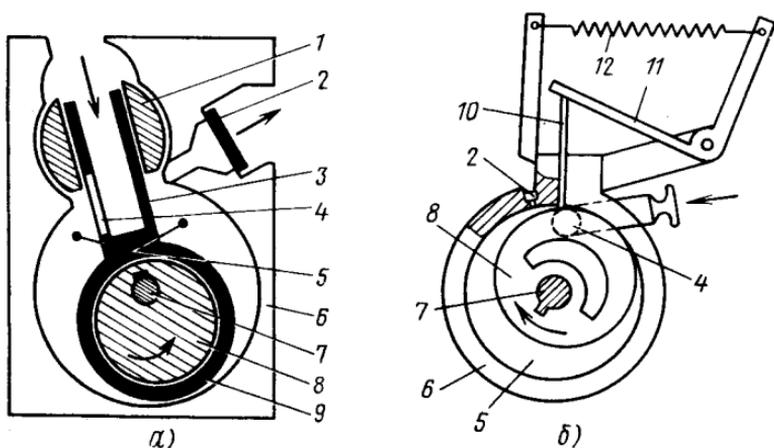


Рис. 7. Принципиальные схемы золотникового (а) и пластинчато-статорного (б) насосов

иногда три. Все зазоры и вредные объемы заполнены и уплотнены вакуумным маслом. Под слоем масла находится также клапан 12. Выход первой ступени соединен каналом 11 со входом второй. Промежуточный клапан, как правило, отсутствует.

Параметры пластинчато-роторных насосов двух- и одноступенчатых регламентирует ГОСТ 14707-77. Выпускаются насосы ВНК-1, ЗНВР-1Д и 2НВР-5Д. Модернизация последнего 2НВР-5ДМ отличается наличием отсечного (обратного) и напускного клапанов в конструкции самого насоса.

Золотниковые вакуумные насосы. В цилиндрической расточке корпуса 6 (рис. 7,а) золотникового ВН движется цилиндрический ротор 9, который отлит заодно с полым золотником 3. Ротор 9 закреплен на эксцентрикe 8 вала 7. При вращении вала 7 ротор 9 обкатывает с зазором внутреннюю поверхность цилиндрической расточки корпуса 6. Золотник 3 при этом совершает качательное движение, он движется возвратно-поступательно и одновременно поворачивается на определенный угол в шарнире 1. При таком движении ротора 9 и золотника 3 внутреннее пространство цилиндрической расточки корпуса 6 делится на две серпообразные полости 5, объем которых изменяется по углу поворота ротора. Всасывание газа происходит через полый золотник 3 и окно 4, расположенное в золотнике, при этом ротор движется против часовой стрелки. Одновременно в другой серпообразной полости происходит сжатие газа. Когда давление газа в этой полости станет выше давления в нагнетательном патрубке на величину потерь в клапане, клапан 2 откроется, и газ ротором 9 вытолкнется в нагнетательный патрубок. В ВН для уплотнения, охлаждения и смазки подается масло. Масло заполняет все щели и вредные объемы в золотниковых ВН, благодаря чему удается получить высокую степень сжатия.

Эксплуатационные характеристики вакуумных насосов с масляным уплотнением

Марка	Быстродействие в диапазоне входных давлений 706...1 мм рт.ст., л/с	Парциальное давление паров воды в насосе (не более), мм рт.ст.	Предельное остаточное давление, мм рт.ст.		Комплектующий электродвигатель		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			с учетом парциального давления пара рабочей жидкости (без газобалласта)	парциальное давление (по рабочей жидкости)	с учетом давления пара рабочей жидкости при напуске газобалласта	марка		
НВ3-500 ГОСТ 14707-77	500	17,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	1,0	A2-91-6	2910x1760x2045	4577
НВ3-300 ГОСТ 14707-77	300	17,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	1,0	AO2-82-6	2075x1510x1780	2714
НВ3-100Д ГОСТ 14707-77	100	17,6	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	4A160-4	1175x874x1164	1000 ± 100
НВ3-75 ГОСТ 14707-77	75	17,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,8	4A132M4	1140x650x1145	700 ± 70
НВ3-50Д ГОСТ 14707-77	50	17,6	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	4A132-4	1240x650x1145	700 ± 70
НВ3-20 ГОСТ 14707-77	20	17,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,8	4AX9024	732x400x665	200 ± 20
ВН-461 РВН-20	0,78 2,6	— —	$2 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-3}$	— —	— —	530x300x415 613x320x430	64 110
2НВР-6Д ГОСТ 14707-77	5	17,6	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	4AX71B4Y3	540x160x270	27
3НВР-1Д ГОСТ 14707-77	1	17,6	$8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-2}$	4AA56B2Y3	320x130x200	9,5

В последнее время золотниковые ВН выполняются, как правило, двухкамерными, что позволяет унифицировать одноступенчатые и двухступенчатые ВН и облегчает их уравнивание за счет смещения эксцентриков на 180° . При параллельной работе камер остаточное давление достигает $\sim 5 \cdot 10^2$ мм рт. ст., при последовательной — $5 \cdot 10^{-3}$.

Пластинчатостаторные вакуумные насосы. Принцип действия пластинчато-статорных ВН схож с принципом действия золотниковых ВН. Пластина 10, делящая полость 5 на две части, движется возвратно-поступательно в пазу, выполненном в корпусе, и прижимается к ротору с помощью рычажного механизма 11 и пружины 12 (рис. 7,6). Устройство, прижимающее пластину к ротору, может иметь и другое конструктивное выполнение, например в пластинчато-статорном ВН типа РВН-20 пластина выполнена с поршнем.

Эксплуатационные характеристики насосов с масляным уплотнением, золотниковых и пластинчатых представлены в табл. 2. Все современные ВН имеют газобалластное устройство, предназначенное для очистки масла. Как видно из приведенных эксплуатационных характеристик, на практике золотниковые ВН используются для получения относительно большой скорости действия (от 500 до 200 л/с), пластинчато-роторные ВН — для средних и малых (от 5 до 0,25 л/с), а пластинчато-статорные — для малых (от 2,6 до 0,78 л/с).

Защита от заброса масла во всасывающую линию золотниковых, пластинчато-роторных и пластинчато-статорных вакуумных насосов. Во все рассмотренные ВН среднего вакуума — золотниковые, пластинчато-роторные и пластинчато-статорные — в полости сжатия подается масло. Это приводит к тому, что рассматриваемые ВН являются источником загрязнения откачиваемых объемов маслом. Кроме того, в момент запуска масло часто выбрасывается во всасывающий трубопровод, а в нерабочем состоянии, если не обеспечено равенство давлений во всасывающем и нагнетательном патрубках, масло атмосферным давлением может выдавливаться в вакуумную систему. Поэтому в эксплуатации на всасывающий патрубок устанавливают электромагнитные клапаны — отсечной и напускной.

Обычно в ВН заливают ограниченное количество масла, поэтому для защиты от заброса масла в вакуумную систему можно использовать также предохранительный объем. Предохранительный объем может быть предусмотрен непосредственно в насосе или устанавливаться вне его. При остановке насоса масло выдавливается в этот объем. Когда все масло собирается в предохранительном объеме, в него начинает поступать воздух через масляные каналы из пустого основного резервуара для масла. Этот воздух проходит в виде пузырей через масло в предохранительном объеме, поднимает до атмосферного давление в откачиваемой камере, но не загрязняет ее. При прохождении воздуха мас-

ло в предохранительном объеме пенится, поэтому предохранительный объем должен быть больше объема масла, заливаемого в ВН.

На всасывающем патрубке ВН можно предусматривать объемы с поплавковым клапаном. Когда масло выдавливается в этот объем, оно поднимает поплавок, который перекрывает вакуумную систему. Однако из-за ограниченных размеров данная система защиты недостаточно надежна. Для защиты от заброса масла в вакуумную систему в конструкции ВН могут быть предусмотрены специальные решения. К ним относятся установка вспомогательного масляного насоса и распределительного клапана, через который масло подается в ВН, и организация прерывистой подачи масла. Для прерывистой подачи масла в торцах ротора или вале ВН предусматривают канавки. Канавка заполняется маслом, когда соединяется с маслоподводящим каналом, и периодически освобождается от масла через маслоотводящий канал.

Откачка паров золотниковыми, пластинчато-роторными и пластинчато-статорными вакуум-насосами. Иногда возникает необходимость вакуум-насосом с масляным уплотнением откачивать пары, сравнительно не растворимые в масле (например, водяные) легко растворимые в масле (трихлорэтилена), и пары или газы, которые химически взаимодействуют с маслом ВН. При откачке паров, сравнительно не растворимых в масле, при каждом ходе сжатия, когда давление в рабочей ячейке достигает давления насыщения паров при данной температуре, пары конденсируются. Образовавшийся конденсат вместе с маслом выбрасывается в основной масляный резервуар. По мере загрязнения масла в основном резервуаре конденсатом все большее количество конденсата поступает по маслопроводам в ВН. Здесь конденсат на высоковакуумной стороне испаряется и создает противодействие, препятствующее поступлению в насос новых порций пара. Когда противодействие станет равным парциальному давлению откачиваемого пара, откачка пара прекратится. При откачке легко растворимых в масле паров растворяется не только конденсат, но и непосредственно пар. Пар и конденсат при этом равномерно распределяются в масле основного резервуара и не оседают на дне, как это бывает в случае откачки водяных паров. При откачке газов и паров, химически взаимодействующих с маслами, образуется шлам, легкие осадки и т. д.

В настоящее время насосы с масляными уплотнениями успешно используются для откачки паров. При этом наиболее эффективно использовать откачку с газобалластом; можно использовать прогретаемые насосы; наружную очистку масла; при откачке неагрессивных газов с незначительными примесями паров или газов, химически взаимодействующих с маслами или деталями насоса, следует использовать ловушки на всасывающей стороне, а

при откачке паров и газов, химически взаимодействующих с маслами или деталями насоса (например, вызывающих коррозию), следует использовать масла с соответствующими добавками.

Идея газобалласта состоит в том, что парциальное давление пара при температуре, имеющейся в рабочих ячейках ВН, поддерживается ниже давления насыщения. В этом случае пар откачивается без конденсации. Конструктивно этого достигают напуском балластного газа, чаще атмосферного воздуха, в рабочие ячейки ВН.

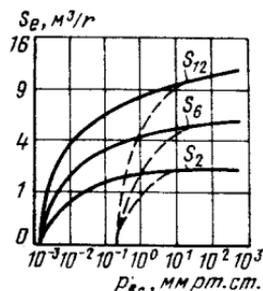
Пусть ВН откачивает, например, водяные пары. Тогда рабочая ячейка заполняется водяными парами. Рабочий объем ячейки второй ступени после отсоединения от впускного канала 11 через обратный клапан 13 (см. рис. 6,в) соединяется с атмосферой. Атмосферный воздух поступает в рабочую ячейку со скоростью, которая регулируется проводимостью канала газобалласта 14 до тех пор, пока давление в ячейке не превысит атмосферного (тогда закроется обратный клапан) или рабочая ячейка не отсоединится от канала газобалласта. Когда давление в ячейке превысит величину потерь давления в клапане 12, клапан откроется и смесь пара и газового балласта (в рассмотренном случае воздуха) вытолкнется в нагнетательный трубопровод.

Количество балластного газа в л. мм рт. ст./с для предотвращения конденсации паров может быть определено по формуле

$$O_{\text{б}} \geq S_e \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{в}}} p_{\text{п}} \left| \left(\frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{нас}}} - 1 \right) - \frac{p_{\text{и}}}{p_{\text{п}}} \right|, \quad (1)$$

где S_e — быстрота действия насоса при данном давлении, л/с; $t_{\text{в}}$ — температура паров и газов на входе в насос, °С; $T_{\text{в}} = 273 + t_{\text{в}}$; $T_{\text{н}}$ — температура насоса, °С; $p_{\text{п}}$ — парциальное давление пара на входе в насос, мм рт.ст.; $p_{\text{а}}$ — давление газа на выходе из насоса, мм рт.ст.; $p_{\text{нас}}$ — давление насыщения пара при температуре работающего насоса, мм рт.ст.; $p_{\text{и}}$ — парциальное давление неконденсирующего газа в смеси на входе в насос, мм рт.ст.

