

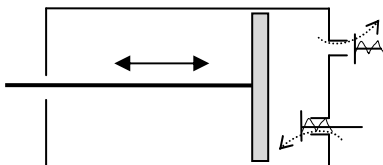
эффективно откачивать крупные системы до сверхвысокого вакуума. К этим насосам относятся ионные, адсорбционные и криогенные насосы, в которых используется явление поглощения газа рабочим телом насоса по физическому или химическому механизму сорбции.

2.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Возможны два способа получения вакуума – во-первых, удаление газа из откачиваемой системы за ее пределы, и, во-вторых, поглощение газа насосами, когда газ остается в пределах вакуумной системы. Первый способ откачки реализуется *газоперекачивающими вакуумными насосами*. Они характеризуются создаваемым в них потоком откачки с выбросом его из откачиваемого объема. По такому принципу откачки работают, в основном, *механические вакуумные насосы*, в которых перемещение газа происходит за счет механического движения рабочих частей насосов.

2.2.1. Объемная откачка

Принцип *объемной откачки* состоит в периодическом изменении объема рабочей камеры насоса и удалении газа отдельными порциями. Работа таких насосов основана на использовании закона Бойля–Мариотта, когда газ представляет собой непрерывную среду и рассматривается с макроскопической точки зрения.

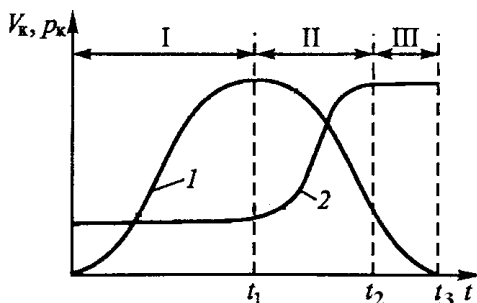


Р и с. 2.2. Схема
объемной откачки

Схема объемной откачки включает следующие этапы (рис. 2.2):

- всасывание газа за счёт расширения рабочей камеры;
- уменьшение объёма камеры и сжатие газа;
- удаление сжатого газа из рабочей камеры.

На рис. 2.3 показана диаграмма, поясняющая работу насосов объёмного действия – зависимость объёма камеры V_K и давления p_K в камере насоса от времени.



Р и с. 2.3. Диаграмма
объёмной откачки:
1 – объем камеры;
2 – давление в камере

В течение интервала времени t_1 осуществляется всасывание газа (область I), $t_1 - t_2$ – сжатие (область II), $t_2 - t_3$ – выхлоп (область III). Затем цикл повторяется.

Геометрическая быстрота объёмной откачки равна произведению объёма рабочей камеры насоса на частоту циклов откачки n :

$$S_{\Gamma} = V_K \cdot n.$$

Сопротивление входного патрубка насоса U уменьшает быстроту откачки; в соответствии с основным уравнением вакуумной техники (1.18):

$$S_0 = S_{\Gamma} \cdot U / (S_{\Gamma} + U).$$

Реальная быстрота действия вакуумного насоса окажется ещё меньше из-за обратного потока газа в насосе, который появляется вследствие обратных перетечек сжимаемого газа через пары уплотнения между камерами сжатия и всасывания, а также наличия в камере сжатия насоса так называемого «вредного» или «мертвого» пространства (не перекрываемого поршнем), из-за которого не весь сжатый газ выдавливается из насоса.

Производительность вакуумного насоса при молекулярном режиме течения газа равна разности прямого и обратного потоков $Q_H = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{обр}}$ (2.1). При $p_H = p_0$ производительность вакуумного насоса равна нулю и, следовательно, можно записать

$$Q_{\text{обр}} = Q_{\text{пр}} = S_0 \cdot p_0. \quad (2.2)$$

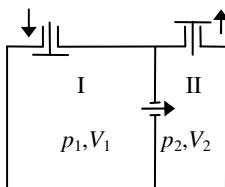
В свою очередь $Q_H = S_H \cdot p_H$ и $Q_{\text{пр}} = S_0 \cdot p_H$. Таким образом, подставляя эти выражения в (2.1), получим

$$S_H = S_0 \cdot \left(1 - \frac{p_0}{p_H}\right) = \frac{S_{\Gamma} U}{S_{\Gamma} + U} \cdot \left(1 - \frac{p_0}{p_H}\right) = K_{\lambda} S_{\Gamma}, \quad (2.3)$$

где K_{λ} – коэффициент передачи (объемный КПД). Реальная быстрота действия оказывается в K_{λ} раз меньше, чем геометрическая быстрота откачки. Эта величина составляет обычно 0,75–0,85 при давлениях более 10^2 Па и уменьшается до нуля при $p_H = p_0$.

Из рассмотрения выражений, полученных для объемной откачки, следует, что для увеличения быстроты действия S_H необходимо увеличивать объем камеры V_K , частоту циклов откачки n и проводимость входного патрубка U . Объем рабочей камеры и проводимость (диаметр) входного патрубка определяются габаритами насосов и зависят от их конкретных конструктивных особенностей. Частота циклов откачки имеет оптимальное значение, при превышении которого возможен перегрев насоса или незаполнение рабочей камеры откачиваемым газом при слишком коротком периоде всасывания.

Другой важный параметр – величина предельного давления насоса p_0 в значительной степени определяется паразитными потоками газа в точках соприкосновения вращающихся и трущихся частей этих насосов. Следовательно, необходимо сведение этих потоков к минимальным за счет уплотнения зазоров (масляное уплотнение) или их минимизации в безмасляных конструкциях.



Р и с. 2.4. Структурная схема двухступенчатого насоса

Для снижения предельного давления разработаны конструкции двухступенчатых насосов (рис. 2.4), фактически являющиеся двумя последовательно включенными насосами, объединенными в одном корпусе и с общим механическим приводом движения. Объем первой ступени делается большим, чем второй, для обеспечения усло-

вия неразрывности потока: $V_1 p_1 = V_2 p_2$. Две ступени откачки уменьшают обратный прорыв газов из камеры сжатия в камеру всасывания в силу снижения перепада давления на каждой из ступеней. В результате удастся значительно снизить предельное давление насоса. Существуют насосы и с большим числом ступеней.

Кроме того, быстрота действия насосов объемной откачки практически не зависит от рода откачиваемого газа, так как разница в проводимости входных патрубков по разным газам мало сказывается на быстроте действия насоса.

2.2.2. Насосы объемной откачки

Существует несколько конструктивных вариантов вакуумных насосов объемного действия: поршневые, мембранные, вращательные, спиральные. Механические вакуумные насосы объемного действия в основном применяют для работы в области давлений низкого или среднего вакуума. Такие насосы входят в состав большинства вакуумных установок, используются в качестве вспомогательных при работе с высоковакуумными насосами, а также широко применяются для самостоятельной откачки.

