



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
ПРИБОРСТРОИТЕЛЬНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. академика С. И. ВАВИЛОВА

---

В. Я. ПЛИСКОВСКИЙ

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ  
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ**

---

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
1976

ОБЩЕСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ

Редакционно-методический совет:

**Н. И. Глотов, М. И. Меньшиков** (председатель), **В. Я. Плисковский,**  
**Л. Н. Розанов** (научный редактор), **Л. Г. Садиков** (отв. за выпуск),  
**Г. Л. Саксаганский** (зам. председателя), **М. Г. Шариков**

**Плисковский В. Я.** Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. М., «Машиностроение», 1976. 64 с.

В книге в сжатой и доступной форме излагаются особенности и специфические требования, предъявляемые к наиболее распространенным конструкционным материалам, используемым в вакуумной технике. Рассматриваются конструкции основных элементов вакуумных систем (уплотнения, вводы движения, электрические вводы, смотровые окна), нашедшие широкое применение в промышленности. Приводятся принципиальные схемы и конструкции коммутирующих элементов (вентили, затворы, натекатели). Книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников, связанных с конструированием и эксплуатацией вакуумных установок и аппаратуры.

Табл. 20, ил. 22, список лит. 36 назв.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие вакуумной техники, конструирование различного вакуумного оборудования и установок теснейшим образом связаны с созданием новых конструкций элементов вакуумных систем и с разработкой и применением весьма разнообразных материалов.

Правильный выбор материалов при рациональной конструкции вакуумной системы способствует улучшению качества вакуумного оборудования, увеличивает срок его эксплуатации, повышает надежность работы.

Следует подчеркнуть, что принципы, на основании которых в вакуумной технике подходят к выбору материалов, и способы их обработки существенно отличаются от принятых в других областях техники. Так, при выборе материала необходимо знать давление его насыщенных паров, способность к поглощению или выделению газа и другие важные характеристики.

Вакуумщикам, например, хорошо известно, что выделение газов с внутренних поверхностей вакуумной системы является одной из причин, ограничивающих получение предельно достижимого давления.

Несмотря на большое количество используемых в вакуумной технике материалов, основным конструкционным материалом является металл. Поэтому наука о металлах, или металловедение занимает важное место в вакуумной технике.

Большой вклад в развитие металловедения внесли русские и советские ученые. Еще гениальный М. В. Ломоносов (1711—1765 гг.) обратил особое внимание на металлургию и горное дело. Он был первый, кто дал определение понятия «металл»: «Металлы суть светлые тела, которые ковать можно».

Основоположниками современной науки о металлах были выдающиеся русские ученые П. П. Аносов (1797—1851 гг.) и Д. К. Чернов (1839—1921 гг.).

Благодаря работам академика Н. С. Курнакова (1860—1941 гг.), создавшего физико-химический анализ, был сделан значительный качественный сдвиг в дальнейшем развитии металловедения.

Велик вклад в науку о металлах и академика А. А. Байкова (1870—1946 гг.), одного из талантливейших учеников Д. И. Мен-

делева. Значительны также заслуги русского ученого А. М. Бочвара (1870—1947 гг.), который положил начало металлловедению цветных металлов.

Нельзя не отметить выдающегося советского ученого А. А. Бочвара, который провел сложнейшие исследования в области жаропрочности сплавов.

В настоящее время целая плеяда талантливых советских ученых успешно трудится над созданием новых конструкционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, отвечающими многим требованиям, которые предъявляет непрерывно развивающаяся вакуумная техника.

В разработке современных вакуумных систем и их элементов важную роль сыграл опубликованный в 1948 г. фундаментальный труд советского ученого Г. А. Тягунова «Основы расчета вакуумных систем».

Под руководством выдающегося советского ученого академика С. А. Векшинского было разработано и проведено большое количество теоретических и экспериментальных работ, позволивших создать самые совершенные средства откачки и измерения давления, конструкции коммутирующих устройств и других элементов вакуумных систем.

---

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## 1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Рассмотрим основные требования, которым должны удовлетворять материалы, используемые в вакуумной технике.

**Высокая вакуумная плотность при минимальной толщине материала.** Все материалы, применяемые в вакуумной технике (кроме особых случаев), должны обладать высокой вакуумной плотностью, т. е. минимальной проницаемостью газов и паров через стенки, ограничивающие вакуумный объем, при этом предполагается, что материал не имеет каких-либо щелей, микротрещин и других случайных дефектов.

Проницаемость материалов может быть определена по формуле [2]

$$P = P_0 e^{-H/jRT}, \quad (1)$$

где  $P_0$  — константа проницаемости;  $H$  — энергия активации проницаемости;  $j=1$  для систем «газ — неметалл»;  $j=2$  для систем «двухатомный газ — металл»;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $R=8,3146 \cdot 10^3$  Дж/(К·кмоль);  $T$  — абсолютная температура.

Проницаемость материалов сильно зависит от рода газа. Так, серебро наиболее проницаемо для кислорода, палладий и никель — для водорода, резина — для гелия, водорода и азота [30].

В практической работе следует считаться с проницаемостью стекла, кварца и керамических материалов для гелия, водорода и неона как газов, имеющих наименьшие диаметры частиц (молекул  $H_2$  и атомов He и Ne), а также с проницаемостью металлов главным образом для водорода, поскольку при растворении в металлах молекулы водорода диссоциируют на атомы, имеющие наименьший диаметр.

В качестве иллюстрации влияния проницаемости газов на сохранение вакуума в отпаянном объеме приведем такой пример. Если сделать колбу из плавленого кварца длиной 5 см, диаметром 2 см со стенками толщиной 1 мм, создать в ней давление по-

рядка  $1 \cdot 10^{-7}$  Па \*, отпаять ее, то через сутки давление в колбе вследствие проницаемости через стенки главным образом гелия возрастет до  $1 \cdot 10^{-4}$  Па.

**Низкое давление насыщенных паров материала при рабочей температуре.** Для того чтобы пары материала не ухудшали вакуум, их концентрация в вакуумном объеме должна быть мала по сравнению с концентрацией молекул оставшихся газов, т. е. давление насыщенных паров применяемых материалов должно быть значительно меньше давления остаточных газов.