Рис. 8. Зависимость быстроты действия ВН от давления всасывания:
 — без газобалласта;
 - - - с газобалластом



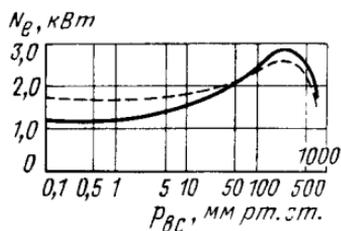


Рис. 9. Зависимость мощности ВН от давления всасывания:
 — без газобалласта;
 - - - с газобалластом

При использовании газобалласта повышаются перетечки газа в рабочую ячейку всасывания из ячейки, в которую подается газовый балласт. Это сказывается на быстроте действия насоса S_e и на остаточном давлении. Зависимость быстроты действия ВН от давления всасывания для насосов с газобалластом и без него (по данным фирмы "Лейболд") представлена на рис. 8. На сжатие балластного газа тратится дополнительная мощность. На рис. 9 представлена зависимость потребляемой ВН мощности N_e от давления всасывания в насосе с газобалластом и без него. Применение газобалласта приводит к повышению температуры насоса. Но так как при повышении температуры быстро возрастает давление насыщенного пара, то возрастает и максимальная производительность откачки паров без конденсации.

При откачке легко растворимых в масле паров при применении газобалласта предотвращается конденсация паров и уменьшается скорость растворения паров в масле. Однако предотвратить загрязнение масла парами не удастся. Для их удаления в работающем с газобалластом ВН перекрывают всасывающий патрубок на время, достаточное для очистки масла. Этот же метод очистки применяют и в случае, если по какой-либо причине произошло загрязнение масла конденсатом.

Методы расчета ротационных многопластинчатых, жидкостно-кольцевых, золотниковых, пластинчато-роторных и пластинчато-статорных вакуумных насосов. Условие задачи — спроектировать ВН на заданную быстроту откачки S_e в $\text{м}^3/\text{мин}$ при давлении всасывания $p_{вс}$ мм рт. ст. и давлении нагнетания p_n мм рт. ст.:

$$S_e = \lambda V_h, \quad (2)$$

где λ — коэффициент откачки; V_h — описанный объем ВН, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Коэффициент откачки λ учитывает объемные потери при всасывании: потери, связанные с перетеканием газа из рабочих ячеек, в которых происходит сжатие и нагнетание, в рабочие ячейки всасывания; потери, связанные с натеканием в ячейки всасывания воздуха из атмосферы; дроссельные потери при всасывании; потери, связанные с подогревом газа при всасывании; потери, вызванные испарением рабочей жидкости в рабочие ячейки всасывания, и потери, вызванные расширением газа из вредного (мертвого) объема. Для многопластинчатых ротационных ВН коэффициент откачки лежит в пределах 0,85. . . 0,75, для РЖВН — в преде-

лах 0,6. . . 0,87, для золотниковых, пластинчато-роторных и пластинчато-статорных — в пределах 0,7 . . . 0,85.

Описанный объем вакуумных насосов зависит от их геометрических размеров, частоты вращения ротора n в об/мин, и для всех объемных вакуумных насосов он может быть подсчитан в ($\text{м}^3 / \text{мин}$) по формуле

$$V_h = z f_{\max} l n, \quad (3)$$

где z — число рабочих ячеек; f_{\max} — максимальная площадь рабочей ячейки, м^2 ; l — длина рабочей ячейки, м .

Для многопластинчатых и пластинчато-роторных ВН

$$V_h = c_{\pi} R e l n, \quad (4)$$

где R — радиус цилиндрической расточки корпуса, м ; e — эксцентриситет — расстояние между осью цилиндрической расточки корпуса и осью ротора, м ; c_{π} — коэффициент, учитывающий влияние числа пластин. С увеличением числа пластин уменьшается угол между пластинами, что приводит к изменению описанного объема, которое учитывается коэффициентом c_{π} . В табл. 3 приведены значения коэффициента c_{π} для выполняемых на практике значений относительного эксцентриситета $e/R = 0,09 \dots 0,15$.

Т а б л и ц а 3

z	2	3	4	5	6	8	10	12
c_{π}	9,90	11,3	11,8	12,10	12,2	12,3	12,4	12,5

При числе пластин больше 12 коэффициент c_{π} можно принять равным 4π . Отношение e/R для данных машин лежит в пределах от 3 до 4,5. Пластины, как правило, выполняются стальными. В многопластинчатых ротационных насосах для уменьшения трения пластин о цилиндр применяются беговые кольца и пластины делаются наклонными. Угол наклона пластин выбирается от 7 до 15° .

Средняя скорость скольжения пластин по цилиндру в м/с

$$U = \frac{\pi R n}{30}, \quad (5)$$

и рекомендуемые ее оптимальные значения составляют 12... 13 м/с .

Толщина пластин выбирается от 0,5 до 2 мм. Пластины можно выполнять из асботекстолита. В этом случае толщина пластин принимается равной или больше 6 мм, а средняя скорость скольжения — в пределах от 15 до 18 м/с.

Для РЖВН с цилиндрическим корпусом объем V_h в м³/мин можно определить по формуле

$$V_h = \pi [(r_2 - a)^2 - r_1^2] l \psi n, \quad (6)$$

где r_2 — наружный радиус рабочего колеса, м; a — глубина погружения лопаток в жидкостное кольцо в сечении наибольшего зазора между рабочим колесом и корпусом, м; r_1 — радиус ступицы рабочего колеса, м; l — длина рабочего колеса, м; ψ — коэффициент, учитывающий объем лопаток рабочего колеса.

Глубина погружения лопаток в жидкостное кольцо a выбирается в пределах от 2 до 3 мм. Коэффициент ψ для литых колес лежит в пределах от 0,65 до 0,85 и имеет меньшие значения для колес небольшого диаметра. На практике отношения r_1/r_2 выбирают в пределах 0,4 ... 0,55; $l/r_2 \approx 2 \dots 2,5$; $e/r_2 = 1/7 \dots 1/8$.

Окружная скорость в м/с на периферии рабочего колеса

$$U_2 = \frac{\pi r_2 n}{30} \quad (7)$$

лежит в пределах от 10 до 16 м/с; нижний предел определяется устойчивостью жидкостного кольца, верхний — целесообразным значением изотермического k , п. д.

Для золотниковых и пластинчато-статорных ВН V_h в м³/мин с достаточной для практики точностью может быть подсчитано по формуле

$$V_h = \pi (R^2 - r^2) l n, \quad (8)$$

где R — радиус цилиндрической расточки корпуса, м; r — радиус ротора, м.

Отношение e/R принимается для данных машин равным 0,11... 0,15; $r/R = 0,89 \dots 0,85$; $l/R = 1,5 \dots 3$.

Частота вращения вала — 500 ... 1000 об/мин.

Мощность в кВт на валу ВН может быть определена по формуле

$$N_e = \frac{\rho_B V_h \ln (\rho_H / \rho_B)}{0,612 \eta_{из}}, \quad (9)$$

где p_v — давление всасывания, кгс/см²; p_n — давление нагнетания, кгс/см²; $\eta_{из}$ — изотермический к.п.д.

Для многопластинчатых ротационных и пластинчато-роторных вакуумных насосов $\eta_{из}$ лежит в пределах от 0,3 до 0,65; для РЖВН — в пределах от 0,3 до 0,45 и для золотниковых и пластинчато-статорных — в пределах от 0,4 до 0,55. При расчете геометрических размеров ВН задаются коэффициентом откачки λ и основными геометрическими соотношениями e/R , l/R , r_1/r_2 , a , ψ ; задаются значением скорости U или U_2 ; из уравнений (5) или (7) определяют частоту вращения вала n в функции скоростей U или U_2 . Определяют V_h из уравнения (3). Выбранные значения геометрических соотношений и скоростей подставляют в уравнения для V_h (4), (6) и (8) и решают их относительно R или для РЖВН — относительно r_2 . Полученные значения R или r_2 округляют до значений предпочтительного ряда чисел, а затем определяют остальные геометрические размеры и частоту вращения вала вакуумного насоса. Задаются изотермическим к.п.д. $\eta_{из}$ и определяют мощность на валу вакуумного насоса по уравнению (9). По мощности и частоте вращения вала подбирают электродвигатель и, если необходимо, мультипликатор.

Мембранные вакуум-насосы. В мембранных ВН осуществляется безмасляная откачка газа вследствие изменения объема, описываемого мембраной. Прогиб мембраны ограничивается двумя плитами специальной конфигурации. В небольших мембранных ВН привод мембраны может осуществляться через шток от кривошипно-шатунного механизма, а в крупных — гидравлическим способом от специального поршневого насоса. Газораспределение — клапанное. С увеличением прогиба мембраны возрастает объемная производительность ВН, но снижается долговечность работы. Кроме того, к недостаткам мембранных ВН можно отнести тихходность и большую металлоемкость. Одноступенчатые мембранные ВН, создающие относительно небольшой вакуум порядка ~ 180 мм рт. ст., не получили широкого применения.

2. ЛОПАТОЧНЫЕ ВАКУУМ-НАСОСЫ

Лопаточные ВН относятся к классу машин кинетического сжатия, в которых давление газа повышается при непрерывном принудительном движении потока. От вращающихся лопаток рабочего колеса энергия передается потоку газа. Вследствие этого в рабочем колесе происходит сжатие и повышение кинетической энергии газа. Полученная газом в колесе кинетическая энергия преобразуется в давление в неподвижных элементах ВН. К этой группе относятся центробежные, осевые и вихревые ВН. Лопаточные ВН, как правило, имеют высокую производительность и могут

применяться в низковакуумных установках как самостоятельно, так и вместе с другими типами объемных машин.

Центробежные вакуум-насосы. По своим конструктивным решениям центробежные вакуумные насосы (ЦВН) близки к центробежным компрессорам. Однако специфичность малых давлений и низкие значения чисел Рейнольдса (Re), при которых обычно работает ЦВН, приводят к снижению эффективности работы ступени. Диапазон возможной быстроты действия ЦВН такой же, что и для центробежных компрессоров — от $1 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^4$ л/с. Степень повышения давления в одном корпусе ЦВН равна $12 \dots 15$, а общая степень повышения давления в низковакуумных установках с использованием ЦВН достигает 10^4 . Проточная часть ЦВН состоит из всасывающего патрубка 1, (рис. 10) входного направляющего аппарата 2, рабочего колеса 3, диффузора 4 и обратного направляющего аппарата 5. Группа ступеней завершается улиткой с выходным патрубком. Обязательным элементом в конструкции ЦВН является герметичное уплотнение выходного конца вала.

Как показали исследования, функциональная связь между степенью повышения давления в ЦВН и коэффициентом расхода практически одинакова для компрессорного и эксгаустерного режимов работы.

Осевые вакуум-насосы (ОВН). Насосы этого типа имеют самую большую производительность среди механических ВН. Минимальная быстрота действия ОВН равна 10^4 л/с. В качестве ОВН можно использовать компрессорную ступень. Однако при работе ОВН в неавтомодельном по числу Рейнольдса режиме их эффективность снижается вследствие увеличения влияния сил вязкости, нарастания пограничного слоя и несогласованности в работе отдельных лопаточных венцов.

Проведенные исследования показали, что основную долю потерь в ОВН составляют профильные потери и потери на кольцевых поверхностях. Полученные результаты подтверждают перс-

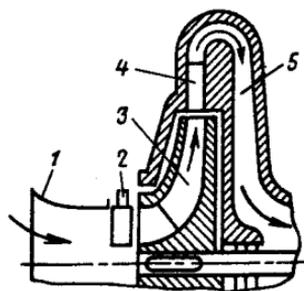


Рис. 10. Проточная часть ЦВН

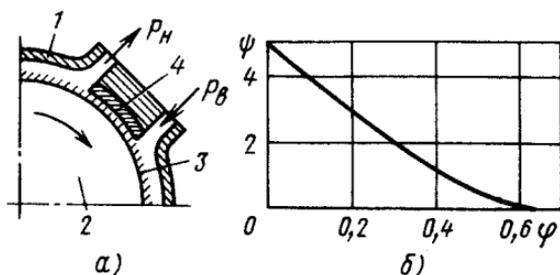


Рис. 11. Проточная часть ВхВН (а) и безразмерная характеристика коэффициента напора ψ в функции коэффициента расхода φ (б)

пективность применения ОВН для работы в низковакуумном режиме после соответствующей корректировки геометрии проточной части ступени.