Поршневые насосы

В *поршневых вакуумных насосах* (рис. 2.5) цилиндры могут быть простого или двойного действия с водяным или воздушным охлаждением.



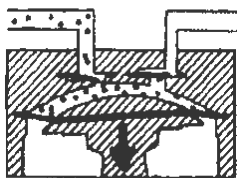
Р и с. 2.5. Схема поршневого вакуумного насоса

Скорость движения поршня обычно не превышает 1 м/с. Для работы без смазки используется покрытие цилиндров полимерными материалами. Поршневые насосы имеют предельное давление $3 \cdot 10^2$ Па для одноступенчатых и 10 Па для двухступенчатых конструкций. Улучшение предельного давления достигается перепуском газа из мертвого пространства в конце хода поршня во вторую

полость цилиндра. Быстрота действия современных поршневых насосов достигает 4000 л/с.

Мембранные насосы

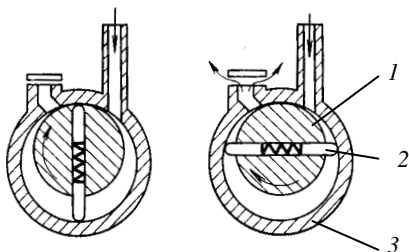
Разновидностью поршневых насосов являются *мембранные вакуумные насосы* (рис. 2.6). Они могут работать без смазки. Мембранные насосы имеют быстроту откачки от 1 до 30 л/с, ограниченную величиной упругой деформации. Насосы обычно начинают работать от атмосферного давления. Они могут применяться в одно-, двух-, трех- и четырехступенчатом исполнении с предельным давлением 10^3 – 10^2 Па соответственно.



Р и с. 2.6. Схема мембранного насоса

Вращательные насосы

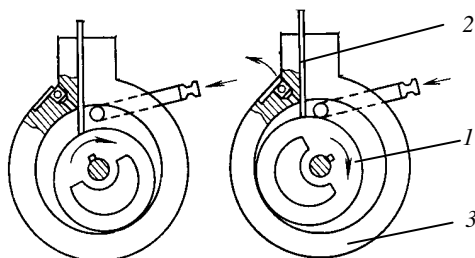
Циклическое повторение описанных операций объемной откачки положено в основу конструкций *вращательных вакуумных насосов*, в которых сжатие и нагнетание газа осуществляют вращающиеся поверхности твёрдого тела. Примеры таких насосов представлены на рис. 2.7–2.8.



Р и с. 2.7. Пластинчатороторный насос:
1 – ротор;
2 – разделительная пластина;
3 – статор

Ротор и статор насоса помещаются в бак, наполненный маслом. Масло уплотняет имеющиеся зазоры и заполняет вредные про-

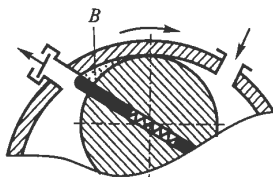
странства. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма. Современные насосы работают при $n \approx 1400$ об/мин.



Р и с. 2.8. Пластинчато-статорный насос:

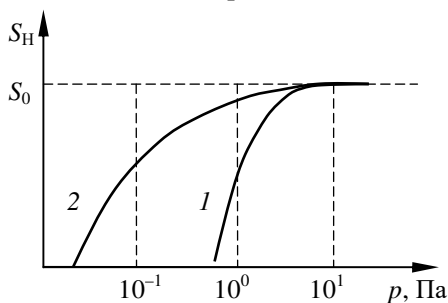
- 1 – ротор;
- 2 – разделительная пластина;
- 3 – статор

Источниками паразитного газового потока самого насоса являются пары испаряющегося масла и воздух, растворённый в масле и находящийся во вредных пространствах (рис. 2.9).



Р и с. 2.9. Вредное пространство пластинчато-роторного насоса (B)

На рис. 2.10 показана зависимость быстроты действия от входного давления для вращательных масляных насосов.



Р и с. 2.10. Быстрота действия вращательных насосов с масляным уплотнением:

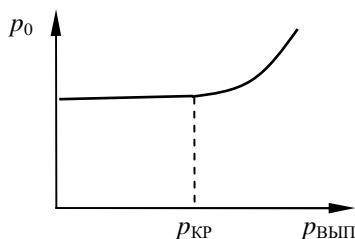
- 1 – одноступенчатый;
- 2 – двухступенчатый

У насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов в основном определяется качеством изготовления. У одноступенчатых насосов оно составляет обычно $(2,7-6,6) \cdot 10^{-1}$ Па, а полное остаточное давление 2,0–6,6 Па. Предельное давление двухступенчатых насосов – 10^{-3} Па.

Полное остаточное давление вакуумного насоса зависит от состава и состояния уплотняющей жидкости – масла. Пары на входе насоса являются не парами масла, а в основном продуктами его разложения (крекинга). В то время как давление насыщенных паров при комнатной температуре для масел, используемых в насосах с масляным уплотнением, меньше 10^{-2} – 10^{-3} Па, легколетучие продукты крекинга масла имеют гораздо более высокое давление насыщения. Крекинг масла в насосах происходит из-за возникновения высоких местных температур в области контактов трущихся поверхностей, которые не полностью разделены слоем масла. Наличие обратного потока продуктов крекинга масла приводит к загрязнению откачиваемых объемов.

Для уменьшения обратного потока, поступающего из насоса в откачиваемый сосуд, на впускном патрубке насоса устанавливают ловушки. Механические ловушки представляют собой устройства, препятствующие прямому пролёту паров масла из насоса в откачиваемый объект. Поглощение паров в ловушках осуществляется адсорбцией на стенках капиллярных каналов сорбционных материалов.

Давление запуска и выпускное давление насосов обычно равны атмосферному, но в некоторых случаях могут изменяться.



Р и с. 2.11. Зависимость предельного давления от выпускного

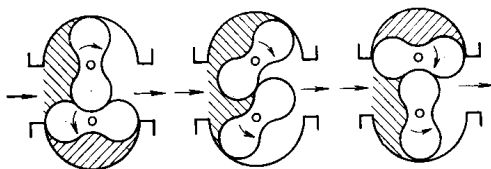
При выпускных давлениях $p_{\text{вып}}$, больших некоторого критического значения – $p_{\text{кр}}$ (наибольшее выпускное давление), нарушается состояние герметичности масляного уплотнения в зазорах насоса; большое давление выдавливает масло. В результате наблюдается резкое ухудшение предельного давления (рис. 2.11). При $p_{\text{вып}} < p_{\text{кр}}$ предельное давление практически постоянно и не зависит от выпускного.