Если давление пара материала при рабочей температуре окажется сопоставимым с рабочим давлением, то это приведет к интенсивному распылению материала и нежелательному загрязнению вакуумного объема. Так, если деталь изготовлена из латуни и во время работы подвергается нагреву до температуры 773 К в вакууме, то входящий в латунь цинк полностью испарится, что приведет не только к загрязнению системы парами цинка, но и к выходу из строя самой детали.

Давление насыщенного пара любого материала зависит от температуры. Зависимость давления химических элементов от температуры достаточно хорошо изучена и приводится в соответствующей литературе [28]. Тем не менее в повседневной практике полезно помнить следующее правило: при повышении температуры на 5% давление паров и скорость испарения вещества возрастает в 10 раз.

Для иллюстрации в табл. 1 приведено давление паров некоторых материалов при температурах 293 и 773 К.

Давление паров металлов и сплавов  $p_m$ , а также скорость испарения  $W$  можно определить по следующим формулам [15]:

$$p_m = \frac{1710}{\sqrt{M}} W \sqrt{T} \text{ Па}, \quad (2)$$

$$W = 0,585 \sqrt{M} \frac{p_m}{\sqrt{T}} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (3)$$

где  $T$  — абсолютная температура материала в К;  $M$  — молекулярная масса испаряющегося материала.

Заметим, что в большинстве случаев рабочая температура элементов вакуумных систем ограничивается не температурой плавления материалов, а давлением насыщенных паров, которое легко определить по измеренной скорости испарения в рабочей области температур по формулам (2) и (3).

**Наименьшее возможное газовыделение в вакууме и легкость обезгаживания.** Свойство материалов растворять в себе или связывать на своей поверхности газы оказывает существенное влияние на процессы получения высокого и особенно сверхвысокого

\* Все единицы в тексте даны в системе СИ (см. приложение 5).

Давление паров материалов в паскалях при различных температурах

Материал	Температура, К		Материал	Температура, К	
	293	773		293	773
Ртуть	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>6</sup>	Серебро	—	10 <sup>-7</sup>
Цинк	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>2</sup>	Олово и алюминий	—	10 <sup>-8</sup>
Индий	—	10 <sup>-6</sup>	Медь и золото	—	10 <sup>-9</sup>

вакуума, даже если эти материалы обладают достаточной вакуумной плотностью и низким давлением насыщенных паров.

Газовыделение зависит как от материала, его рабочей температуры, истинной поверхности, так и от предшествующей технологической обработки. Для уменьшения газовыделения обычно применяют высокотемпературный прогрев (450—700° С) с одновременной откачкой вакуумного объема ( $1 \cdot 10^{-4}$  Па) [2].

Скорости удельного газовыделения различных материалов при комнатной температуре приведены на рис. 1 и 2.

Кроме этих основных требований к материалам, используемым в вакуумной технике, может предъявляться и ряд других дополнительных требований по тепло- и электропроводности, величинам коэффициентов термического расширения, чистоте исходного материала и т. д. [12].

Учитывая большое разнообразие конструкционных материалов, используемых в вакуумной технике, и непрерывный прогресс в этой области, ограничимся рассмотрением лишь основных материалов.

## 2. МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

Металлы и их сплавы являются основными конструкционными материалами, из которых изготавливается большинство элементов и узлов современных вакуумных систем.

**Малоуглеродистые и углеродистые стали** (сталь ст. 3, сталь 10, сталь 45, сталь 40X и др.) широко используются для изготовления элементов и узлов вакуумных систем с давлением не ниже  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. Для исключения коррозии стальные детали, как правило, хромируют или никелируют. Эти материалы не рекомендуется применять при температурах ниже — 100° С.

**Нержавеющие стали** (сталь 2X13, 12X18H10T и др.) являются основным материалом, из которого изготавливаются высоковакуумные и сверхвысоковакуумные системы. Эти стали обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обезгаживаются

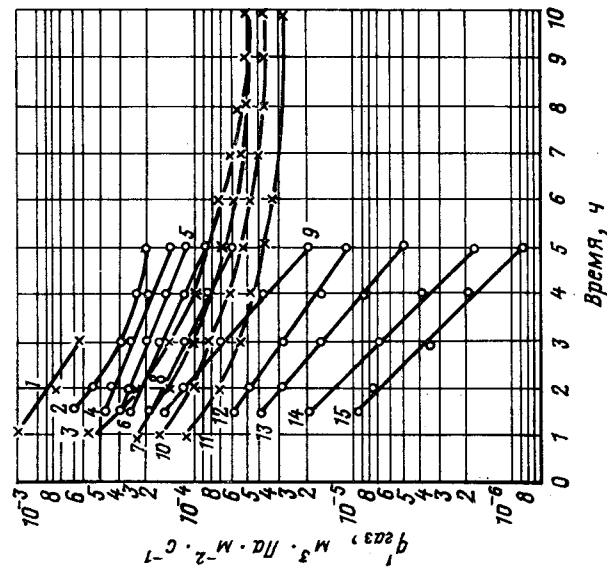


Рис. 1. Зависимость скорости удельного газового деления различных металлов от времени отточки при комнатной температуре:

1—алюминий; 2—дуралюмин необработанный; 3—малоуглеродистая сталь; 4—дуралюмин, промывтый бензолом и ацетоном; 5—латунь необработанная; 6—латунь, промывтая бензолом и ацетоном; 7—дуралюмин; 8—медь необработанная; 9—нержавеющая сталь необработанная; 10—латунь; 11—нержавеющая сталь; 12—медь, промывтая бензолом и ацетоном; 13—дуралюмин промывленный, промывтый бензолом и ацетоном; 14—латунь промывленная, промывтая бензолом и ацетоном; 15—медь промывтая, промывтая бензолом и ацетоном

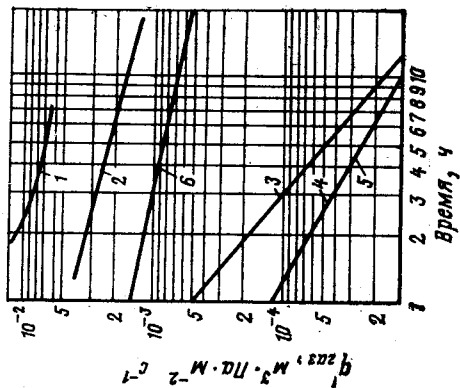


Рис. 2. Зависимость скорости удельного газового деления некоторых материалов от времени отточки при комнатной температуре: 1—нейлон; 2—органическое стекло; 3—фторопласт; 4—лиценн; 5—стеклянная керамика; 6—резина



прогревом, превосходно свариваются аргоно-дуговой и электронно-лучевой сварками, паяются мягкими и твердыми припоями и обычно применяются при температуре не выше  $900^{\circ}\text{C}$ .