Вихревые вакуум-насосы. По сравнению с другими типами лопаточных ВН вихревые вакуум-насосы (ВхВН) обладают рядом существенных преимуществ: высокий коэффициент напора, низкая окружная скорость, простота конструкции, непосредственный привод от электродвигателя и высокая надежность работы. Быстрота действия ВхВН сравнительно невысокая. Конструктивная схема ступени сжатия показана на рис. 11, а. Проточная часть ВхВН состоит из корпуса 1 и ротора 2 с лопатками 3. Между всасывающим и нагнетательным патрубками расположен отсекающий 4. Лопатки могут быть плоскими, профилированными, радиальными, наклонными, вставными, фрезерованными и т. д. Проточная часть ВхВН может быть различной формы: круглой, овальной, прямоугольной. При вращении ротора в проточной части ВхВН образуется спиральный вихрь. Откачивающее действие ВхВН основано на использовании разрежения, развивающегося вдоль оси вихря. К недостаткам ВхВН относятся сравнительно невысокие значения к. п. д. и высокий уровень шума.

На рис. 11, б представлена безразмерная характеристика коэффициента напора ψ в функции коэффициента расхода φ для плоских лопаток с углом наклона 125° . Из графика видно, что ступень ВхВН имеет достаточно высокий коэффициент напора и приемлемый коэффициент расхода. В настоящее время лопаточные ВН промышленностью не выпускаются.

Раздел II

НАСОСЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ВАКУУМА

Историческая справка и общая характеристика. Механические насосы, предназначенные для получения высокого и сверхвысокого вакуума, называются молекулярными (МН), так как обязательным условием их откачивающего действия является молекулярный режим течения газа. В отличие от объемных насосов, перемещение газа которыми осуществляется за счет периодического изменения объема рабочей камеры, МН относятся к насосам непрерывного скоростного действия. Откачивающее действие МН основано на увлечении молекул газа непрерывно движущимися твердыми поверхностями (ГОСТ 5197-70).

Примеры конструктивных схем МН приведены на рис. 12. В корпусе 4 на подшипниках 2 вращается вал 1 с рабочим ротором цилиндрической (а), дисковой (б), конусной (в) форм или турбовидного устройства (г), обеспечивающим откачку газа при вза-

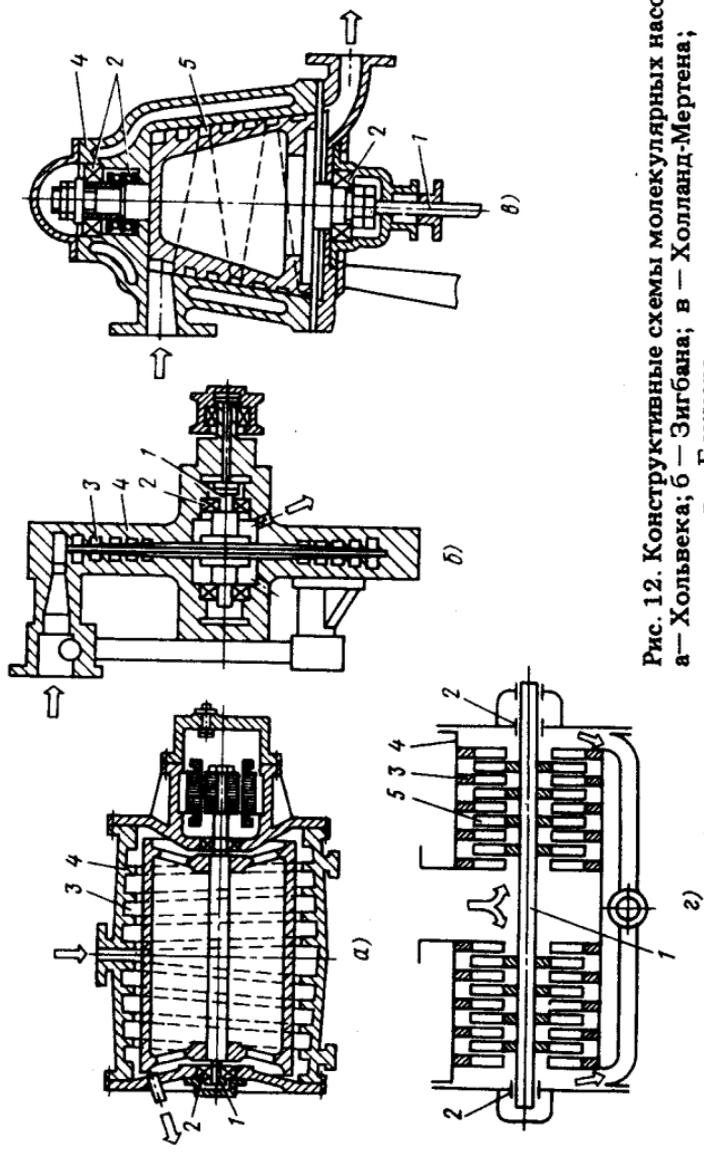


Рис. 12. Конструктивные схемы молекулярных насосов:
 а — Хольвека; б — Зиггана; в — Холланд-Мергена;
 г — Беккера

имодействии с сопряженными без контакта поверхностями статора (каналами 3) без рабочей жидкости или смазки. Такие рабочие органы называются "сухими".

В смазке нуждаются только подшипники 2, размещаемые, как правило, в форвакуумных полостях (рис. 12, а, б, г). Для полного исключения из конструкции источников углеводородных загрязнений (смазываемых деталей) и обеспечения высшего уровня безмасляности насоса применяют подвес ротора в электромагнитном поле или на газодинамических опорах. Как видно из схем, общим конструктивным признаком МН является ротор с рабочими каналами фиксированной формы, вращающийся в корпусе с зазором. Каналы 5 ротора обязательно открыты к рабочей поверхности корпуса (статора), относительно которой перемещается газ. Эта поверхность обычно образуется каналами 3, ответными роторным. Иногда рабочие каналы выполняются только на статоре (рис. 12, а, б).

Первый МН построен немецким физиком Геде в 1912 г. В дальнейшем усовершенствования и разновидности такого насоса описаны Хольвеком, Зигбаном, Холланд-Мертенем (рис. 12, а, б, в соответственно) и другими авторами. С помощью классических конструкций достигнуто остаточное давление порядка 10^{-5} Па при быстроте действия до 75 л/с. Насосы имели лабораторное применение в высоковакуумных установках, требовавших особо чистого вакуума, недостижимого с помощью наиболее употребительных паромасляных насосов. Широкому распространению классических МН (КМН) мешала их низкая надежность из-за малых зазоров ($< 0,1$ мм) между корпусом и ротором, вращавшимся с частотой 10 . . . 20 тысяч об/мин. При попадании в насос мелких частиц, загрязнений и неблагоприятном распределении температур деталей насоса не исключалось заклинивание ротора.

Переворот в применении МН произошел с появлением в конце 50-х годов турбомолекулярного насоса (ТМН) Беккера (рис. 12, г), отличавшегося большими зазорами (≥ 1 мм) и рабочей характеристикой $S_n = f(p_{вх})$, охватывающей 7—8 порядков давления, из которых 4—5 при практически постоянной быстроте действия. До настоящего времени ни один самый совершенный насос другого вида не обладает такой широкой и стабильной характеристикой.

Технические требования и основные параметры. Получение заданной быстроты действия в рабочем диапазоне давлений без превышения допустимого уровня загрязнений при наименьших размерах, массе, стоимости и сложности насоса с конструктивным обеспечением минимума эксплуатационных издержек (например, потребления энергии) — так можно кратко выразить требования промышленного потребителя к откачным средствам. Важнейшие технические требования оговорены стандартами.

В частности, по условным проходам и присоединительным размерам патрубков входа и выхода все насосы должны соответст-

воват ряду 40, 63, 100, 160, 250, 400 и т. д. (ГОСТ 18626—73) для обеспечения непосредственного соединения со стандартизованной арматурой, измерительными камерами и т. п.

По уровню загрязнения откачиваемого объема — не превышать заданных пределов обратных потоков конденсирующихся паров и некоторых газов. Все большее число вакуум-технологических процессов требует безмасляности, выражающейся парциальными давлениями углеводородов ниже 10^{-8} Па.

По снижению газовыделений — допускать ускоренное обезгаживание входного патрубка прогревом до $T = 400 \dots 700^\circ \text{K}$.

По режимам работы — не ухудшать откачные параметры как при длительной работе, так и при циклической, с частыми запусками, кратчайшими по времени.

По уровню вибрации — не нарушать работы манометрических датчиков и других приборов, устанавливаемых непосредственно в вакуумной системе и выдерживающих обычно виброускорение $a \leq 0,2 g$.

По уровню шума — не превышать санитарных норм по ГОСТ 12.1.003—76. Последние два требования связаны с необходимостью динамического уравнивания конструкции.

Для сравнения технического уровня разных насосов пользуются удельными параметрами: материалоемкостью кг/л/с; затратами электроэнергии, кВт/л/с; себестоимостью, руб/л/с или обратными величинами S_M, S_N, S_C соответственно.

Реальные МН могут удовлетворить самому полному комплексу современных требований. Согласно ОСТ 26-04-2147-77 насосы общепромышленного назначения проходят обязательные испытания по следующим параметрам:

быстрота действия S_N в диапазоне входных давлений $p_{вх}$, предельное остаточное давление $p_{ост}$;

время достижения давления, указанного в технических условиях;

потребляемая мощность;

расход охлаждающей воды;

показатель уровня шума;

показатель уровня вибрации.

Возможности молекулярных насосов наиболее полно представляет эксплуатационная характеристика турбомолекулярных насосов (ТМН). На рис. 13 приведены кривые быстроты действия ТМН по воздуху, гелию и аргону на примере отечественного образца ТВН-1000 [3]. Характер кривых сохраняется для многоступенчатых ТМН всех размеров и поколений. Постоянно улучшаются лишь удельные значения быстроты действия и других параметров, отнесенные к единице площади, массы, объема. Для срав-

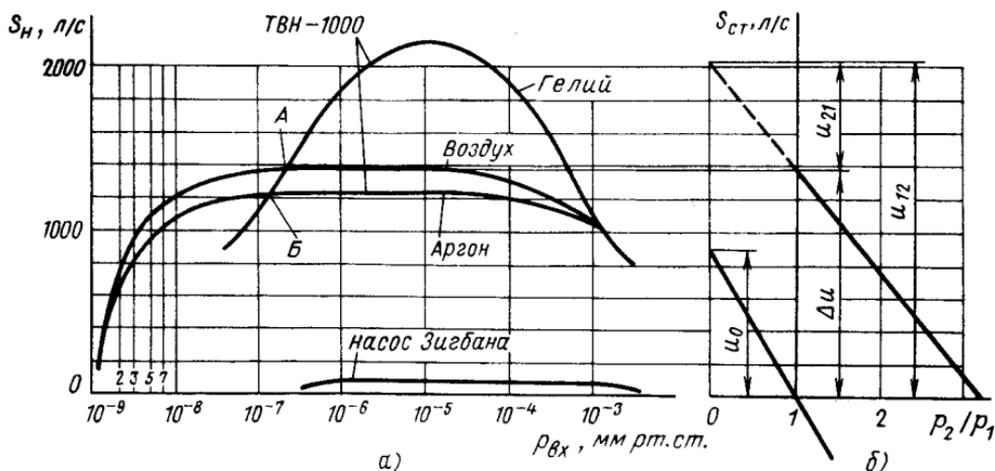


Рис. 13. Кривые быстроты действия насоса ТВН-1000: а — в координатах $S_n - p_{вх}$; б — в координатах $S_{ст} - p_2/p_1$

нения на рис. 13 помещена кривая быстроты действия по воздуху классического молекулярного насоса Зигбана (рис. 12, б), близкого по размерам представленному ТМН.

В линейных координатах зависимость быстроты действия ТМН от коэффициента компрессии выражается прямой, как показано на рис. 13, справа, для ступени-решетки. Эта зависимость используется при рассмотрении взаимосвязи $S_{ст}$ с проводимостями решетки U_0, U_{12}, U_{21} и расчете ТМН. Подобные прямые, полученные расчетом для многоступенных насосов по ряду газов, затем перестраиваются в координаты $S_n - p_{вх}$ при фиксированном $p_{вых}$. При этом с учетом влияния газовыделений и форвакуумного насоса получают кривые, соответствующие приведенным на рис. 13, слева, в полулогарифмических координатах.