При откачке вакуумных систем с большим количеством паров воды или других газов с высокими значениями давления насыщенного пара возникает опасность загрязнения насоса откачиваемыми веществами. **На этапе сжатия может образовываться конденсат, который смешивается с маслом и ухудшает его свойства.** Затем попавший в масло конденсат будет вновь испаряться в камере насоса. В этом случае насосы снабжают *газобалластным устройством* для дозированной подачи неконденсирующегося газа в камеру сжатия, позволяющим снизить коэффициент компрессии откачиваемого пара в образующейся смеси газов. В пластинчатых насосах в качестве газобалластного устройства используется натекаТЕЛЬ для подачи атмосферного воздуха в рабочую камеру. Если натекаТЕЛЬ закрыт, то насос работает в обычном режиме.

Пластинчато-роторные вакуумные насосы выполняют обычно на невысокие скорости откачки (< 10 л/с). Это объясняется тем, что в местах контакта пластин с камерой насоса достигаются высокие относительные скорости, что ограничивает создание крупных насосов. В золотниковых (плунжерных) насосах трение происходит лишь в направляющей при небольшой относительной скорости. Поэтому средние (до 100 л/с) и крупные (> 100 л/с) насосы выполняют плунжерными. Пластинчато-статорные насосы в силу присущего набора недостатков (большие относительные скорости пластины и ротора и неуравновешенность массы) в настоящее время практически не изготавливаются.

Двухроторные насосы

Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия удобны вращательные (ротационные) вакуумные насосы с обкатываемыми профилями. Наиболее распространены *двухроторные вакуумные насосы*, имеющие роторы с лемнискатными (по форме напоминающими цифру 8) профилями. Профили роторов таковы, что при взаимной обкатке не соприкасаются (рис. 2.12). Вращение роторов обеспечивается синхронизирующей передачей. Вращаются роторы в разные стороны. За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает заштрихованный объём газа из области откачки в область предварительного разрежения.



Р и с. 2.12. Диаграмма работы двухроторного насоса Рутса

Основные достоинства двухроторных вакуумных насосов – отсутствие трения в роторном механизме, отсутствие масла, простота устройства и возможность хорошей динамической балансировки роторов, в связи с чем достигаются большие ($n \approx 3000$ об/мин) скорости вращения и высокая быстрота действия насосов при сравнительно малых габаритах и массе.

Наличие рабочих зазоров в таких насосах приводит к тому, что величина впускного давления всегда является функцией величины выпускного давления. Обратный поток газа определяется технологическими зазорами в роторном механизме:

$$Q_{\text{ОБР}} = U_3 \cdot (p_{\text{ВЫП}} - p_{\text{Н}}),$$

где U_3 – проводимость зазоров.

Обратный поток газа можно также выразить через предельное давление и оптимальную быстроту действия насоса (2.2):

$$Q_{\text{ОБР}} = S_0 \cdot p_0.$$

Откуда при $p_{\text{Н}} = p_0$ найдём коэффициент компрессии (сжатия) насоса:

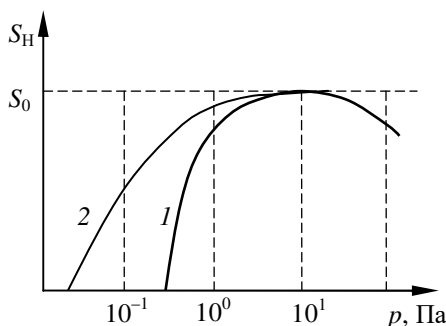
$$K = \frac{p_{\text{ВЫП}}}{p_{\text{Н}}} = 1 + \frac{S_0}{U_3}.$$

Величина K зависит от проводимости зазоров, возрастающей с повышением давления. В связи с этим зависимость быстроты действия от давления имеет характерный спад в области высоких давлений (рис. 2.13).

При уменьшении впускного давления от атмосферного $S_{\text{Н}}$ вначале плавно растёт, что связано с переходом режима течения газа в молекулярный. При этом за счёт уменьшения U_3 падает величина обратного потока и K достигает своего максимума. После достижения S_0 быстрота действия начинает уменьшаться за счёт увеличения разности давлений на сторонах насоса.

В высоком вакууме для одной ступени $K \sim 50$, а при атмосферном давлении $\sim 1,5$. В многоступенчатом варианте может обеспечиваться выхлоп на атмосферу.

Предельное давление одноступенчатых насосов $5 \cdot 10^{-1}$ Па, двухступенчатых – $4 \cdot 10^{-2}$ Па. При работе с ловушкой – 10^{-3} Па. Наибольшее выпускное давление одноступенчатых насосов от 10^2 до 10^3 Па.



Р и с. 2.13. Быстрота действия двухроторных насосов:

1 – одноступенчатый ;
2 – двухступенчатый

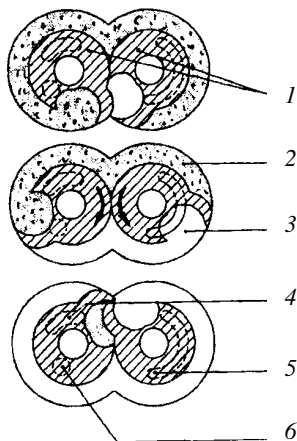
Двухроторные вакуумные насосы при тех же габаритах имеют повышенные быстроты действия по сравнению с насосами с масляным уплотнением. Быстрота их действия находится в пределах от 5 до 5000 л/с (существуют модели до 25000 л/с).

Быстрота действия у двухроторных насосов по лёгким газам всегда меньше, чем по тяжёлым. Это объясняется большой проникающей способностью лёгких газов через зазоры в насосе и, следовательно, большими величинами обратных потоков. Например, быстрота действия по H_2 на 10 % меньше чем по N_2 .

Кулачковые насосы

Для кулачковых вакуумных насосов с несимметричными валами с кулачками и впадинами (рис. 2.14) можно получить большие коэффициенты компрессии за счет снижения объема рабочей камеры и быстроты откачки. В поперечном сечении насос представляет два параллельных цилиндра. Внутри них два согласованно вращающихся в противоположные стороны ротора. Их вращение строго синхронизировано. Для достижения оптимальной откачки зазоры

между роторами, а также между роторами и стенками насоса очень малы. Они составляют несколько сотых миллиметра. Роторы периодически открывают и закрывают впускное и выпускное торцевые отверстия. На одних и тех же валах при наличии перегородок могут располагаться несколько последовательно соединенных ступеней откачки. Трех- и четырехступенчатые насосы при безмасляной откачке обеспечивают выхлоп непосредственно в атмосферу.