**Медь** (М1, МВ) является основным материалом для изготовления корпусов многих типов электровакуумных приборов, уплотнительных элементов коммутирующей аппаратуры, теплообменников, тоководов и т. п. Медь обладает очень большой электротеплопроводностью и высокой вакуумной плотностью даже при весьма малых толщинах стенок. Температура плавления меди составляет  $\sim 1083^{\circ}\text{C}$ .

**Латунь** (Л63, ЛС59-1) в вакуумной технике имеет ограниченное применение из-за летучих примесей главным образом цинка, который при нагревании латуни легко испаряется, загрязняя вакуумную систему и постепенно превращая латунь в пористый материал.

**Алюминий** (АД1) и его сплавы часто используются для изготовления внутренних элементов пароструйных насосов, а также уплотнителей в разборных соединениях.

Для сварных соединений применяют алюминиевый сплав АМц или АМ-6, обладающий большей механической прочностью.

**Дуралюмин** (Д1 или Д16) не дает вакуумноплотных спаев и вакуумноплотно не сваривается. Однако иногда из дуралюмина изготовляют детали, входящие в алюминиевые узлы, так как коэффициенты линейного расширения дуралюмина и алюминия близки.

**Ковар** (сплав железа, никеля и кобальта), имеющий коэффициент термического расширения  $[(43-53) \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}]$ , весьма близкий к коэффициентам термического расширения некоторых сортов стекла, применяется главным образом для спая стекла с металлом [16].

**Вольфрам** ( $t_{\text{пл}} = 3400^{\circ}\text{C}$ ) из всех металлов имеет самую высокую температуру плавления и самое низкое давление паров и применяется при температурах до  $2500^{\circ}\text{C}$ . Поэтому из вольфрама чаще всего изготавливают нагревательные элементы. Недостатком вольфрама следует считать его хрупкость и трудность механической обработки.

**Молибден** ( $t_{\text{пл}} = 2620^{\circ}\text{C}$ ) менее хрупок, чем вольфрам, и, будучи также тугоплавким материалом, идет на изготовление нагревателей, тепловых экранов и для спая с некоторыми сортами стекла. Наибольшая рабочая температура достигает  $1700^{\circ}\text{C}$ .

**Никель** ( $t_{\text{пл}} = 1453^{\circ}\text{C}$ ) и некоторые его сплавы часто применяются для изготовления сложных паяных узлов и экранов. Никель механически хорошо обрабатывается, куется, штампуется, подвергается волочению и паяется не только со сталью и медью, но и с алюминием.

Наиболее важные характеристики основных металлов, применяемых в вакуумной технике, приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Проницаемость  $P$  металлов для некоторых газов

Металл	Газ	Температура, К	Абсолютная величина проницаемости $P$ , м <sup>3</sup> ·Па/(м <sup>2</sup> ·с)	$P_0$ , м <sup>3</sup> ·Па/(м <sup>2</sup> ·с)	$H$ , Дж/кмоль
Fe	H <sub>2</sub>	975	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^7$
	N <sub>2</sub>	1387	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^8$
	CO	1266	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^8$
Ni	H <sub>2</sub>	681	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^8$
Pd	H <sub>2</sub>	953	$6,09 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$8,88 \cdot 10^7$
Mo	H <sub>2</sub>	298	$1,23 \cdot 10^{-18}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^8$
	N <sub>2</sub>	298	$7,13 \cdot 10^{-36}$	$9,64 \cdot 10^{-3}$	$3,76 \cdot 10^8$
Cu	H <sub>2</sub>	298	$1,23 \cdot 10^{-16}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^8$
Ag	O <sub>2</sub>	298	$8,25 \cdot 10^{-20}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^8$
Pt	H <sub>2</sub>	298	$6,58 \cdot 10^{-17}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^7$
Al	H <sub>2</sub>	298	$9,61 \cdot 10^{-34}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	$3,59 \cdot 10^8$

Примечание. Расчет абсолютных значений проницаемости  $P$  для разных температур производится по формуле (1), с использованием констант  $P_0$  и  $H$ , причем давление должно быть выражено в паскалях, а толщина материала в метрах.

### 3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К этой группе материалов относятся главным образом стекло, керамика, резина и некоторые синтетические материалы.

**Стекло.** Стекло обладает многими положительными свойствами, которые сделали его одним из самых распространенных материалов. Важнейшими свойствами стекла, выгодно отличающими его от других материалов, являются: прозрачность, хорошие электроизолирующие свойства, легкость обезживания, способность принимать и сохранять любую сложную форму, простота вакуумноплотного соединения друг с другом и с металлом; стекло в обычных условиях практически непроницаемо для большинства газов (кроме гелия). По величине коэффициента термического расширения (КТР) стекла различных составов образуют две группы.

*Легкоплавкие стекла* (С90-1, С88-1) имеют КТР  $(60-100) \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup> и относительно низкую температуру размягчения 500—580° С.

Легкоплавкие стекла применяются главным образом для изготовления неотчетственных элементов (стеклянных ловушек, колб, плоских ножек и т. п.) и спаиваются с металлами на основе железа. Поскольку в большинстве сортов этих стекол содер-

жится свинец, для предотвращения восстановления свинца железом производят меднение поверхности металла в месте спая.

**Тугоплавкие стекла** (С39-1), С40-1 и др.) имеют КТР  $(34-55) \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup> и температуру размягчения 550—800° С. Эти стекла обладают высокими диэлектрическими свойствами и термостойкостью. Механическая прочность их выше, чем у легкоплавких стекол. Поэтому тугоплавкие стекла применяют для изготовления электрических тоководов, иллюминаторов высоковакуумных систем, ножек электровакуумных приборов и т. п.