Эксплуатационную характеристику ТМН отличают следующие особенности:

- 1) высокая быстрота действия по сравнению с классическими насосами. На новейших турбонасосах достигнуты значения удельной быстроты действия на единицу входного сечения $S_n/F D_{вх} \geq 2 \text{ л/с см}^2$ и на единицу габаритного объема $S_n/V_{г} \geq 10 \text{ л/сл}$, что превышает соответствующие параметры паромасляных сверхвысоковакуумных насосов с ловушками;
- 2) постоянство быстроты действия по воздуху в интервале 4–5 порядков давления — обычно от 10^{-6} до $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ Па}$;
- 3) откачка всех без исключения газов независимо от их химической активности (инертности) с некоторой селективностью по молекулярной массе M , которую можно корректировать изменением частоты вращения ротора, числа ступеней и других конструктивных факторов при разработке;

4) практически безмасляный спектр остаточных газов благодаря отсутствию рабочей жидкости, очень высокому коэффициенту компрессии ТМН по парам смазки и конструктивно-эксплуатационным мерам против ее миграции.

Наличие высокоскоростного ротора с окружной скоростью v_p , близкой к тепловой скорости молекул откачиваемых газов c , и как следствие — наличие смазываемых, быстро изнашивающихся подшипников или сложных систем подвеса (электромагнитного или газодинамического) являются недостатком насоса, что, однако, при современном уровне машиностроительной технологии не является препятствием широкому распространению ТМН. Предприятия, выпускающие ТМН, гарантируют их работу до замены подшипников не менее 5—10 тысяч часов, что в большинстве случаев является вполне достаточным сроком постоянной эксплуатации.

Селективность действия ТМН выражается в резком увеличении компрессии более тяжелых газов, в частности, паров смазки, и подчиняется закономерности $\lg p^2/p^1 \sim \sqrt{M/T}$ в области $v_p \leq c$ [2]. Отсюда, если для одной решетки при $T = \text{const}$ $(p_2/p_1)_{\text{тяж}} = \mu(p_2/p_1)_{\text{лег}}$, где обычно $1 < \mu \leq 3$, то для реальных ТМН с числом ступеней (решеток), составляющим 32...36, аналогичный множитель селективности возрастает в степени, соответствующей числу решеток 32...36, и может достигать многих миллиардов. Этим и объясняется практическое "запирание" насоса по парам смазки, проникающим с форвакуумной стороны. При больших потоках, когда давления на выходе и входе отличаются не много, быстрота действия решетки ТМН выше для легких газов. Во многоступенчатой конструкции это свойство несколько сглаживается подбором числа и геометрии решеток.

С учетом изложенного процесс откачки замкнутого объема без напуска газа можно проследить качественно с помощью кривых быстроты действия по различным газам. В начале работы более эффективно откачиваются легкие газы: водород, гелий и т. д. Так продолжается до тех пор, пока парциальные давления легких газов не выйдут из зоны правее точек пересечения кривых быстроты действия по этим газам и более тяжелым, например, точек А и Б на рис. 13. Левее этих точек быстрота действия ТМН для легких газов становится ниже, чем для более тяжелых. Поэтому последние откачиваются до более низких давлений. Следствием описанного процесса является характерный для ТМН спектр остаточных газов, в котором представлены обычно газы с молекулярной массой от 2 до 44 при преобладании водорода. Такой спектр близок к идеальному для большинства вакуум-технологических процессов.

Описанные закономерности селективной откачки предъявляют особые требования к разработке ТМН. Конструктор оказыва-

ется обязанным провести расчет и оптимизацию проточной части не только для откачки воздуха или азота, но и для самого легкого газа — водорода.

По сравнению с электрофизическими насосами в ТМН отсутствует накопление газов и паров, так как он является проточным насосом и работает с отводом потока в форвакуумную систему.

По сравнению с паромасляными насосами ТМН быстро запускается (за 5–10 мин против ~40), нечувствителен к резкому повышению давления, создает самые низкие давления без помощи ловушек, т. е. не нуждается в жидком азоте. Насосы оказываются незаменимыми при длительной работе с большими потоками, например в технологических процессах напыления, вакуумных системах печей, плазменных и других электрофизических установках с выделением энергии. Созданы и работают ТМН разных типов и размеров с быстротой действия от 30. . . 50 до 50 000 л/с.

Классификация, сведения о выпуске. Классификация молекулярных насосов на основе принятых на практике наименований конструкций с учетом их новых разновидностей представлена на рис. 14. Если условно считать механические насосы классом вакуумных насосов молекулярные — подклассом, то в настоящее время в этом подклассе следует различать насосы четырех видов. На схеме они обозначены КМН — классические, ТМН — турбомолекулярные, ПМН — промежуточные, ГМН — гибридные. Стрелками указаны направления их развития. Отличительными признаками вида в данном случае являются своя принципиальная схема, наличие особенностей рабочего процесса и характеристик, связанных с внутренней структурой (геометрией) рабочих каналов. Эти признаки описаны в следующих разделах.

Конструктивных разновидностей молекулярных насосов каждого вида существует значительное количество. По устройству и форме рабочих органов молекулярные насосы можно подразде-

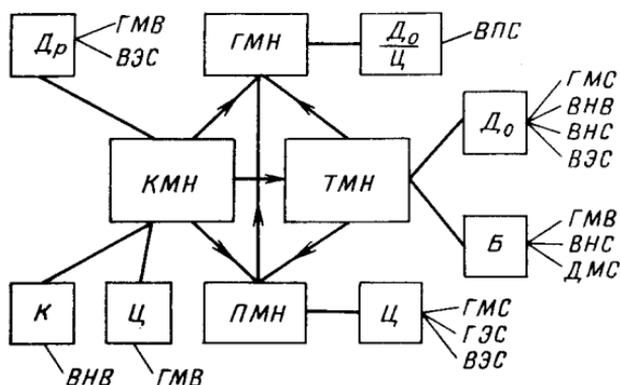


Рис. 14. Классификация молекулярных насосов

лить на: Ц — цилиндрический, К — конусный, Д_р — дисковый с радиальным потоком, Д_о — дисковый с осевым потоком, Б — барабанный. На рис. 14 перечисленные обозначения заключены в квадратики, соединенные с обозначениями видов, которым они принадлежат. По конструктивной схеме различаются насосы: Г — с горизонтальным валом, В — с вертикальным валом, Д — двухроторные со вторым встречно вращающимся ротором. Осевые насосы с горизонтальным валом и все радиальные могут иметь либо горизонтальный, либо вертикальный входной фланец. Для схемы Г характерна двухпоточная компоновка проточной части (см. рис. 12, а, б, г). По конструкции опорных узлов, которая сильно влияет на эксплуатационные характеристики, различаются насосы с роторами: М — на смазываемых подшипниках, Э — на электромагнитных опорах, П — на газовой подушке. Наконец, в зависимости от области действия применяются два исполнения насосов: В — высоковакуумное (непрогреваемое) и С — сверхвысоковакуумное (с частичным прогревом и большим числом ступеней компрессии). На рис. 14 буквенные символы последних трех конструктивных отличий объединены на выносках от квадратиков с простановкой в той же последовательности, что и в тексте. Причем в схему включены обозначения только реально существующих насосов: серийных, опытно-промышленных и известных экспериментальных.

Сведения об основных импортируемых насосах упомянутых типов помещены в табл. 4; там же приведены сведения о разновидностях ТМН-Д_о ГМС и Д_о ВМС, использованных в отечественных рядах насосов типа ТМН и ТВН. Из них широко эксплуатируются насосы ТМН-100 и ТМН-200, выпущенные значительной серией.

В настоящее время в мировом производстве и эксплуатации находятся три поколения турбомолекулярных насосов. Первое поколение составляют насосы разработки начала 60-х годов, относительно тихоходные (с окружной скоростью ротора $v_p \leq 200$ м/с) и массивные (в среднем 20...30 кг на 100 л/с), с горизонтальным валом. Насосы второго поколения разработки конца 60-х начала 70-х годов более быстроходны ($v_p > 200$ м/с), соответственно меньшей массы (в среднем 5...10 кг на 100 л/с), включают в себя конструкции как с горизонтальным, так и с вертикальным валом. Третье поколение — бессмазочные насосы с ротором на электромагнитных или газовых опорах — находится в стадии разработки и внедрения отдельных образцов.

Принципиальные схемы, процесс откачки. Принципиальные схемы ступени молекулярных насосов и перечень их особенностей приведены в табл. 5. На схемах и в тексте использованы обозначения:

p_1, p_2 — давления газа на входе и выходе ступени соответственно, Па, мм рт. ст.; Q'_e — результирующий поток через ступень $Q'_e = p_1 S_1 = p_2 S_2$, л·Па/с; Q_v — поток, наведенный ротором, л·Па/с;

Основные характеристики турбомолекулярных вакуумных насосов

Типоразмер насоса	Быстродействие, л/с, не менее	Предельное остаточное давление, мм рт.ст. (полное)	Условный проход входного патрубка, Ду, мм	Мощность привода, кВт	Частота вращения ротора, об/мин	Расход охлаждающей воды, л/ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Средний уровень шума, дБ	Форвакуумный насос, преобразователь частоты
ТМН-100	130	$2 \cdot 10^{-9}$	125	0,3	18000	30	390x360x720	11,2	70	НВР-3, СПЧ-10М
ТМН-200	250	$1 \cdot 10^{-9}$	160	0,3	18000	30	860x620x600	20,4	60	НВР-3, СПЧ-10М
НВТ-1000	1000	$1 \cdot 10^{-9}$	250	0,2	18000	30	405x405x405	5,6	65	2НВР-5Д, ИП-НВТ-1000
ТВН-1000 (НВТ-2500)	1200 2500	$1 \cdot 10^{-9}$ $1 \cdot 10^{-10}$	400 400	0,4 0,3	27000 6000 12000	60 60	850x750x800	36	65	НВР-5Д, ПЧФ-2/3 2НВР-5Д — 2шт. ПЧФ-2/4
РТВН-1000 (НВТ-6300)	1000 6300	$1 \cdot 10^{-9}$ $1 \cdot 10^{-9}$	380 630	0,3 (два ротора)	6000	60	810x810x750	3,6	60	НВР-5, ПЧФ-2/3
ТМН-10000 ТУР-22000 Turbovac	10000 6500	$1 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-11}$	900 500	0,5 0,6	6000 6600	100 60	1100x1100x1250	40,8	—	НВЗ-20 ПЧСФ-2/3
-1500 -550М	1450 530	$1 \cdot 10^{-10}$ $2 \cdot 10^{-11}$	250 —	0,2 —	21000 30000	50 —	441x303	—	—	АВР-150, СПЧ

Характеристики молекулярных насосов

Вид	Схема ступени	Отличительные признаки
КМН		<p>1) $L \sim \pi D_p$ — длинный рабочий канал</p> <p>2) $\alpha \cong 0$ — стенки канала примерно параллельны направлению вращения</p> <p>3) $\vec{Q}_\Sigma \parallel \vec{v}_p$ — поток направлен параллельно скорости ротора</p> <p>Следствия:</p> <p>1) $z_k = 1 \dots 3$ — малое число каналов, низкое S</p> <p>2) Велик Δp в зазоре z</p> <p>3) $z < 0,1$ мм</p>
ТМН		<p>1) $L = B \cdot \sin \alpha \sim A = \pi D_p / z_k$ короткий рабочий канал</p> <p>2) $\alpha = 20^\circ \dots 40^\circ$</p> <p>3) $\vec{Q}_\Sigma \perp \vec{v}_p$</p> <p>Следствия:</p> <p>1) $z_k \approx 20 \dots 100$, высокое S</p> <p>2) Мал Δp в зазоре z</p> <p>3) $z \geq 1 \dots 1,5$ мм</p>
ПМН		<p>1) $L \sim \pi D_p / \cos \alpha$ длинный рабочий канал</p> <p>2) $\alpha \approx 45^\circ$</p> <p>3) $\vec{Q}_\Sigma \perp \vec{v}_p$</p> <p>Оптимальные соотношения:</p> <p>1) $z/n \leq 0,1$ (на выходе до 0,2)</p> <p>2) $A/H \leq 3,5$ для входа (к выходу уменьшается)</p> <p>3) $L/H > 10 \dots 15$</p>
ГМН	ТМН+КМН или ТМН+ПМН	Сочетание признаков, составляющих преимущества схем

$Q_{\Delta p}$ — поток, вызванный перепадом давления, л·Па/с; δ — толщина лопатки, м; S_1, S_2 — быстроты действия на входе и выходе ступени соответственно, л/с; v_p — окружная скорость ротора, м/с; D_p — диаметр ротора, м; z — зазор между ротором и корпусом (статором), м; L, A, H — длина, ширина и высота рабочего канала соответственно, м; B — хорда лопатки, м; α — угол между стенкой канала и направлением вращения ротора, град; z_k — число параллельно работающих каналов; $F_k, F_{вх}$ — площадь рабочего и входного сечения канала соответственно, м²; f_k — площадь всех рабочих стенок канала, м²; f_p — площадь роторных стенок канала, м²; c — средняя тепловая скорость молекул, м/с; V_F — падающий объем газа $V_F = c/4 F$, л/с; $U = 1/W$ — проводимость $U = kV_F$, л/с; k — коэффициент проводимости; U_{12}, U_{21} — прямая и обратная проводимости, л/с [2]; κ_{12}, κ_{21} — коэффициент прямой и обратной проводимости.