Р и с. 2.14. Принцип работы кулачкового насоса:

- 1 – роторы;
- 2 – компрессорная камера;
- 3 – впускной объем;
- 4 – выпускное отверстие;
- 5 – впускное отверстие;
- 6 – промежуточная ступень газа продувки

Спиральные насосы

Основу *спиральных вакуумных насосов* составляют две одинаковые спирали или ленты, свернутые в спирали, называемые *эвольвентной кривой*. Одна спираль фиксируется и остается неподвижной в процессе работы. Другая спираль движется по орбитам вокруг стационарной и создает газовые объемы серповидной формы, позволяющие газу двигаться внутрь насоса (рис. 2.15). Эти газовые объемы по мере вращения подвижной спирали сжимаются. Газ движется вдоль спирали по направлению к центру спирали. Когда газ достигает центра, он выходит через выпускной клапан. Такие насосы имеют скорость откачки до 60 л/с, малые размеры, низкое остаточное давление около 10^{-1} Па.



Р и с. 2.15. Принцип откачки спирального насоса

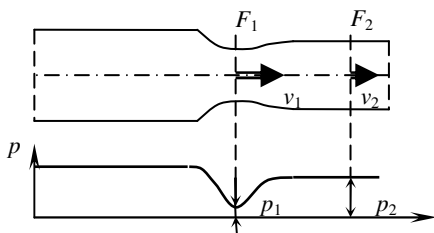
2.2.3. Струйная откачка

Процесс откачки можно организовать, заставив молекулы газа перемещаться в нужном направлении, т.е. придавая им направленную скорость движения (переноса). **На передаче молекулам направленного движения струями пара, газа или воды основан принцип *струйной откачки*.** При этом в зависимости от скорости и плотности струи и давления газа изменяются как режим истечения струи, так и механизм захвата откачиваемого газа.

Согласно кинетической теории внутреннее трение газов обусловлено передачей импульса между молекулами движущихся слоев. При движении рабочего тела (пар или жидкость) в трубке переменного сечения устанавливается перепад давлений (рис. 2.16), описываемый уравнением Бернулли:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2),$$

где p_1 и v_1 – давление и скорость в сечении F_1 ; p_2 и v_2 – давление и скорость в сечении F_2 ; ρ – массовая плотность вещества.

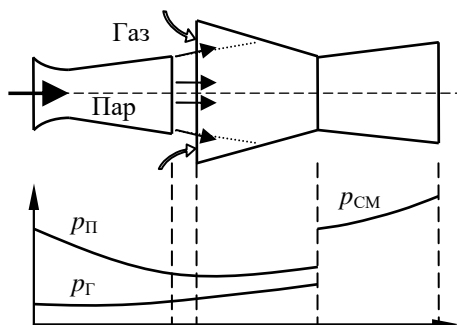


Р и с. 2.16. Изменение давления вдоль трубки переменного сечения

Понижение давления в месте сужения трубки образуется за счёт преобразования потенциальной энергии струи в кинетическую.

Если теперь сечение трубки с пониженным давлением сообщить с откачиваемым объёмом, то газ будет устремляться в эту область и за счёт внутреннего трения увлекаться вместе со струей рабочего вещества.

В технике получения вакуума в качестве рабочего вещества чаще используют пары кипящего вакуумного масла. Форма сопла (эжектора) подбирается такой, чтобы на выходе из него пар двигался со сверхзвуковой скоростью, сопоставимой с тепловой скоростью молекул откачиваемого газа. При этом **на границе струи появляется турбулентный слой, приводящий к интенсивному захвату откачиваемого газа и сообщению последнему направленной скорости**. Работающие по этому механизму вакуумные насосы называются *эжекторными*. На рис. 2.17 приведена схема эжекторного сопла с характеристиками давления рабочей паровой струи $p_{\text{П}}$, давления откачиваемого газа $p_{\text{Г}}$ и парогазовой смеси $p_{\text{СМ}}$. Образовавшаяся парогазовая смесь из камеры смешения попадает в расширяющийся диффузор, в котором скорость потока уменьшается, а статическое давление растёт. Здесь энергия скорости снова переходит в энергию давления, вследствие чего из диффузора газ выходит при давлении, значительно превышающем давление на входе в смесительную камеру. Таким образом, выброс газа и пара из насоса происходит при повышенном давлении.



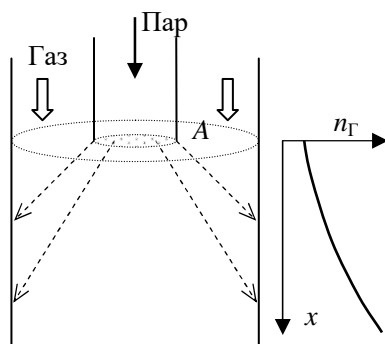
Р и с. 2.17. Схема и характеристики парового эжектора

Лучшие результаты по сжатию откачиваемого газа были достигнуты для так называемого сопла Лаваля. Эжекторный насос работает в области промежуточного давления (больше 10^{-1} Па),

поэтому обычно используется в качестве выпускной ступени высоковакуумных насосов, т.е. между высоковакуумным и вспомогательным форвакуумным насосом, обеспечивающим сжатие и выброс газа на атмосферу. При высоких давлениях откачиваемого газа механизм откачки чисто вязкостный, поэтому для лучшего откачивающего действия используются струи пара повышенной плотности.

При низком давлении откачиваемого газа ($<10^{-1}$ Па), когда λ соизмерима с размерами рабочей камеры насоса, роль вязкостного захвата газа становится малой, и механизм увлечения газа целиком определяется диффузией молекул газа в струю. На принципе передачи импульса молекулам откачиваемого газа при соударениях с более тяжёлыми молекулами струи пара, куда они попадают за счёт самодиффузии, основана работа *диффузионных вакуумных насосов* также. Вероятность диффузионного захвата молекул газа повышается с понижением плотности паровой струи, чем объясняется работа диффузионных насосов при пониженных давлениях струй на впускной стороне.

При истечении струи пара в высокий вакуум происходит ее расширение за счет тепловых скоростей молекул. В случае равенства скорости истечения струи и скорости звука струя выходит из сопла под углом 45° к его оси (рис. 2.18).