По спаиваемости с металлами тугоплавкие стекла делятся на молибденовые (С47-46; С48-1, С49-3) и вольфрамовые (С39-1, С40-1 и др.).

Молибденовые стекла хорошо спаиваются с молибденом и коваром. Вольфрамовые стекла отличаются более высокой химической стойкостью и применяются для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких температурах.

**Кварцевое стекло** отличается от обеих групп стекла тугоплавкостью (температура начала размягчения 1250° С) и малым коэффициентом термического расширения. Кварцевое стекло нашло применение для изготовления элементов, нагреваемых во время работы до относительно высоких температур.

Существенным недостатком кварцевого стекла является заметная проницаемость гелия даже при комнатной температуре, причем с ростом температуры проницаемость гелия интенсивно увеличивается.

**Керамика.** В сверхвысоковакуумных системах и мощных высоковольтных вакуумных приборах в качестве изоляторов применяют керамику.

Керамические изоляторы механически прочны, обладают высоким электрическим сопротивлением, большой теплостойкостью и способны образовывать вакуумноплотные соединения с некоторыми металлами и сплавами.

Для изготовления металлокерамических изоляторов чаще всего используют алюминооксидную (22ХС, М7), стеатитовую (К-1, ЛК-1) или форстеритовую (ЛФ-11, КВФ-4) керамику.

**Вакуумная резина.** Вакуумные резины нашли широкое применение главным образом в качестве уплотнителей в разъемных соединениях и вакуумных вводах движения.

Уплотнители для вакуумных систем изготавливаются из резин марок 7889, 9024, 1015, 14Р-23 и др. Одной из важнейших характеристик вакуумных резин является их *проницаемость*, которая для различных сортов резины не одинакова. Так, например, наименьшей проницаемостью при комнатной температуре для азота, кислорода, водорода и гелия обладают резины марок 9024 и 1015. Наибольшей проницаемостью из газов обладает водород, затем в порядке уменьшения следует гелий, кислород и азот. Кроме того, резины проницаемы для паров многих раство-

рителей (бензол, бензин, этиловый эфир, толуол и др.), а также для сложных газов (аммиак, этан, хлористый водород).

При прогреве в вакууме из резины выделяются газообразные, жидкие и твердые продукты, причем скорость выделения этих продуктов увеличивается с возрастанием температуры.

Наиболее важные вакуумно-технические характеристики резин приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вакуумно-технические характеристики резин

Показатель	Марка резины				
	7880	9024	ИРП-1015	ИРП-1368	ИРП-2043
Температура испытания, °С	90	90	90	250	200
Удельная скорость газовыделения, м <sup>3</sup> ·Па/(м <sup>2</sup> ·с)	5,3·10 <sup>-5</sup>	2,7·10 <sup>-5</sup>	2,4·10 <sup>-4</sup>	4,4·10 <sup>-4</sup>	2,7·10 <sup>-4</sup>
Потеря массы за 50—60 ч, %	2,3	3,4	6,2	4,0	0,4
Характеристика продуктов выделения (твердые, жидкие, газообразные)	ТВ, Ж, Г	ТВ, Ж, Г	ТВ, Г	Ж, Г	Г
Минимальная рабочая температура в вакууме, °С	-30	-35	-25	-50	-30
Максимальная рабочая температура, в вакууме, °С	+70	+80	+80	+250	+200

**Пластмассы.** *Фторопласт-4* обладает широким рабочим температурным диапазоном (от -195 до +250°С) и малым собственным газовыделением (в 10 и более раз меньше, чем у лучших сортов вакуумной резины). Фторопласт не горюч, не растворяется ни в одном из растворителей, практически не гигроскопичен, не смачивается водой и другими жидкостями. По стойкости к химически активным веществам он превосходит золото и платину. Однако фторопласт-4 имеет малую упругость и большую остаточную деформацию и текучесть, которые возрастают с увеличением температуры. Кроме того, при температуре выше 200°С из фторопласта начинает выделяться фтор, являющийся токсическим веществом.

Из-за высоких диэлектрических свойств, не зависящих от частоты приложенного напряжения и мало зависящих от температуры, фторопласт чаще всего используют для изготовления вакуумноплотных электрических вводов.

*Полиэтилен* имеет почти такое же малое газовыделение, что и фторопласт, но интервал его рабочих температур составляет всего от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Поэтому полиэтилен применяют в качестве уплотнительного элемента в конструкциях, не подвергающихся нагреванию или чрезмерному охлаждению. Полиэтилен недостаточно маслостоек и светостоек, но дешев и удобен для изготовления всевозможных вспомогательных изделий (упаковочные чехлы, изоляционные пленки и т. п.).

*Полиамиды* (П-68, П-6) имеют также малое газовыделение и используются для изготовления небольших, непрогреваемых деталей вакуумных систем.

*Органическое стекло* хорошо обрабатывается резанием, склеивается и сваривается. В непрогреваемых вакуумных системах из органического стекла часто изготавливают изоляционные элементы, наружные защитные экраны.

*Текстолит* служит материалом для внешних изолирующих деталей, панелей, изолирующих прокладок и тому подобных деталей, не соприкасающихся непосредственно с вакуумной полостью.

Наиболее важные характеристики основных неметаллических материалов, применяемых в вакуумной технике, даны в табл. 4 и на рис. 2.

Таблица 4

Проницаемость неметаллов для некоторых газов

Материал	Газ	Температура, К	Абсолютная величина проницаемости $P$ , $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$P_0$ , $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$H$ Дж/кмоль
Стекло	He	293	$4,88 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^7$
Керамика	Воздух	1673	$3,66 \cdot 10^{-12}$	—	—
Кварц	$\text{N}_2$	973	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,19 \cdot 10^{-9}$	$3,65 \cdot 10^7$
	$\text{N}_2$	1416	$3,66 \cdot 10^{-12}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$9,24 \cdot 10^7$
	He	1273	$3,45 \cdot 10^{-11}$	$3,72 \cdot 10^{-9}$	$2,27 \cdot 10^7$
Резина 7889	$\text{N}_2$	298	$7,6 \cdot 10^{-12}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^7$
Фторопласт 4	$\text{N}_2$	293	$8,35 \cdot 10^{-15}$	—	—
	$\text{O}_2$	293	$1,9 \cdot 10^{-14}$	—	—

Примечание. Расчет абсолютных значений проницаемости  $P$  для иных температур производится по формуле (1) с использованием констант  $P_0$  и  $H$ , причем давление  $p$  должно быть выражено в паскалях, а толщина материала в метрах.

## ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

### 1. РАЗБОРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

При выборе конструкции разборного соединения для работы в конкретной вакуумной системе необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) допустимую величину натекания в вакуумный объем между поверхностями уплотнителя и элементом соединения, а также газопроницаемость материала уплотнителя;
- 2) газовыделение с поверхностей уплотнителя и элементов соединения, соприкасающихся с вакуумным объемом;
- 3) механическую прочность соединения;
- 4) термическую устойчивость, т. е. способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения без нарушения герметичности;
- 5) химическую стойкость;
- 6) легкость монтажа и демонтажа соединения и степень сложности его изготовления;
- 7) простоту проверки герметичности.

В разборных вакуумных соединениях в зависимости от предъявляемых требований к разряжению в вакуумной системе могут быть использованы как неметаллические, так и металлические уплотнители.

#### а) Разъемные соединения с неметаллическими уплотнителями

Эти соединения просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, не требуют больших усилий для уплотнения, но имеют ограниченную термическую устойчивость и, как правило, высокую упругость паров уплотнителя, вследствие чего они широко применяются лишь при давлениях не ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.

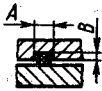


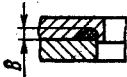


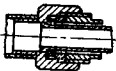

Разборные соединения должны конструироваться таким образом, чтобы резиновый уплотнитель не воспринимал механические нагрузки и не влиял на точность установки деталей.

Следует также учитывать несжимаемость резины, т. е. сохранение постоянного объема резины при ее деформации. Резины обладают некоторой текучестью, в результате которой при длительном сжатии они получают остаточную деформацию, причем величины этой деформации возрастают с повышением температуры [11].

Наиболее распространенные схемы соединений с резиновыми уплотнителями приведены в табл. 5.

Фланцы разъемного соединения рекомендуется затягивать до соприкосновения металлических поверхностей. В этом случае необходимо предусматривать каналы для проверки герметичности соединения с помощью течеискателя.

## Принципиальные схемы соединений с резиновыми уплотнениями

Схема уплотнения		Примечание
Разобранное	Собранное закрепленное	
		Уплотнитель из резины. Уплотнение осуществляется при смыкании фланцев металл на металл. Употребляется в системах среднего вакуума. Для уплотнителя квадратного сечения со стороной $C$ : $B/C=0,75$ ; $A/C=1,4$
		
		Уплотнитель из резины. Уплотнение осуществляется при смыкании фланцев металл на металл. Употребляется в системах среднего вакуума
		

Уплотнитель из резины. Употребляется для присоединения к вакуумным системам манометрических датчиков и для соединения трубопроводов диаметром до 18 мм (нормаль НПО.005.042).

Так как резиновый уплотнитель несжимаем, должно быть предусмотрено место для растекания резины при деформации. Объем канавки выполняется равным объему резины или несколько большим (на 2—5%).

В большинстве случаев удельное давление, необходимое для уплотнения, создается сжатием резинового уплотнителя на 20—40% первоначальной толщины. В вакуумных разъемных соединениях, подвергающихся частым разуплотнениям (двери, затворы, крышки и т. п.), предусматриваются канавки с фасонным профилем для удержания уплотнителя.

Уплотнительные кольца вырезаются из резиновых пластин или склеиваются из шнура прямоугольного или круглого сечения, однако наилучшие результаты получаются при непосредственном формовании резиновой смеси и последующей вулканизации в пресс-формах.

В качестве уплотнителя довольно часто применяется фторопласт-4. Из-за малой упругости, большой остаточной деформации и текучести, которые возрастают с увеличением температуры, необходимо, чтобы в разъемных соединениях с использованием уплотнителя из фторопласта-4 зазоры в стыках не превышали 0,1 мм, чтобы предотвратить его вытекание. Уплотнители из фторопласта-4 могут вырезаться из пластин или склеиваться (свариваться) из отдельных полос.

## б) Разъемные соединения с металлическими уплотнителями

Разъемные соединения с металлическими уплотнителями предназначены для применения в системах с давлением ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Эти разъемные соединения должны выдержать во время обезгаживания длительные и многократные прогревы до температуры 300—700° С.

В конструкциях прогреваемых разъемных соединений уплотнение достигается путем использования пластических деформаций уплотняющей металлической прокладки. При пластической деформации материал заполняет все имеющиеся на поверхности уплотняющих фланцев микронеровности. Вследствие того, что текучесть металлов по сравнению с резинами невысока, необходимо уплотняющие поверхности фланцев изготавливать с малой шероховатостью. Для уплотнения соединения с металлической прокладкой требуются значительно большие удельные давления, чем в случае уплотнения с резиновой или фторопластовой прокладкой.

Металлические уплотнительные прокладки практически исключают проникновение газов через материал уплотнителя, а газовыделение их примерно в  $10^3$  раза меньше, чем у лучших сортов вакуумных резин [19].

Схемы наиболее распространенных соединений с металлическими уплотнителями приведены в табл. 6.

В соединении по схеме 1 табл. 6 с канавочно-клиновым профилем в качестве уплотнителя применяется алюминиевое или медное плоское кольцо.

Удельное давление на 1 мм среднего диаметра профиля составляет 400 Н для медной прокладки и 200 Н для алюминиевой.

Соединение с канавочно-клиновым профилем широко применяется для трубопроводов с диаметром отверстия до 630 мм. Углы профиля канавки и клина делаются соответственно 60° и 90°, с тем чтобы уплотнение металлической прокладки происходило между кромкой канавки и конической поверхностью клина, благодаря чему значительно уменьшается площадь прокладки, подвергающаяся деформации, а следовательно, и усилие, необходимое для надежного уплотнения. Поверхности профилей канавочно-клинового соединения должны иметь шероховатость 0,5, что соответствует 8-му классу.