При постоянном внешнем потоке Q'_e в проточном тракте устанавливается стационарный процесс с постоянными параметрами. При откачке гермитичного сосуда процесс идет с уменьшением Q'_e . Обычно такой процесс длится часы или по крайней мере минуты. Поэтому в каждый рассматриваемый момент принимают $Q'_e \approx \text{const} = S_1 p_1 = S_2 p_2 = S_i p_i$ (где i — номер сечения).

Рассмотрим откачное действие ступени КМН (см. табл. 5). В канале, ограниченном стенками корпуса и ротора, молекулы газа находятся в тепловом движении и сталкиваются то с ротором, то с корпусом. Молекулы, слетевшие с корпуса, движутся хаотично. Молекулы, слетевшие с ротора, кроме хаотичной составляющей тепловой скорости, имеют еще направленную тангенциальную составляющую, полученную от ротора и равную \vec{v}_p . Если удары молекул о ротор и корпус чередуются, то сообщенная ротором газу массовая скорость будет равняться $v_p/2$, а быстрота откачки внутри канала

$$S_{кв} = F_k \frac{v_p}{2} \quad (10)$$

На практике площади роторных f_p и статорных стенок канала не одинаковы. Если полагать число столкновений пропорциональным площади, то массовая скорость оказывается пропорциональной отношению f_p/f_k , а быстрота откачки

$$S_{кв} = F_k v_p f_p / f_k \quad (11)$$

Необходимо подчеркнуть, что выражение (11) справедливо единственно для кольцевого канала с перегородкой, по схеме КМН в табл. 5. Для всех других классических конструкций,

включая показанные на рис.12, а, б, в, скоростной множитель выражается приближенно отношением ширины канала на ротор к его периметру $A/2(A+H) = f_{Ap}/f_k$, теоретический предел которого есть 1/2.

Из схемы КМН следует, что полезная быстрота откачки в канале $S_{квп.}$ должна быть меньше $S_{кв}$ за счет встречной подачи газа ротором в зазоре.

Для $p_1 = p_2$

$$S_3 = F_3 \frac{v_p}{2} \quad (12)$$

Если положить $F_3 = 0.02 F_k$, что близко к выбираемому практически, то

$$S_{квп.} = S_{кв} - S_3 = v_p F_k \left(\frac{f_{Ap}}{f_k} - 0,01 \right) = \frac{v_p F_k}{\Gamma} \quad (13)$$

Обычно $\Gamma \geq 2 \dots 3$. Формулы (10) ... (13) отражают внутренний процесс в канале, условием использования которого является поступление газа извне, поэтому реальная быстрота действия рабочего канала КМН регламентируется его входным сечением, способным пропустить ограниченный объем газа $\sim V_f = c/4 F$,

$$S_k = \frac{S_{квп.} V_f}{S_{квп.} + V_f} = \frac{v_p F_k}{4 \frac{v_p}{c} + \Gamma} \quad (14)$$

При возникновении градиента давления $p_2 > p_1$ фактическая быстрота откачки S_1 будет снижаться от S_k до 0, т.е. до тех пор, пока не наступит равновесие между потоком Q_v , наведенным ротором и встречным потоком $Q_{\Delta p}$, вызванным градиентом давления

$$Q_\epsilon = Q_v - Q_{\Delta p}, \quad (15)$$

где для элементарного участка канала

$$Q_v = p S_k, \quad Q_{\Delta p} = \frac{dp}{dW} \cdot$$

Если отнести уравнение (15) к S_k и разделить переменные, получится дифференциальное уравнение

$$\frac{dp}{p - Q_\epsilon / S_k} = S_k dW. \quad (16)$$

Его интегрирование по длине канала между сечениями с давлениями p_1 и p_2 приводит к результату

$$\frac{p_2 - Q_\epsilon / S_k}{p_1 - Q_\epsilon / S_k} = \exp S_k W = \exp \frac{S_k}{U} \quad (17)$$

При отсутствии потока $Q_\epsilon = 0$ — отношение давлений будет максимальным, т. е.

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} = \exp \frac{S_k}{V} \quad (18)$$

Решение уравнения (17) для потока $Q_\epsilon = p_1 S_1$ во входном сечении канала с учетом выражения (18) выявляет закономерность

$$S_1 = S_k \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} - \frac{p_2}{p_1}}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} - 1} \quad (19)$$

которая при представлении в линейных координатах $S_1 - p_2/p_1$ соответствует тангенсу угла наклона графика быстроты действия, показанного, например, на рис. 13 справа. Эта закономерность является общей для всех молекулярных насосов и широко используется в расчетах.

Согласно закономерности (19), чтобы знать быстроту действия ступени (насоса) во всем рабочем интервале давлений, достаточно иметь две ее точки, например S_k и $(p_2/p_1)_{\max}$. Первая определена уравнениями (10) ... (14), вторая — уравнением (18), в котором под знаком экспоненты в числителе — максимальный расход, наведенный ротором, а в знаменателе — предельный встречный расход от перепада давлений как по каналу, так и из зазора, выраженный в соответствующих проводимостях.

$$U \approx U_k + U_3 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} - 1 \right] \quad (20)$$

Формулы (18), (20) отражают огромное влияние зазоров на параметры КМН. Например, в частном случае беззазорного прямоугольного канала проводимостью $U_k = 2A^2 H^2 / 3(A+H)L$ е при $S_k = v_p / 3 AH$ получается

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} \approx \exp \frac{v_p}{c} \frac{A+H}{2AH} L \quad (21)$$

Для канала с размерами $A = 1$ см, $H = 2,5$ см, $L = 55$ см, вписывающегося в насос ТМН-200, имеющий $v_p = 165$ м/с, для воздуха без учета зазоров по формуле (21) получаем $(\rho_2/\rho_1)_{\max} = 1\ 250\ 000$. Однако при учете суммарной проводимости зазоров, составляющей, например, $U_z \approx 0,2 U_k$, что весьма не просто обеспечить практически согласно (18), (20), получаем для того же канала $(\rho_2/\rho_1)_{\max} \approx 20$ за счет вклада второго слагаемого в выражение (20).

Максимальная быстрота действия в обоих случаях $S_k \approx 14$ л/с. Если использовать под КМН весь объем насоса ТМН-200 с сохранением его механики (кроме зазоров, которые должны быть менее 0,1 мм) и схемы откачки в два потока от середины корпуса к его краям, можно получить быстроту действия около 30 л/с против 260 л/с и коэффициент компрессии для воздуха $\sim 10^{17}$ против 10^8 без учета газовыделений.

Поэтому считается целесообразным применять КМН там, где требуется повышенное отношение давления при малых расходах газа.

Откачное действие ступени ТМН. Как видно из схемы ТМН в табл. 5, в отличие от КМН турбонасос имеет короткий рабочий канал, наклоненный под относительно большим углом ($\alpha = 20^\circ \dots 40^\circ$) к плоскости вращения, что позволяет включить в параллельную работу ряд каналов числом $z_k \leq \pi D_p/A$, называемый решеткой. Решетка может быть круговой (на диске) или цилиндрической (на барабане).

В промышленных конструкциях решетки ротора чередуются с решетками статора, имея примерно зеркальную друг другу геометрию. В качестве ступени ТМН может быть рассмотрена как одна роторная, так и одна статорная решетка, стоящая между движущимися поверхностями. Наведенный ротором поток газа через решетку сориентирован не по направлению вращения ротора, как в КМН, а поперек него.

При вращении ротора молекулы, поступающие в канал со стороны 1 и стороны 2 во встречных направлениях, оказываются не в одинаковых условиях. Пока они пересекают канал, его косые стенки успевают пройти определенное расстояние, как бы раскрывая канал, т. е. уменьшая его сопротивление W , для молекул, летящих со стороны 1, и прикрывая его (повышая сопротивление) для молекул, летящих со стороны 2. Резко возрастает число столкновений молекул с набегающей на поток стенкой по сравнению с противоположной. Поскольку первая обращена к стороне 2, увеличивается процент молекул, отраженных в эту сторону.

В целом процесс определяется раздвоением геометрической (при остановленном роторе) проводимости U_0 решетки (канала) на прямую и обратную динамические проводимости $U_{1,2}$ и $U_{2,1}$, одна из которых растет (до некоторого предела), а вторая убывает с ротором отношения V_p/c [2].

Возникший в результате суммарный поток через решетку

$$Q_{\Sigma} = U_{12} p_1 - U_{21} p_2 \quad (22)$$

характеризуется быстротой откачки во входном сечении

$$S_1 = U_{12} - U_{21} \frac{p_2}{p_1}, \quad (23)$$

где с учетом зазоров

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= U_{k12} + U_{312} \\ U_{21} &= U_{k21} + U_{321} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (24)$$

Уравнение (23) определяет суммарный объемный расход через решетку и соответствует закономерности (19) и рис. 13, б.

Чтобы выделить объемный расход, наведенный ротором (по аналогии с КМН), достаточно взять случай $p_1 = p_2$

$$S_{1 \max} = U_{12} - U_{21} \approx (k_{12} - k_{21}) \frac{c}{4} F_k \cdot \quad (25)$$

В случае $S_1 = 0$ определяется наибольший коэффициент компрессии решетки

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} = \frac{U_{12}}{U_{21}} = \frac{k_{12} + k_{312} \frac{F_3}{F_k}}{k_{21} + k_{321} \frac{F_3}{F_k}} \cdot \quad (26)$$

Таким образом, если для построения всей характеристики решетки или насоса надо знать $S_{1 \max}$ и $(p_2/p_1)_{\max}$, то для определения последних надо иметь коэффициенты прямой и обратной проводимостей канала данной геометрии (в основном α и A/B) и зазора при относительной скорости v_p/c . Существует достаточный набор значений этих коэффициентов, вычисленных теоретически и установленных или уточненных экспериментально [2].

Наиболее употребительные данные, полученные методом Монте-Карло и решением интегральных уравнений, в графическом виде представлены на рис. 15. Из точек при $v_p/c = 0$ по мере увеличения v_p/c значения k_{12} возрастают, а k_{21} убывают. Имеются

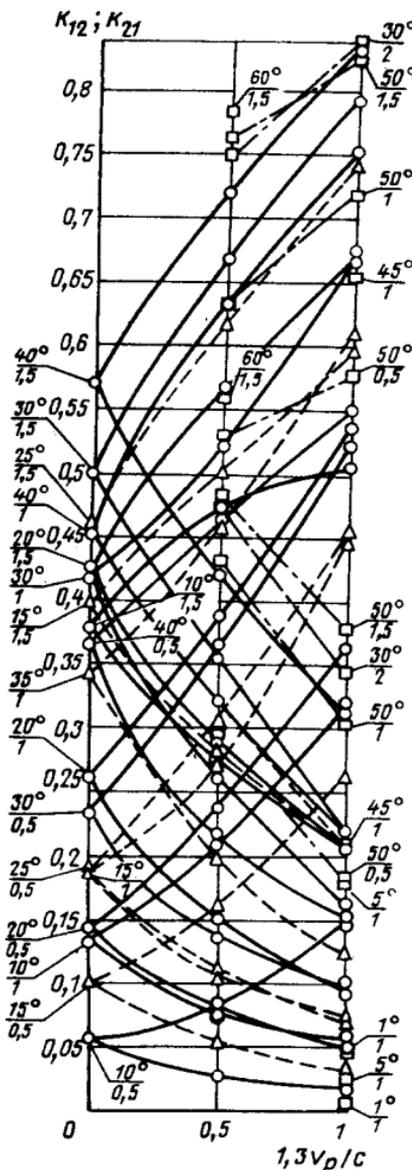


Рис. 15. Обобщенные коэффициенты прямой и обратной проводимостей ступени ТМН (на выносках вверх α^0 , внизу А/В; верхние ветви кривых — K_{12} , нижние K_{21})

также сведения по проводимости зазоров z с движущейся стенкой, работающих параллельно с каналами. Зазоры h между решетками могут учитываться в проводимости как участки проточного тракта, включенные последовательно. Подставляя в уравнение (25) данные с рис. 15, можно получить что при применении на входе в ТМН-200 каналов с геометрией $\alpha = 30^\circ$, $(A/B) = 1$, образованных тонкими ($\delta = 1$ мм) лопатками, можно получить быстроту действия по воздуху на один пакет $S_{1\max} \approx 300$ л/с, а при повышении скорости ротора до $v_r = 300$ м/с — $S_{1\max}$ выше 500 л/с. Коэффициент компрессии воздуха без учета зазоров на данной ступени по уравнению (26): $(p_2/p_1)_{\max} = 1,72$ и $2,8$ соответственно.