Р и с. 2.18. Схема паровой струи диффузионного насоса

Теоретическая быстрота действия паровой струи диффузионного насоса определяется геометрическими размерами сопла и плотностью откачиваемого газа:

$$S_T = \frac{d(V)}{dt} = \frac{d(N)}{n \cdot dt} = \frac{A}{n} \cdot (v_1 - v_2), \quad (2.4)$$

где A – проекция поверхности паровой струи на ортогональное сечение насоса; n – концентрация газа у входа в насос; v_1 и v_2 – количество молекул откачиваемого газа, ударяющихся и вылетающих в единицу времени с единицы площади A . В соответствии с выражениями для v (1.6) и v_{AP} (1.4) формулу (2.4) для быстроты действия можно переписать:

$$S_T = \frac{A}{4n} \cdot \sqrt{\frac{8k}{\pi m}} \cdot (n\sqrt{T} - n_T\sqrt{T_T}),$$

где n_T – концентрация газа в паровой струе; T и T_T – температура газа у входа в насос и в паровой струе; m – масса молекул газа. С учётом того, что $n_T/n = p_O/p$ (из условия равенства входящего и выходящего потоков при p_O), запишем

$$S_T = A \cdot \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{m}} \cdot \left(1 - \frac{p_O}{p} \cdot \sqrt{\frac{T_T}{T}}\right), \quad (2.5)$$

Таким образом, быстрота действия струи зависит от температуры и рода газа, при этом тяжёлые молекулы откачиваются с меньшей быстротой действия: $S_1/S_2 \sim (m_2/m_1)^{1/2}$.

Реальная быстрота действия оказывается меньше теоретического значения, что связано с определенной эффективностью захвата струей молекул откачиваемого газа

$$S_O = S_T \cdot H_O,$$

где H_O – коэффициент захвата струи, составляющий $\sim 0,3...0,5$.

Для определения коэффициента компрессии и предельного давления рассмотрим процессы в паровой струе насоса. Производительность откачки насоса:

$$Q_H = Q_{ПР} - Q_{ОБР}.$$

Поток откачиваемого газа равен произведению концентрации газа в паровой струе на скорость паровой струи в направлении откачки: $Q_{ПР} = n_T(x) \cdot v_{П}$. Обратный поток возникает за счёт обратной диффузии молекул газа в паровой струе:

$$Q_{ОБР} = D \cdot \frac{dn_T(x)}{dx},$$

где D – коэффициент диффузии. При достижении предельного давления $Q_H = 0$, следовательно,

$$n_{\Gamma}(x) \cdot v_{\Pi} - D \cdot \frac{dn_{\Gamma}(x)}{dx} = 0.$$

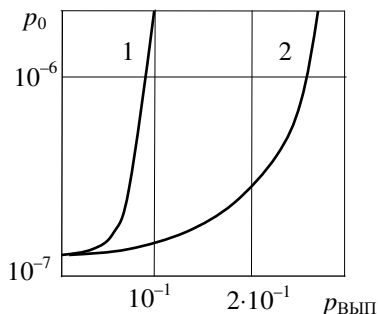
Интегрируя выражение по длине струи и считая, что в струе пара газ подчиняется уравнению газового состояния, т.е. $dn_{\Gamma}/n_{\Gamma} = dp_{\Gamma}/p_{\Gamma}$, получим

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_{\Pi}}{D} (x_2 - x_1).$$

Таким образом, коэффициент компрессии паровой струи для случая предельного вакуума

$$K = \frac{p_{\text{вып}}}{p_0} = \exp(v_{\Pi} \cdot l / D), \quad (2.6)$$

где l – длина струи. Для увеличения коэффициента компрессии необходимо повышать скорость паровой струи и увеличивать её плотность, так как D обратно пропорционален плотности пара в струе. Величина D для лёгких газов значительно больше, чем для тяжёлых, поэтому степень сжатия и наибольшее выпускное давление лёгких газов будут всегда ниже, чем для тяжёлых (рис. 2.19).

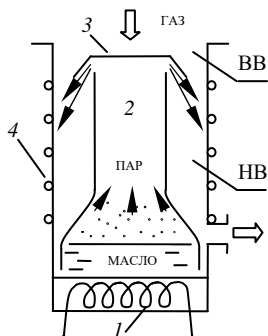


Р и с. 2.19. Зависимость предельного давления от выпускного для:
1 – гелия;
2 – воздуха

2.2.4. Характеристики диффузионных насосов

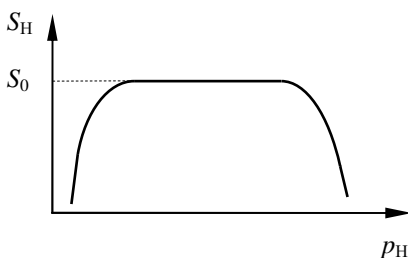
Простейший диффузионный вакуумный насос (рис. 2.20) состоит из кипятильника 1, паропровода 2, тарельчатого сопла 3, позво-

ляющего развернуть струи пара в направлении откачки, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков. Струя пара в таком насосе представляет собой кольцевой усеченный конус, образованный постоянным потоком рабочего вещества. Выходящие из сопла пары масла конденсируются на охлаждаемых стенках насоса и стекают в кипятыльник. Продифундировавший в струю пара газ выделяется при конденсации парогазовой смеси и откачивается через выпускной патрубок вспомогательным насосом.



Р и с. 2.20. Схема диффузионного вакуумного насоса:
ВВ – высокий вакуум
НВ – низкий вакуум

Основной характеристикой вакуумных насосов является быстрота действия. Процесс диффузии газа в струю пара в данном типе насосов практически не зависит от входного давления. Поэтому S_H в средней области рабочих давлений остается практически постоянной (рис. 2.21).

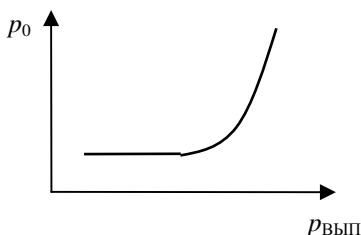


Р и с. 2.21. Зависимость быстроты действия насоса от впускного давления

Уменьшение быстроты действия при приближении давления к предельному обусловлено обратными потоками газов и паров. Со снижением впускного давления уменьшается величина прямого потока откачки и он сравнивается с обратным потоком.

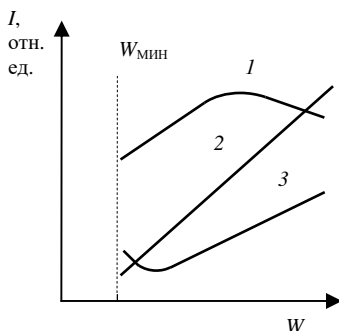
При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения газа S_H снижается в связи с падением скорости диффузии молекул газа в струю пара.

Кроме того, верхний предел рабочего давления насоса определяется давлением паров рабочей жидкости в струе. Ограниченность быстроты действия вспомогательного насоса может привести к значительному возрастанию выпускного давления с ростом p_H и нарушению работы паровой струи, проявляющемуся в ее отрыве от стенок насоса и сопровождающемся обратным перетеканием газа. Срыв характеристики насоса наступает при равенстве $p_{\text{вып}}$ и давления паровой струи. При низких значениях $p_{\text{вып}}$ предельное давление насоса практически постоянно (рис. 2.22).