Схема уплотнения

Разобранное

Собранное закрепленное

Примечание

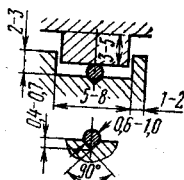
1



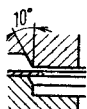
2



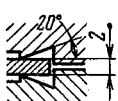
3



4



5



Уплотнитель — медное или алюминиевое плоское кольцо. Уплотнение может подвергаться многократному нагреву до 300°С (алюминиевая прокладка) или 450°С (медная прокладка). Усилие герметизации: медь — 330—400 Н/мм\*; алюминий — 150—200 Н/мм (нормаль НПО.005.042)

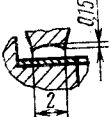
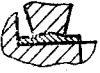
Уплотнитель — медное плоское кольцо. Уплотнение может подвергаться многократному нагреву до 450°С. Требуется большее усилие уплотнения, чем в первом случае. Усилие герметизации 380—660 Н/мм.

Уплотнитель — свинцовое кольцо Ø 4—6 мм или индиевое кольцо Ø 0,6—1,0 мм. Уплотнение может подвергаться нагреву до 100°С. Усилие герметизации: свинец — 5—6 Н/мм; индий — 6—7 Н/мм.

Уплотнение может подвергаться многократному нагреву до 700°С и охлаждению до температуры жидкого азота. Усилие герметизации — 500—600 Н/мм.

Уплотнитель — медное плоское кольцо. Уплотнение может подвергаться многократному нагреву до 500°С и охлаждению до температуры жидкого азота. Усилие герметизации — 350—450 Н/мм.

\* Усилие герметизации в Н/мм дано на 1 мм погонной длины уплотнителя.

Схема уплотнения		Примечание	
Разобранное	Собранное закрепленное		
6			<p>Уплотнитель — медное или никелевое плоское кольцо. Уплотнитель может использоваться несколько раз. Уплотнение допускает многократный нагрев до 450° С.</p> <p>Усилие герметизации — 300—350 Н/мм.</p>

Уплотнительные прокладки, изготовленные из алюминия, допускают прогрев до 300° С, так как при прогреве до более высокой температуры наблюдается диффузионная сварка прокладки с уплотняющими поверхностями. Толщина алюминиевой прокладки должна быть не более 0,3 мм из-за большого коэффициента термического расширения алюминия. Уплотнительные прокладки, изготовленные из меди марки М1, допускают прогрев до 450—600° С.

Для повышения надежности уплотнения и уменьшения уплотняющего усилия медные прокладки подвергаются вакуумному или водородному отжигу при 800° С в течение 5 мин. Иногда отжиг прокладки производят в восстановительном пламени газовой горелки с охлаждением в воде или на воздухе с последующими травлением и промывкой.

Существенными недостатками уплотнений с канавочно-клиновым профилем являются жесткие допуски на размеры посадочных мест и уплотняющего профиля, сложность контроля геометрии профиля, а также наличие в пространстве между выступом и дном канавки замкнутого пространства, которое при определенных условиях может стать источником газовой выделению в вакуумный объем.

Соединение по схеме 2 табл. 6 с плоским профилем зуба и медной прокладкой употребляется для диаметров до 200 мм. Соединение с плоским профилем зуба значительно проще в изготовлении, чем соединение с канавочно-клиновым профилем, но требует больших усилий для уплотнения; медная уплотнительная прокладка в этом случае подвергается более интенсивной коррозии при обезгаживании соединения, так как поверхность, открытая на атмосферу, в этом случае значительно больше, чем в соединении по схеме 1 табл. 6.

Соединение по схеме 3 табл. 6 со свинцовым или индиевым кольцом в качестве уплотнителя требует для стягивания значи-

тельно меньших усилий, чем в случае медных и алюминиевых уплотнителей, но допускает прогрев всего лишь до  $100^{\circ}\text{C}$  [1].

Индиевые уплотнители изготавливаются из проволоки диаметром от 0,6 до 1 мм. Индий достаточно надежно уплотняет не только металлические детали, но и такие материалы, как стекло и керамика.

Усилие, необходимое для создания индиевого вакуумноплотного соединения, составляет 6—7 Н на погонный миллиметр при ширине уплотняющей поверхности 1 мм.

В конструкции соединения, выполненной по схеме 3 табл. 6, индиевая проволока раздавливается и заполняет канавку и зазор между стыкуемыми поверхностями. Шероховатость стыкуемых поверхностей, зуба и канавки должна соответствовать 6-му классу. Толщина индия между стыкуемыми поверхностями после уплотнения составляет 0,015—0,02 мм.

Уплотнение между двумя коническими поверхностями (схема 4 табл. 6) создается вследствие пластического течения материала из-за больших сил трения. В качестве уплотнения чаще всего применяется плоское медное кольцо толщиной 0,12—0,25 мм или проволока диаметром 1,6 мм. Плоское кольцо при затяжке соединения деформируется и приобретает коническую форму. При дальнейшей затяжке силы трения, возникающие на поверхности прокладки и фланцев, разрушают окисную пленку и другие поверхностные загрязнения, создавая тем самым условия для местной сварки чистых металлических поверхностей. Экспериментально установлено, что оптимальный угол конуса должен быть равен  $20^{\circ}$ . Усилие герметизации уплотнения при использовании медной проволоки составляет всего 90 Н на 1 мм погонной длины. Уплотнения такого типа нашли применение при соединении трубопроводов с диаметром отверстия до 200 мм, эксплуатируемых в интервале от температуры жидкого азота до  $+700^{\circ}\text{C}$ . При использовании соединений в интервалах температур 500— $700^{\circ}\text{C}$  и от температуры жидкого азота до  $-80^{\circ}\text{C}$  применяют уплотнительные прокладки, изготовленные из никеля, нержавеющей стали или мягкого железа. Соединение допускает многократное использование уплотнительных прокладок. Герметичность соединения сохраняется лишь при одинаковых температурах на стягивающих фланцах. Для облегчения разборки соединения должны быть предусмотрены резьбовые отверстия.