Благодаря невысокому отношению давлений на одной решетке оказалось возможным расширить в ТМН зазоры между ротором и статором на один—два порядка по сравнению с КМН.

Высокий коэффициент компрессии промышленных турбонасосов обеспечивается за счет последовательного включения достаточного числа ступеней (решеток). Например, в ТМН-200 их 39*.

* Важно представлять себе, что в откачном действии ТМН, состоящего из одной роторной решетки, никак не используется "увлечение" молекул ротором. Дополнительная составляющая V_p скорости молекул, отраженных от ротора, используется лишь во многоступенном насосе для работы статорных решеток. Следовательно, общепринятое определение принципа действия МН нуждается в дополнении: *откачивающее действие ТМН основано на явлении двойного динамического сопротивления рабочих каналов встречным молекулярным потокам, возникающем при направленном относительном движении ротора и молекул, отраженных от статора, или статора и молекул, отраженных от ротора.*

Практическое значение такого представления — в создании ТМН со встречным вращением роторов на удельную быстроту действия выше, чем у диффузионных насосов, поскольку ограничение $V_p < V_{\text{пра}}$ не ограничивает S_n , как в случае КМН [7], откачивающих газ за счет увлечения его молекул ротором.

Откачное действие ступени ПМН. Рассматриваемый насос обычно называют просто молекулярным (см. схему ПМН в табл. 5). Длинные, как в КМН, каналы, наклоненные, как в ТМН, под большим углом α к плоскости вращения в разные стороны на роторе и статоре, образованы профилированными гребнями. Находящиеся в тепловом движении молекулы, слетевшие с ротора и несущие составляющую v_p , продвигаются вдоль канала статора с массовой скоростью, пропорциональной величине $v_p/2 \cos \alpha$. Коэффициент пропорциональности зависит от геометрии проточного тракта: профилей гребней, отношений зазора, ширины и длины канала к его глубине и выбора оптимального угла α , соответствующего рабочему отношению v_p/c [12]. Молекулы, слетевшие со статора, благодаря перемещению гребней ротора относительно их траекторий также вносят вклад в откачку. Для приближенной оценки параметров, определенных для КМН формулами (14) и (18), в последние необходимо ввести перечисленные факторы, а также исключить S_3 (12).

Например, вместо уравнения (14) возможно выражение

$$S_k = \frac{v_p F_{вх}}{4 \frac{v_p}{c} + \frac{\Gamma}{\sin \alpha \cos \alpha}}, \quad (27)$$

где $F_{вх} \sin \alpha = F_{кр} + F_{кст}$ — суммарное поперечное сечение пары каналов на роторе и на статоре. В связи с пересечением этих каналов, затрудняющим выбор U для уравнения (18), удобнее вести расчет сразу на полное число параллельно действующих каналов, оперируя проводимостью всей системы.

С большей достоверностью параметры ПМН определяются по формулам (25) и (26). Поскольку опубликованных данных по k_{22} , k_{21} для вариантов ПМН почти нет, они вычисляются с помощью математического моделирования на ЭВМ, в частности методом Монте-Карло. С накоплением этих данных инженерный расчет ПМН разных размеров будет так же прост, как и расчет ТМН. По предельным параметрам ПМН занимают промежуточное место между КМН и ТМН: быстрота действия выше КМН, но ниже ТМН, а коэффициент компрессии — несколько выше, чем у ТМН, но ниже, чем у КМН.

Откачное действие ГМН. Гибридные насосы строятся из расчета максимального использования преимуществ той или другой из рассмотренных схем. Поэтому первые от входа ступени ГМН представляют собой несколько рядов решеток ТМН из тонких профилей с целью получения наибольшей быстроты действия, а последующие ступени — КМН с винтовым каналом или многоканальный ПМН простейшего (наиболее технологичного) устройства. Характерный пример ГМН представляет насос Alcatel-450 (см. рис. 18,б).

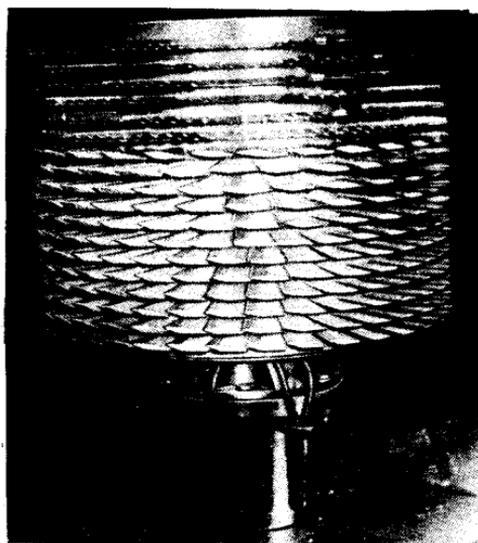
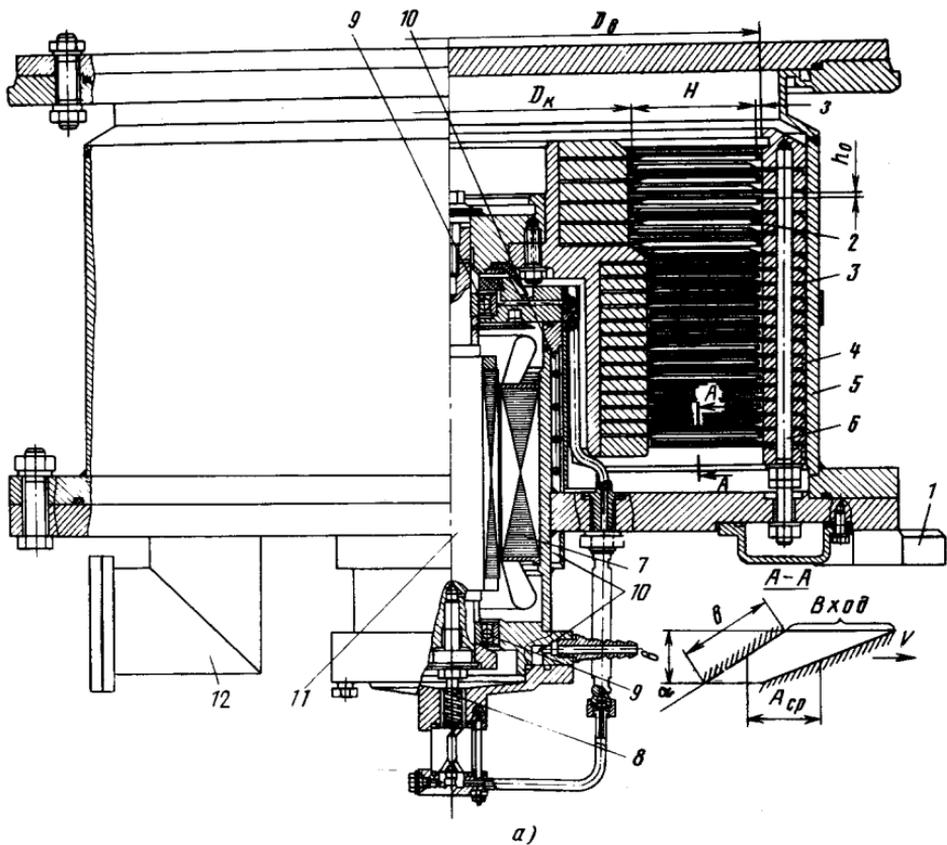


Рис. 16. Однопоточный насос
 НВТ-2500:
 а — разрез; б — ротор

Конструкция турбомолекулярных насосов. Представление об устройстве современных ТМН с осевым потоком дают схематические разрезы на рис. 12 и 16,а.

Для однопоточного насоса НВТ-2500 С (рис. 16) характерен колоколообразный консольный ротор с вертикальным валом 11. Диски 2 ротора, несущие венцы лопаток, чередуются с дисками 3 статора 4, вставленного в корпус 5. Откачка газа осуществляется от входного патрубка 1 к форвакуумному патрубку 12. В средней части вала размещен высокочастотный электродвигатель 7, вращающий ротор с частотой 12 000 об/мин (для малых насосов, имеющих повышенную частоту вращения, применяют бесколлекторные двигатели постоянного тока). Полость привода суфлируется трубкой, выведенной в патрубок 12. Электропитание подается через герметичный штепсельный разъем от преобразователя частоты (или выпрямителя), объединенного обычно со щитом управления. Шнек 8, укрепленный на нижней консоли вала, обеспечивает подачу смазки к подшипникам 9, корпуса которых имеют водяные рубашки 10. Для защиты откачного тракта от проникновения смазки предусмотрены охлаждаемый лабиринт верхнего подшипника и антимиграционные кольца, выполненные из несмачиваемого маслом материала и закрепленные на роторе и статоре. Разрабатываются конструкции стояночного маслоуплотнения, герметизирующего полость привода при остановках ротора. Опорные узлы ротора заключены в демпферы, улучшающие условия работы подшипников, снижающие шум и вибрации.

Сборочный радиальный зазор $z = 1,5$ мм при работе несколько уменьшается за счет вытяжки лопаток ротора. Осевой зазор $h \approx 2$ мм регулируется перемещением и фиксацией статора 4 с помощью шпилек 6.

Основные из перечисленных выше элементов содержат и двухпоточный серийный насос ТМН-200, выполненный по схеме рис. 12, г. На упрощенной схеме они показаны лишь частично. Цифровые обозначения соответствуют рис. 16. На описанных насосах получают остаточное давление $3 \cdot 10^{-8}$ Па.

Высота H передней решетки определяется оптимумом $D_p - 2H/D_p = d$ при наибольшем отношении $S_1/D_p^2 \sim F_{вх}/D_p^2 v_p$,

где $F_{вх} = \pi D_p^2 (1 - d^2)$, а v_p ограничивается отношением σ/γ допустимого напряжения к плотности материала. При воздействии только центробежных сил на корневые сечения лопаток, выполненных радиальными надрезами тонкого диска,

$$\frac{F_{вх}}{D_p^2} v_p \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \sqrt{d(1-d^2)} \sqrt{1+d^2}, \quad (28)$$

где подкоренное выражение имеет максимум при $d_{опт} = 0,625$, а при $d = 0,7$ уменьшается лишь на 1,5%. С учетом жесткости лопаток в реальных конструкциях $d \geq 0,7$, т. е. $H \leq 0,15 D_p$.

Явное достоинство насосов с вертикальным валом — предельная компактность и легкость благодаря естественному размещению первой решетки — роторного диска непосредственно у разъема входного фланца, а двигателя — внутри полого ротора.

Если из двух пакетов решеток от вертикального насоса построить насос с горизонтальным валом, то, учитывая входной патрубок и двигатель, его длина возрастает почти в 3 раза, а суммарная быстрота действия двух пакетов с учетом сопротивления входного патрубка и влияния роторных дисков друг на друга — только в 1,5 раза. Однако благодаря применению гибкого вала оказывается возможным поднять частоту вращения ротора выше допустимой для исходной схемы с консолью. Учитывая пониженное сопротивление предложенного фирмой Balzers - Pferffer сферического входного патрубка без защитной сетки, часто необходимой для предохранения от осколков вертикальных насосов, это форсирование скорости почти выравнивает удельную быстроту действия обоих насосов относительно габаритов.

В то же время насос с горизонтальным валом имеет лучшую ремонтоспособность, поскольку подверженные износу подшипники в нем легко доступны и могут быть заменены без разборки насоса только с помощью поочередного снятия крышек 13 (см. рис. 12, г). Специалисты утверждают, что балансировка ротора при такой замене не требуется. Приведенное сопоставление свидетельствует о жизнеспособности обеих конструктивных схем.

Насосы типа TVP, TRH, TRU снабжены стационарным нагревателем сферического входного патрубка, представляющим собой сферический жилет из силиконовой резины, армированный нитью собственно нагревателя.