Р и с. 2.22. Зависимость предельного давления от выпускного

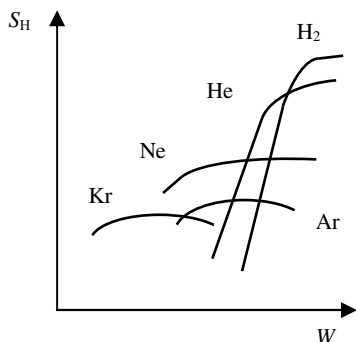
Важным параметром для диффузионного вакуумного насоса является мощность подогревателя (рис. 2.23). Откачивающее действие насоса проявляется с некоторого порога мощности подогревателя, связанного с парообразованием.



Р и с. 2.23. Зависимость основных параметров диффузионного насоса от мощности нагревателя: 1 – быстрота действия; 2 – выпускное давление; 3 – предельное давление

При увеличении мощности подогрева за счет увеличения $v_{\text{п}}$ быстрота действия насоса сначала увеличивается, а затем уменьшается

ется из-за увеличения плотности струи и уменьшения захвата газа. Выпускное давление возрастает, что также связано с увеличением плотности струи пара и уменьшением обратной диффузии газа. Предельное давление насоса сначала уменьшается из-за снижения обратного потока газа через струю, а затем начинает возрастать вследствие повышенного потока в систему паров разлагающегося масла.

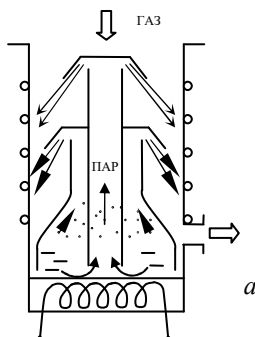


Р и с. 2.24. Быстрота действия насоса по разным газам в зависимости от мощности нагревателя

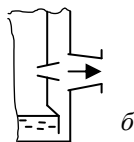
Поскольку давления $p_{\text{вып}}$ и p_0 обнаруживают зависимость от мощности подогрева, то быстрота действия для разных газов, определяемая степенью сжатия, также должна зависеть от W (рис. 2.24).

При мощности нагревателя, оптимальной для тяжелых газов (Ar , Ne , Kr), быстрота откачки лёгких газов (H_2 , He) значительно меньше. С увеличением W быстрота откачки для легких газов резко увеличивается до некоторого значения, определяемого обратной диффузией и уменьшением проникновения газов в плотную струю из области низкого вакуума. Следовательно, с точки зрения откачки различных газов **диффузионный вакуумный насос обладает ярко выраженной селективностью откачки**, и для обеспечения эффективной откачки конкретного газа требуется выбор определенного режима работы насоса.

С целью расширения диапазона рабочих давлений диффузионные насосы делают многоступенчатыми, что эквивалентно объединению нескольких насосов в одном корпусе. Ступени в таком насосе включены последовательно, имеют общий испаритель, но отдельные паропроводы и разные сопла (рис. 2.25, а).



Р и с. 2.25. Двухступенчатый пароструйный насос (а);
эжекторное сопло (б)



Насосы такого типа называются *разгоночными* (или *фракционирующими*). На дно кипятильника у них установлен лабиринт. При такой конструкции легкокипящие компоненты масла будут вскипать быстрее и пары этой фракции попадут в нижнее сопло, а в верхнее сопло попадают более тяжелые фракции с низкой упругостью пара, что обеспечивает меньшие величины предельного давления.

Из условия неразрывности потока $Q = S_i p_i$ следует, что в соответствии с последовательным увеличением давления откачиваемого газа $p_2 > p_1$ нужно снижать быстроту откачки $S_2 < S_1$. Это достигается уменьшением площади поверхности струи нижнего сопла и увеличением её плотности, таким образом можно еще больше повысить $p_{\text{вып}}$ и общий коэффициент компрессии $k = \sum k_i$, где k_i – коэффициент компрессии i -й ступени. Для большего увеличения выпускного давления насосы снабжаются выпускным эжекторным соплом (рис 2.25, б).

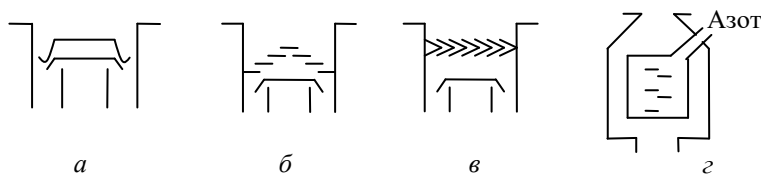
Диффузионные насосы обеспечивают возможность получения широкого диапазона быстроты действия при пропорциональном изменении геометрических размеров конструкций (от 10^{-3} до $10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$). Величина выпускного давления составляет десятки паскалей. Для большинства современных диффузионных насосов характерна значительная степень сжатия (10^4 по водороду и 10^{10} по азоту), что позволяет достигать высокого и сверхвысокого вакуума даже при умеренном форвакууме, но при этом в системе не должно быть заметного количества H_2 и He .

Предельное остаточное давление диффузионного насоса зависит от следующих факторов:

- обратной диффузии откачанных молекул газа;
- давления насыщенных паров рабочей жидкости или продуктов её разложения;
- выделения газа из конструкционных элементов;
- растворения газа в рабочем теле с последующим испарением при нагреве.

Наиболее серьёзную проблему создает давление насыщенных паров рабочей жидкости и продуктов её разложения.

В качестве рабочей жидкости пароструйных насосов применяются минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот (ПФЭ – полифениловые эфиры), кремнийорганические жидкости (ПФМС – силиконовое масло). Несмотря на то, что давление паров некоторых из них составляет около 10^{-8} Па при $T = 273$ К, жидкости могут разлагаться на компоненты, обладающие высоким давлением паров (или не конденсирующиеся) и вследствие этого попадающие в вакуумную систему.



Р и с. 2.26. Отражатели пароструйного насоса (*а* – отражательный колпачок; *б* – дисковый отражатель; *в* – шевронный отражатель) и азотная ловушка (*г*)

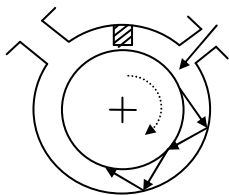
Обратный поток может быть уменьшен на несколько порядков величины использованием отражателя соответствующей конструкции во впускном отверстии насоса (рис. 2.26, *а–в*). Рабочая жидкость конденсируется на поверхности отражателя и возвращается в насос. Поверхности отражателей охлаждаются, как правило, водой. Наиболее эффективен шевронный отражатель, он позволяет уменьшить потери масла ~ 3000 раз и более. Однако любой отражатель перекрывает впускное отверстие, что снижает скорость откачки насоса (при шевронном – на 50%).