Фланцевое уплотнение, выполненное по схеме 5 табл. 6, нашло широкое применение в зарубежной практике. Конструкция уплотнения допускает многократное охлаждение и прогрев от температуры жидкого азота до  $+500^{\circ}\text{C}$  и не дает заметного натекания при давлениях ниже  $10^{-10}$  Па. При внедрении конических кромок в плоское медное кольцо происходит холодное течение материала прокладки к внутренним цилиндрическим поверхностям фланцев. Так как дальнейшее течение материала

прокладки из зоны уплотнения жестко ограничено, создаются высокие давления между уплотняющими поверхностями, вследствие чего происходит заполнение всех микронеровностей и надежное уплотнение соединения. Толщина медной уплотняющей прокладки обычно около 2 мм. Преимуществом данного типа уплотнения является то, что конические уплотняющие поверхности находятся в углублении, благодаря чему снижается вероятность их повреждения. Для обеспечения уплотнения достаточно сравнительно небольшой деформации медной прокладки, при этом усилие герметизации составляет 350—450 Н на 1 мм погонной длины. Оба фланца имеют одинаковую геометрию, что снижает их стоимость и обеспечивает взаимозаменяемость [20].

В конструкции, выполненной по схеме 6 табл. 6, для расширения технологических допусков на изготовление фланца применено так называемое «серповидное» уплотнение [1, 10]. Эта конструкция требует несколько меньшего усилия для уплотнения, чем фланцевое соединение, выполненное по схеме 1 табл. 6, а также позволяет уменьшить массу и размеры фланцев.

Серповидное уплотнение разработано для соединения с диаметрами условного прохода от 10 до 225 мм. Уплотнители изготавливаются из меди или никеля толщиной 0,3—0,5 мм. Выгодным отличием серповидных уплотнителей от других устройств, использующих медный уплотнитель, является то, что в них прокладки могут быть использованы многократно, для чего прокладки каждый раз переворачивают на другую сторону.

В заключение следует указать, что все металлические уплотнения надежно работают лишь при близких значениях величины коэффициентов термического расширения всех элементов соединения, мало отличающихся температурах стягивающих фланцев и отсутствии их коробления.

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ СОЕДИНЕНИИ ВАКУУМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

При проектировании вакуумных установок следует уделять особое внимание трубопроводам и элементам их соединений.

Геометрические размеры трубопроводов должны быть выбраны таким образом, чтобы по возможности эффективнее использовались применяемые средства откачки [30].

Трубопроводы должны обладать необходимой механической прочностью, химической стойкостью и малым газовыделением с внутренних поверхностей. В отдельных случаях трубопроводы должны допускать многократный нагрев с целью их обезгаживания.

Коммутирующие трубопроводы иногда изготавливаются из стекла, но чаще всего из металлических бесшовных цельнотянутых труб. Трубопроводы могут также изготавливаться из кварцевых, керамических, резиновых и синтетических материалов.

Тонкостенные синтетические трубопроводы для обеспечения механической прочности армируются металлической проволокой. Соединение отдельных частей трубопроводов производится сваркой, пайкой или с помощью шлифов и фланцев. Уплотнение фланцевых соединений обычно осуществляется по одной из схем, приведенных в табл. 5 и 6 [23].

Часто при соединении длинных трубопроводов и подключении средств откачки элемент соединения служит также гибким звеном, исключая передачу вибраций на вакуумную уста-

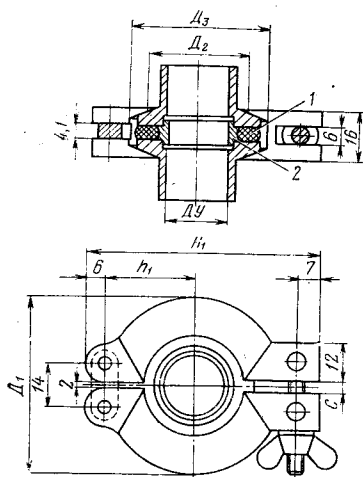


Рис. 3. Быстроразборное вакуумное соединение трубопроводов:

1—резиновое кольцо; 2—центрирующее кольцо

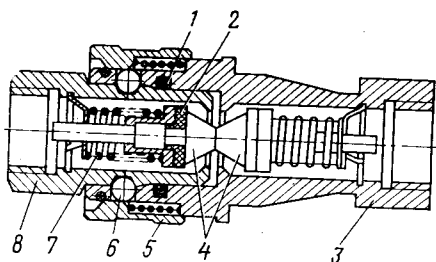


Рис. 4. Быстроразборное вакуумное соединение с клапанами

новку и компенсирующим неточность сборки и монтажа оборудования.

В зарубежной практике для соединения трубопроводов с внутренним диаметром до 32 мм широкое применение нашло быстроразборное вакуумноплотное соединение, конструкция которого изображена на рис. 3.

Быстроразборное соединение, конструкция которого показана на рис. 4, применяется, когда необходимо избежать попадания воздуха в разъединяемые трубопроводы. Два штуцера 3 и 8, герметично соединенные с соответствующими концами трубопроводов, уплотняются друг с другом с помощью резинового кольца круглого сечения 1 и удерживаются в соединенном состоянии шестью шариками 6. Для разъединения штуцера необходимо кольцо 5 оттянуть вправо, после чего шарики 6 получают возможность выйти из кольцевой канавки штуцера 8. В момент разъединения штуцеров клапаны 4, имеющие резиновые уплотнители 2, под действием пружин 7 надежно перекрывают отверстия в штуцерах 3 и 8 и концы трубопроводов оказываются уплотненными. Размеры соединения выбраны таким образом,

чтобы уплотнитель 1 сходил с цилиндрической части штуцера 8 лишь после того, как клапаны 4 перекроют отверстия трубопроводов.