Из других особенностей надо отметить фитильную систему смазки высокоскоростных подшипников некоторых из этих насосов. Такая система не требует маслососа, ее работа не зависит от фактической частоты вращения ротора, а ее применение в однопоточных насосах позволяет устанавливать последние не только вертикально, но и горизонтально, и под любым промежуточным углом.

Остановимся на характеристике основных узлов ТМН. Самый сложный, точный и дорогой узел — ротор — нуждается в тщательной динамической балансировке. Точность балансировки зависит от массы ротора и обратно пропорциональна квадрату рабочей частоты его вращения. Например, если дебаланс в 1г·см допустим для ротора ТВН-1000, то для разработанного на его базе НВТ-2500 С, имеющего удвоенную частоту вращения, допустимая неуравновешенность менее 0,25 г·см. При повышении срока службы подшипников эти требования могут быть еще жестче [16]. Недостаточная балансировка ротора приводит к опасным для работы вакуумных приборов вибрациям, нагрузкам на

подшипники и досрочному выходу машины из строя. Допускают виброускорение $a \leq 0,2 g$.

Имеет значение, при каких числах оборотов осуществляется балансировка, так как изменение частоты вращения неизбежно приводит к перераспределению масс в роторе. Идеальной в этом отношении представляется балансировка в вакууме при рабочем числе оборотов. Однако в большинстве случаев обходятся балансировкой на открытых станках с небольшим числом оборотов, например на станках резонансного типа. Вертикальные роторы балансируются на вертикальных станках для максимального приближения положения деталей подшипников к рабочему. При такой балансировке роторы должны обладать некоторой симметрией жесткости, чтобы не происходила разбалансировка при высоких частотах вращения. Опасность такой разбалансировки возрастает при многократных запусках и торможениях, прорывах атмосферы и других ударных нагрузках. Чтобы свести эту опасность к минимуму, последние конструкции ротора включают в себя всего 3—4 части, изготовленные из целых кусков металла, соединенные друг с другом с гарантированным натягом. Материалы ротора: цапфы или вал со втулкой — закаленная сталь, например X13; барабаны, диски, лопатки — твердый алюминиевый сплав, например АК-4-1. Отдельные образцы содержат титановые диски.

Не менее важными узлами являются опорные устройства. Требование продолжительной работы при высоких частотах вращения с учетом размещения подшипников в вакууме выполнимо только при применении подшипников самой высокой точности и быстроходности. Особые трудности представляет подбор радиально-упорных подшипников. Однако одной точности и легкости подшипников недостаточно. В связи с наличием кроме исходного дебаланса неидеальной жесткости деталей, собственной частоты колебаний вала и лопаток, несимметрии электромагнитного поля двигателя, зазоров и износа в подшипниках необходим подбор характеристик упругости обойм, в которые устанавливаются подшипники. Применяются обоймы кольцевые из армированной резины (ТVP), в виде тонкостенных разрезных пружинных втулок (ТМН), в виде плавающих на резиновых демпферах втулок, имеющих зазор между сопряженными металлическими поверхностями (Turbovac).

Насос с радиальным потоком состоит из многобарабанного ротора 1 (рис. 17) с центральным диском 2 и вертикальным валом 3, опирающимся через радиально-упорные подшипники 4 на основание 5 корпуса. Смазка подшипников — циркуляционная с помощью шнека, закрепленного на нижней консоли вала 3, как было показано на рис. 16а. Привод — от встроенного в форвакуум высокочастотного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, насаженным также на общий вал 3. Охлаждение подшипников и двигателя — водяное. Барабаны рото-

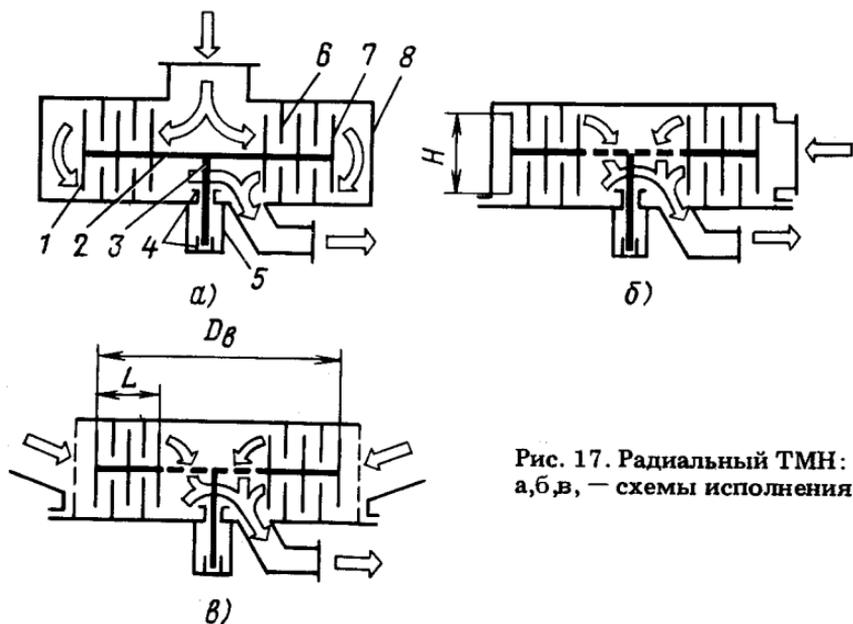


Рис. 17. Радиальный ТМН:
а, б, в, — схемы исполнения

ра имеют косые фрезерованные каналы, выполненные с перемычками, образующими бандажи для большей жесткости ротора. Барабаны выполнены симметрично относительно посадочных поясков и насажены один на другой и на центральный диск 2 в горячем состоянии с гарантированным при вращении натягом. Центральный диск и посадочные выступы барабанов полностью отгораживают верхний ярус рабочих решеток от нижнего. В кольцевые просветы между роторными барабанами вставляются с зазором 1,5... 2,5 мм барабаны статора, собранные в два пакета — верхний 6 и нижний 7. На барабанах статора выполнены каналы примерно зеркальной геометрии относительно роторных.

Насос может иметь несколько вариантов исполнения и включения в обслуживаемую установку, например в соответствии со схемами а, б, в рис. 17. По схеме а верхний корпус 8 имеет входное отверстие и присоединительный фланец в центре, соосно с ротором. Наклон каналов в решетках верхнего и нижнего ярусов обратный. Откачка ведется верхним ярусом от центра к периферии и нижним, включенным последовательно, от периферии к центру и форвакуумному патрубку, как указано стрелками. По этой схеме последовательно работает 36 решеток, поэтому обеспечивается максимально возможный коэффициент компрессии.

По схеме б верхний корпус 8 имеет входное отверстие и присоединительный фланец со стороны периферии ротора. Наклон каналов в соответственных решетках верхнего и нижнего ярусов одинаковый. Откачка ведется параллельно верхним и нижним пакетами решеток от периферии к центру и к форвакуумному патрубку.

По этой схеме последовательно работают по 18 решеток каждого яруса, поэтому коэффициент компрессии составляет примерно корень квадратный от полученного по схеме а. Приближение связано с влиянием центробежного эффекта и распределения решеток по располагаемой быстроте действия. Последнее в соответствии с рабочими площадями (сечениями) барабанов более выгодно для схемы б.

Сопоставление быстроты действия такого радиального и осевого ТМН (пакеты решеток одинаковых размеров) дает соотношение

$$\frac{S_{\text{Нрад}}}{S_{\text{Нос}}} = \frac{4\pi D_p \cdot H_{\text{рад}} \cdot v_{\text{р.рад}}}{\pi D_p^2 (1-d^2) v_{\text{р.ос}}}, \quad (29)$$

равное ~ 3 , при употребительных значениях $H_{\text{рад}} = 0,4 D_p$, $d = 0,7$, $v_{\text{р.рад}} = v_{\text{р.ос}}$, где расчетная величина $v_{\text{р.ос}}$ соответствует среднему диаметру $D_p - H$, а $v_{\text{р}}$ — наружному D_p .

По схеме в вместо верхнего корпуса устанавливается несколько ножек — опор верхнего статора и крышки (на рис. 17 показаны вертикальными штриховыми линиями). В таком виде насос встраивается внутрь технологической камеры и осуществляет откачку без потерь на присоединительные патрубки. Герметичное соединение с камерой — по фланцу основания 5.

Развитием этой схемы является опытно-промышленный насос НВТ-6300 Д, в котором статоры 6 и 7 связаны во второй ротор, приводимый во встречное вращение. Удельные характеристики такого насоса резко возрастают.

Совершенствование конструкций МН идет по пути создания бесшумных опор. Ряд простейших систем электромагнитного подвеса жесткого дискового ротора КМН был разработан Бимсом [15]. Непосредственному применению подобных систем для ТМН мешала сложность, большой разнос масс и нежесткость ротора. Поэтому конструкторские работы развивались в двух направлениях: первое — создание упрощенной, с жестким ротором проточной части, пригодной для обслуживания несложной системой подвеса; второе — создание систем подвеса, полностью заменяющих механические опоры, удерживающие ротор от перемещений как по вертикали, так и в горизонтальной плоскости.

Примером работы в первом направлении является опытный насос [12], откачивающие органы которого соответствуют схеме ПМН по табл. 5. Винтовые гребни выполнены на трех парах цилиндров ротора и статора под углом $\alpha = 45^\circ$. Направление откачки — от середины ротора к его цапфам, как в схеме ТМН-200.

В варианте на шарикоподшипниках (тип МН-250) насос допускал прогрев корпуса до 220°C . Измеренная быстрота действия составила 280 л/с по азоту при площади входа каналов 118 см^2 .

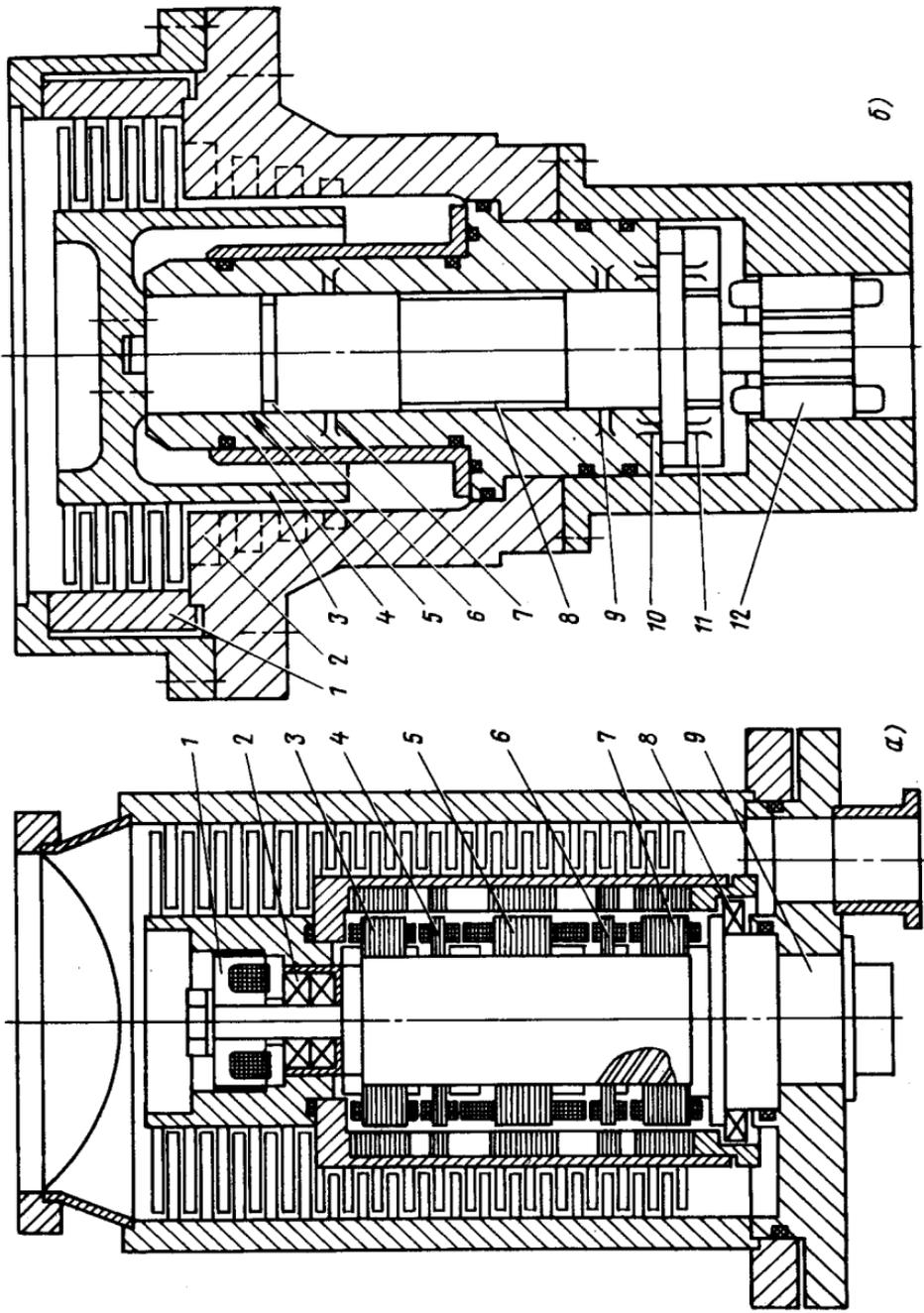


Рис. 18. Бесмасляные опоры роторов: а — Turbovac-550М; б — Alcatel-550М

Остаточное давление $7 \cdot 10^{-7}$ Па. В варианте с системой электромагнитного подвеса последняя устойчиво работала до частоты вращения около 20 000 об/мин. Перспективы промышленного выпуска имеет вариант насоса с комбинированной системой подвеса, использующей растяжку ротора на струне.