Применяются также различного рода охлаждаемые ловушки (рис. 2.26, з), устанавливаемые над насосами. В системах сверхвысокого вакуума следует использовать и отражатель и ловушку, при этом возможно получить с помощью современных диффузионных насосов вакуум лучше 10^{-8} Па. Однако всегда следует помнить о возможности попадания в систему незначительных количеств масла, что в некоторых случаях недопустимо. Так, некоторые масла (например, силиконовое) при попадании в систему образуют изолирующие пленки на электродах в результате полимеризации масла под действием электронной бомбардировки.

2.2.5. Механические молекулярные насосы

В основе принципа молекулярной откачки используется специфика удара молекул газа о поверхность твёрдого тела. При столкновении с поверхностью молекулы не отражаются, как упругие шары, а удерживаются на ней некоторое время, после чего удаляются от поверхности в направлениях, подчиняющихся распределению по «закону косинуса». Приведя в движение твердое тело, мы тем самым сообщим сталкивающимся с его поверхностью молекулам газа скорость, направленную в сторону движения поверхности. На этом способе откачки основана работа механических молекулярных вакуумных насосов.

Простейшая схема реализации молекулярной откачки состоит из металлического цилиндра – ротора, вращающегося с большой скоростью внутри закрытого корпуса – статора (рис. 2.27).



Р и с. 2.27. Схема механической молекулярной откачки

Для эффективной молекулярной откачки необходимо, чтобы приобретаемая молекулой дополнительная скорость превосходила скорость её теплового движения и существовал режим молекулярного течения газа. Угловая скорость вращения ротора ω может

быть определена из условия равенства линейной скорости вращения v и тепловой скорости молекул v_{AP} . Для воздуха при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v_{AP} = 465\text{ м/с}$, тогда при радиусе ротора $R = 0,5\text{ м}$ угловая скорость вращения ротора

$$\omega = \frac{v}{R} \geq \frac{v_{ap}}{R},$$

и частота вращения ротора

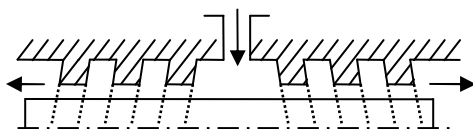
$$n = \frac{\omega}{2\pi} = 10\,000\text{ об/мин}.$$

Максимальная быстрота действия, которая может быть получена в такой схеме откачки $S_0 \sim F \cdot \omega$, где F – постоянный множитель, определяемый геометрией и площадью поверхности рабочего зазора. Быстрота действия насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора. В современных насосах она может достигать $30\,000\text{--}60\,000\text{ об/мин}$.

Для того чтобы значение F было больше, необходимо увеличивать площадь части поверхности ротора, взаимодействующей с входящим потоком газа, но зазор между ротором и статором при этом должен быть малым. В одной из конструкций поверхность была увеличена за счет пазов в роторе, входящих в перегородки статора (рис. 2.28).



Р и с. 2.28. Конструкция молекулярного насоса

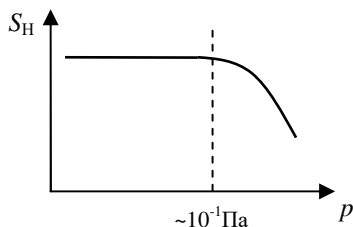


Р и с. 2.29. Насос Хольвека

В другой конструкции (рис 2.29) ротор – гладкий цилиндр, а каналы откачки образованы двойными винтообразными канавками в

статоре. Для нормальной работы насоса зазор между ротором и статором должен быть не более 0,1 мм.

Максимальная быстрота действия таких насосов обычно не превышает 100 л/с из-за малого поперечного сечения каналов. Они эффективно работают в режиме молекулярного течения газа. При увеличении давления и переходе режима течения газа в молекулярно-вязкостный и вязкостный эффективность откачки падает за счет возникновения отдельных слоёв газа и уменьшения вероятности ударов молекул о поверхность ротора (рис. 2.30).



Р и с. 2.30. Быстрота действия молекулярного насоса

Для определения коэффициента компрессии молекулярного насоса рассмотрим дифференциальное уравнение течения газа через канал постоянного поперечного сечения в установившемся режиме. Запишем разность прямого и обратного потоков $Q_H = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{обр}}$:

$$Q_H = S_0 \cdot p - C \cdot \frac{dp}{dl}, \quad (2.7)$$

где $C = U_K \cdot l_K$; U_K – проводимость канала длиной l_K . Уравнение можно переписать в виде

$$\frac{dp}{dl} + Ap - B = 0,$$

где

$$A = -S_0/C; \quad B = -Q_H/C.$$

С учетом граничных условий на входе ($p = p_H$ при $l = 0$) и на выходе насоса ($p = p_{\text{вып}}$ при $l = l_K$) получим следующее решение:

$$p(l) = \frac{B}{A} (1 - \exp(-Al)) + p_H \cdot \exp(-Al);$$

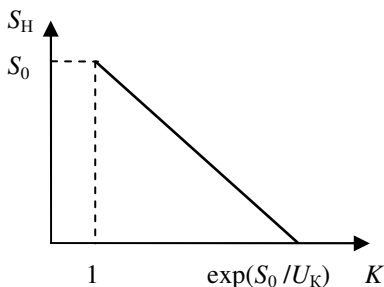
$$p_{\text{вып}} = \frac{Q_{\text{H}}}{S_0} (1 - \exp(S_0 / U_{\text{K}})) + p_{\text{H}} \cdot \exp(S_0 / U_{\text{K}}).$$

Учитывая, что $Q_{\text{H}} = p_{\text{H}} S_{\text{H}}$, запишем выражение для S_{H} :

$$S_{\text{H}} = S_0 \frac{p_{\text{вып}} / p_{\text{H}} - \exp(S_0 / U_{\text{K}})}{1 - \exp(S_0 / U_{\text{K}})}. \quad (2.8)$$

Из этого выражения следует, что быстрота действия насоса линейно зависит от коэффициента компрессии (рис. 2.31). При равенстве давлений $p_{\text{H}} = p_{\text{вып}}$ быстрота действия максимальна: $S_{\text{H}} = S_0$. При достижении предельного вакуума $S_{\text{H}} = 0$, $p_{\text{H}} = p_0$ и имеет место наибольший коэффициент компрессии

$$K_{\text{max}} = \frac{p_{\text{вып}}}{p_0} = \exp\left(\frac{S_0}{U_{\text{K}}}\right).$$