Как результат работ второго направления, может рассматриваться насос Turbovac - 550М (рис.18,а) с комплексной системой электромагнитного подвеса, вращения и стабилизации ротора, состоящей из силовых катушек вертикальной и горизонтальных 3,7, следящих датчиков 4,6 и обращенного электродвигателя 5, установленных на жестком стержне 9. Ответные магнитные кольца закреплены на роторе. Работа системы обеспечивается транзисторным управляющим блоком. Сухие подшипники 2,8 включаются в работу только в аварийных ситуациях.

Остаточное давление насоса $\leq 3 \cdot 10^{-9}$ Па, быстрота действия 530 л/с по азоту при диаметре входного патрубка 150 мм и скорости вращения ротора 30 000 об/мин. Разрабатываются системы подвеса для ТМН с быстротой действия 1500 и 3500 л/с.

На рис. 18,б показан разрез другого безмасляного насоса типа Alcatel-450 с ротором на газовых опорах. Проточная часть вида ГМН: входной участок 1 представляет собой пакет решеток ТМН, а выходной 2 — несколько винтовых каналов статора, работающих с гладкой поверхностью ротора 3. Вал ротора и сопрягаемый с ним опорный ствол 4 имеют несколько участков: 5 — винтовой канал динамического уплотнения, 6,8 — проточки, сообщающиеся с атмосферой, 7 и 9 — радиальные газовые подшипники, 10, 11 — упорные газовые подшипники, 12 — привод. Особенность конструкции — микронные зазоры в динамическом уплотнении и, следовательно, высокая точность изготовления и пониженная эксплуатационная надежность. Достоинство — возможность работы без форвакуумного насоса (на атмосферу) при малых потоках.

Из других направлений, позволяющих радиально улучшить характеристики, надо отметить работы в области охлаждаемых конструкций, в которых корпус расширен и отделен от гильзы статора, а последняя окружена криосорбционными элементами.

Встроенные приводы современных молекулярных насосов — высокочастотные или постоянного тока — не могут непосредственно включаться в электросеть промышленной частоты 50 Гц. Поэтому в комплект поставки всех выпускаемых насосов входит преобразователь частоты или источник питания.

В табл. 6 приведены сведения о наиболее распространенных преобразователях частоты — машинных, ферромагнитных и полупроводниковых.

Машинные преобразователи состоят из двигательной и генераторной частей. В обмотках последней генерируется напряжение нужной частоты путем подбора числа полюсов и частоты вращения ротора. К их недостаткам относится наличие вращающихся

Преобразователи частоты для ТМН

Тип	Выходная частота, Гц	Выходное напряжение, В	Мощность, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Машинные					
ПЧ-100	100	90*	до 14	1000x500x400	250
ЧС-7	200	220	до 10		—
Ферромагнитные					
ПЧСФ-2/3	50	40	до 3	730x730x450	120
	100	80	до 3		—
	150	95	до 3		—
ИП-НВТ-1000	300	190	1,2	410x500x500 (пр)	80
	450	220	1,2	600x560x1180 (ип)	—
Полупроводниковые					
СПЧ-10М	150	110	1,0	535x254x590	60
	300	220	1,0		—
ПТЧ-4-200У4	10-200	270	4,0	600x500x1200	—
ПТЧ-1-100	10-100	220	1,0	800x600x500	—
НТ-200	600	3x42	1,2	504x200x300	25
НТ-450 (ФРГ)	400	3x42	1,2	504x200x300	25
НТ-1500 (ФРГ)	350	3x42	1,2	504x200x300	25

* С трансформатором (330В без трансформатора)

деталей, износ подшипников, высокий уровень шума выпускаемых образцов. Например у ПЧ-100 и ЧС-7 — выше 70 дБ.

В ходе работ с насосами типа ТВН и НВТ машинные преобразователи вытеснены ферромагнитными. В последних вращается только поле (без ротора), которое преобразуется в катушках умножителя (удвоителя, утроителя и т. д.) с использованием нужных гармоник и обеспечением на выходе напряжения соответствующей повышенной частоты. Уровень шума и габариты этих преобразователей снижены по сравнению с машинными. Стабильность работы выше, чем у первых статических преобразователей других принципов действия, например СПЧ-10М, которым комплектовались насосы ТМН-200 и ТМН-100.

Способы улучшения эксплуатационных характеристик. Выше было показано, что характеристики ТМН (в первую очередь S_H , $\rho_{ост}$ и безмасляность) определяются очень большим числом факторов, которые можно объединить в три взаимосвязанные группы: 1 — фактор геометрии проточной части, 2 — фактор относительной скорости v_p/c , 3 — фактор внутренних потоков $Q_{вн}$.

Геометрия проточной части — чисто конструктивный фиксированный фактор. Несмотря на большое число составляющих, он хорошо изучен, и в настоящее время ТМН являет-

ся, пожалуй, единственным средством откачки, расчет которого настолько отработан, что заданные характеристики сразу реализуются в опытном образце в пределах точности измерений. В водке нуждается лишь механическая часть насоса.

Фактор относительной скорости v_p/c довольно подвижен.

При эксплуатации он неизбежно "плавает" в некоторых пределах вследствие изменения молекулярной массы откачиваемых газов, температуры T газов и стенок. Не исключены и отклонения от номинальной частоты вращения ротора.

Поэтому, как упоминалось выше, при проектировании выполняются расчеты пределов S_1 и p_2/p_1 для разных газов, обычно для воздуха и водорода, с учетом реальных колебаний температуры и частоты вращения ротора.

Наконец, фактор внутренних потоков $Q_r, Q_m, Q_{пер}$ (газовыделения, натекания и перетечек) — является наиболее неустойчивым, зависящим от многих случайных эксплуатационных причин, хотя в основе своей он также определяется конструкцией.

К объемным потокам надо прибавить еще поверхностную миграцию конденсатов, в первую очередь следов смазки.

К конструктивным мерам, снижающим вредные потоки, относятся дренажи и масляные барьеры в статоре, термостойкое резиновое уплотнение его высоковакуумной части, применение предварительно обезгаженной резины, суфлирование маслосистемы со специальным отстойником, выполненным в форвакуумной патрубке, снижение температурного режима привода благодаря водяному охлаждению и выбору порядка запуска и останова, наконец, применение стояночного уплотнения подшипниковой области.

Однако только упорядоченной эксплуатацией можно добиться практической безмасляности и низкого остаточного давления ТМН.

Прежде всего в маслосистему должно заливаться масло, предварительно обезгаженное при рабочих условиях, в целях предотвращения его вспенивания.

Форвакуумный трубопровод должен иметь защиту от проникновения паров масла из насоса предварительного разрежения, для чего рекомендуются азотные заливные ловушки или — что лучше — фильтр Петрянова¹.

Для защиты рабочей камеры от миграции смазки при остановленном роторе ТМН желательно иметь прогреваемый высоковакуумный затвор между камерой и насосом.

При его отсутствии на высоковакуумную сторону или на середину пакета статора устанавливают натекаТЕЛЬ для заполнения

1 Аринин Л. В. и др. Использование турбомолекулярного насоса ТМН-200 для получения вакуума, свободного от паров углеводородов. Вып. СФТИ — 2, 1977, 20 с.

системы сухим воздухом или азотом до давления ≈ 4000 Па во время остановки [12].

Нельзя проводить напуск с форвакуумной стороны, так как это ускоряет перенос углеводородов на высоковакуумную сторону. Особенно опасно повышение давления в полости привода, где сосредоточена смазка. При перекрытии форвакуумной линии во время работы ТМН быстро возрастает содержание водорода в камере.

Для очистки системы от углеводородов, которые со временем накапливаются в рабочей камере (например, вследствие поверхностной миграции), необходимо осуществлять периодический прогрев высоковакуумной части установки при температуре $\approx 400^\circ\text{C}$ и горловины насоса при температуре $\approx 100^\circ\text{C}$ в течение не менее 24 часов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что дает перепуск газа в объемных ВН?
2. Каковы пути борьбы с выбросом масла во всасывающие коммуникации золотниковых, пластинчато-роторных и пластинчато-статорных вакуумных насосов?
3. Почему сжатие в РЖВН близко к изотермическому и какие это дает преимущества?
4. В чем заключается принцип переноса молекул со стороны низкого давления на сторону высокого давления в ТМН?
5. Пути борьбы с загрязнением откачиваемого объема углеводородными соединениями в вакуумных системах с ТМН?
6. Зачем напускается балластный газ в механические вакуумные насосы?
7. Зачем масло подается в рабочие ячейки роторных ВН?
8. В чем различие процессов сжатия в поршневом ВН и ВН типа Рутс?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономова И.В. и др. Влияние вязкости рабочей жидкости на производительность и мощность роторных вакуумкомпрессоров. — Труды МВТУ, 1975, № 179, с. 11—14.
2. Беляев Л.А. О расчете параметров молекулярных турбонасосов. — В сб.: Вакуумная техника, вып. 1, Таткнигоиздат, 1968, с. 56—72.
3. Беляев Л.А., Тузанин Ю.М. Турбомолекулярные высоковакуумные насосы и агрегаты. — В сб.: Вакуумная техника, вып. 2, Таткнигоиздат, 1970, с. 124—129.
4. Вакуумное оборудование/Каталог. М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1976. 64 с.
5. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М., Мир, 1975. 622 с.
6. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. М., Мир, 1964. 715 с.

7. К у з н е ц о в В.И. Механические вакуумные насосы. М. — Л., Госэнергиздат, 1959. 280 с.

8. К у з н е ц о в В.И. и др. Эксплуатация вакуумного оборудования. М., Энергия, 1978. 208 с.

9. Л у б е н е ц В.Д., А в т о н о м о в а И.В. Расчет мощности гидродинамических потерь в жидкостнокольцевых машинах. — М., Труды МВТУ, № 146. 1971, с. 31—38.

10. П а у э р Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. М., Энергия, 1969. 527 с.

11. П и п к о А.И. и др. Конструирование и расчет вакуумных систем. М., Энергия, 1970. 504 с.

12. П о л у п р о в о д н и к о в о е и электривакуумное машиностроение/Сб., вып. 9, пр. МИЭМ, 1970. 242 с.

13. Р о з а н о в Л.Н. Вакуумные машины и установки. Л., Машиностроение, 1975. 336 с.

14. Р о т а ц и о н н ы е компрессоры/Под общей ред. Головинцова А. Г. М., Машиностроение, 1964. 257 с.

15. Т у з а н к и н Ю.М. и др. Молекулярные вакуумные насосы. М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975. 56 с.

16. Ф и з и к а и техника вакуума/Сб., изд. КГУ, 1974. 456 с.

17. Ф р о л о в Е.С. Теория и расчет турбомолекулярных вакуум-насосов/Учебное пособие. Изд. МВТУ, 1975. 140 с.

18. Ф р о л о в Е.С. и др. Вакуумные системы и их элементы/справочник-атлас. М., Машиностроение, 1968. 192 с.

19. Х л у м с к и й В. Ротационные компрессоры и вакуум-насосы. М., Машиностроение, 1971. 128 с.

20. Ш у м с к и й К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. М., Машиностроение, 1974. 576 с.