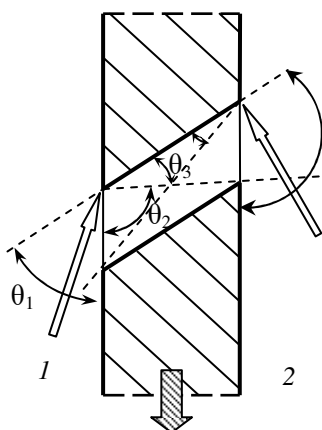
Р и с. 2.31. Зависимость
быстроты действия от
коэффициента компрессии

В связи с тем, что проводимость каналов U_{K} при молекулярном режиме течения газа пропорциональна $\sqrt{T/m}$, коэффициент компрессии возрастает с увеличением молекулярной массы и снижением температуры газа. То есть насос более эффективно откачивает тяжёлые газы. Предельный вакуум зависит, как и быстрота откачки, от числа оборотов ротора, проводимости каналов, а также степени предварительного разрежения на выходе насоса $p_{\text{вып}}$. Для таких насосов предварительный вакуум должен быть не хуже 100 Па.

В целом молекулярные механические насосы могут создавать предельное давление 10^{-5} Па при коэффициенте компрессии 10^5 – 10^6 . Данная схема откачки удобна для получения больших коэффициентов компрессии при малых значениях быстроты действия.

2.2.6. Турбомолекулярные насосы

В турбомолекулярном вакуумном насосе (ТМН) реализуется схема молекулярной откачки, в которой для удаления газов используется зависимость проводимости наклонного канала, движущегося перпендикулярно газовому потоку, от направления течения газа. Рассмотрим тонкую пластину с каналом, бомбардируемую с двух сторон по нормали к поверхности молекулами газа (рис. 2.32). Скорость движения пластины сопоставима с тепловой скоростью молекул газа.

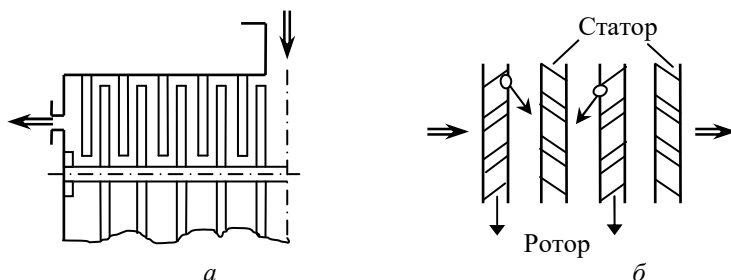


Р и с. 2.32. Схема откачки перемещающейся пластиной

Относительные скорости молекул составляют с направлением движения пластины довольно острый угол, и молекулы будут ударяться о ее кромки. В предположении косинусного закона распределения направлений выхода «отраженных» молекул, та их часть, которая отлетает в пределах угла θ_1 , будут возвращаться, θ_3 — пройдут на другую сторону пластины, θ_2 — могут оказаться по обе стороны. Вероятность того, что молекулы перейдут с одной стороны пластины на другую, зависит от соотношения этих углов. Оказывается, что вероятность переноса молекул из области 1 в область 2 намного выше вероятности обратного процесса, т.е. по такой схеме можно организовать направленный перенос молекул газа.

Этот механизм переноса был исследован с помощью метода Монте-Карло, позволяющего вычислить вероятности перехода молекул через канал в прямом (P_{12}) и обратном (P_{21}) направлениях. Оказалось, что зависящая от скорости перемещения и угла наклона канала вероятность P_{12} примерно в 10 раз больше P_{21} . Коэффициент компрессии в этом случае $K_{\max} = P_{12}/P_{21}$.

Современный вариант ТМН по своей конструкции напоминает многоступенчатый компрессор или паровую турбину (рис. 2.33, а). Статор и ротор снабжены лопастями, установленными под определенными углами. Откачка происходит вдоль оси. Каждая пара лопаток ротора и статора представляет одну ступень откачки. Поскольку молекула, отраженная лопаткой, приобретает тангенциальную составляющую скорости в направлении вращения ротора, соответствующий наклон лопаток статорного паза здесь также обеспечивает преимущественное направление прохождения молекул (рис. 2.33, б).



Р и с. 2.33. Схемы расположения лопаток в многоступенчатом турбомолекулярном насосе

Суммарный поток газа вдоль оси ротора зависит не только от рассмотренных выше вероятностей переноса молекул, но и от перепада давлений на лопатках. Конструкция, рассчитанная на максимальную быстроту откачки, обычно характеризуется низкой степенью сжатия и наоборот. В одном насосе может быть 30–40 ступеней откачки, причем часто несколько ступеней на входе конструируют из расчета достижения максимальной быстроты откачки, тогда как остальные, на выходе, для достижения высоких степеней сжатия (до $10^{7(9)}$ по воздуху).

Зазоры в насосе составляют величины порядка 1 мм, что при высоких скоростях вращения обеспечивает надежность их работы. Удельная быстрота откачки может составлять ~ 2 л/с на 1 см^2 площади входного отверстия. Быстрота откачки слабо зависит от рода газа. Предельное давление насосов 10^{-7} – 10^{-8} Па. С увеличением молекулярной массы газа коэффициент компрессии растёт за счет уменьшения перетечек газа через зазоры и увеличения отношения линейной скорости ротора к тепловой скорости молекул. Наибольшее $p_{\text{вып}}$ таких насосов для воздуха 1–10 Па.

Поскольку максимальная степень сжатия соответствует тяжелым молекулам, пары масла из подшипников турбины и из низковакуумной полости не попадают в систему. Однако при остановке насоса должны быть приняты соответствующие меры предосторожности.

Конструкции современных ТМН оптимизируются с точки зрения максимальной скорости вращения ротора и уменьшения миграции масла из подшипников. Ротор часто расположен вертикально, вместо подшипников используются газодинамические и магнитные подвески. Создаются комбинированные варианты насосов, соединяющие высокую быстроту откачки ТМН и большую степень сжатия молекулярного насоса.

2.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Действие физико-химических вакуумных насосов основано на связывании активных газов пленкой или слоем поглотителя (*геттера*); возможно также внедрение молекул или ионов газов в граничные поверхности. Таким образом, этот класс вакуумных насосов относится к насосам поверхностного действия или к *газоулавливающим вакуумным насосам*, в которых реализован второй способ откачки – поглощение газа насосом.

2.3.1. Сорбционная откачка

В основе работы большинства вакуумных насосов, альтернативных газоперекачивающим насосам, так или иначе лежат **сорбционные процессы**. Такие насосы называются *сорбционными*. Извест-