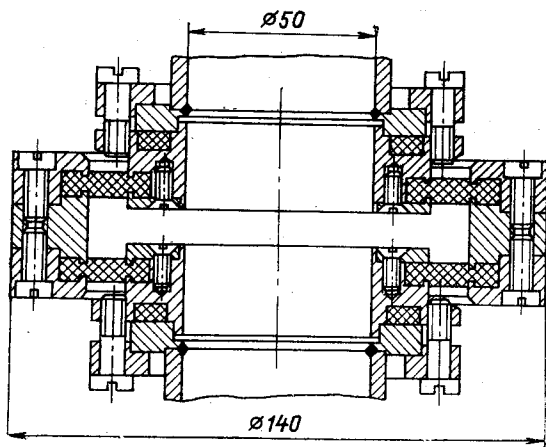


Рис. 5. Гибкое звено с резиновыми мембранами

Фланцевое соединение трубопроводов, исключаящее передачу вибраций и компенсирующее неточность сборки и монтажа, показано на рис. 5. Две резиновые мембраны играют роль компенсирующего звена и являются уплотнительными элементами соединения.

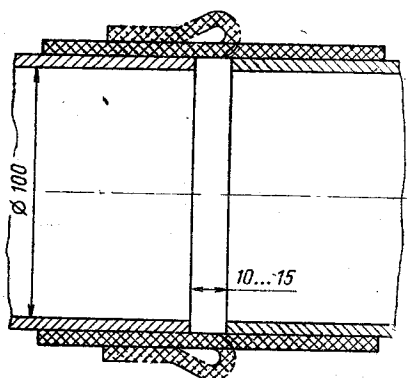


Рис. 6. Гибкое звено с резиновыми манжетами

Достаточно просто осуществляется гибкое соединение длинных металлических трубопроводов с помощью резиновой манжеты, как это показано на рис. 6. Манжета может изготавливаться из плоской резины и соединяться в кольцо методом горячей вулканизации с последующей шлифовкой. Внутренний диаметр манжеты обычно делается на 10—15 мм меньше наружного диаметра трубопровода.

Надежное уплотнение соединения достигается при посадке манжеты на концы трубопроводов с помощью клея 88-Н (МРТУ 38-5-880-66).

Прогреваемые высоковакуумные трубопроводы соединяются гибким звеном (рис. 7), состоящим из металлического сальфона

1, приваренного к двум фланцам 2. Уплотнение гибкого звена в этом случае производится с помощью медного или алюминиевого уплотнителя 3.

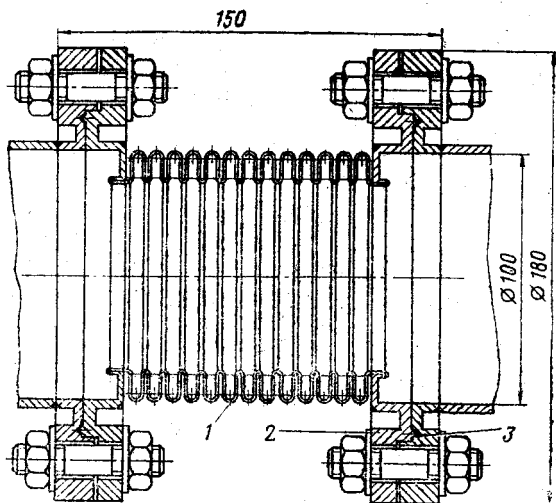


Рис. 7. Прогреваемое гибкое звено

Для трубопровода с большим наружным диаметром уплотняющие фланцы получаются достаточно громоздкими. На рис. 8 показано соединение с металлическим уплотнителем, в котором с целью уменьшения габаритов уплотнительных

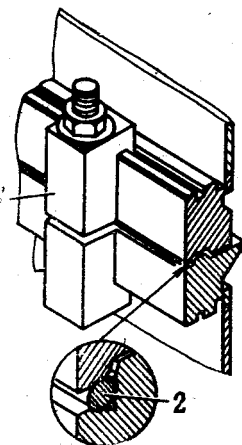


Рис. 8. Уплотнение фланцев с помощью струцин

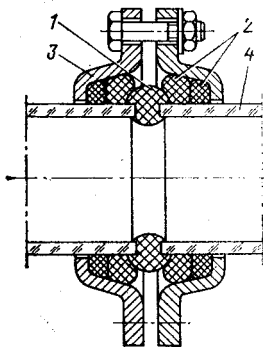


Рис. 9. Соединение толстостенных стеклянных труб

фланцев применены струбцины 1. Уплотнителем может быть медная круглая проволока 2 либо кольцо круглого сечения из синтетического материала. Фланцевые соединения такой конструкции применяются для трубопроводов с наружным диаметром от 260 до 630 мм.

В многопроводной форвакуумной системе, собранной из толстостенных стеклянных труб, применено фланцевое болтовое соединение, показанное на рис. 9. Резиновая Т-образная прокладка 1 сжата двумя резиновыми кольцами 2, плотно натянутыми на стеклянные трубы 4 и стянутыми литыми фланцами 3.

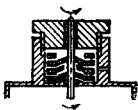
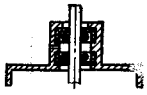
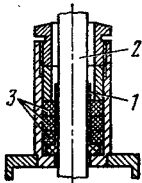
Трубы 4 и фасонные части к ним (переходники, тройники, и т. п.) изготавливаются, как правило, из термостойкого стекла.

### 3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ В ВАКУУМНЫЙ ОБЪЕМ (ВВОДЫ ДВИЖЕНИЯ)

Возможность использования того или иного ввода движения в значительной степени определяется конструкцией уплотнения элемента, передающего движение в вакуумный объем. Конструкция уплотнения определяет рабочую температуру, скорость перемещения, срок службы и другие эксплуатационные параметры ввода.

Таблица 7

Вводы движения с контактными уплотнительными элементами

Наименование ввода движения	Схема конструкции	Примечание
1. С уплотнением в виде прокладок		<p>1. Наибольшая допустимая температура определяется материалом уплотнителя</p> <p>2. Натекание не более <math>5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}</math></p> <p>3. Скорость перемещения — 0,5 м/с; перемещение незначительное</p>
2. С резиновыми армированными манжетами		<p>1. Наибольшая допустимая температура определяется материалом уплотнителя</p> <p>2. Натекание не более <math>1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}</math></p> <p>3. Скорость перемещения 10 м/с</p>
3. С самосмазывающим уплотнителем		<p>1. Наибольшая допустимая температура определяется материалом уплотнителя</p> <p>2. Натекание не более <math>1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}</math></p> <p>3. Скорость перемещения 10 м/с</p> <p>4. Частота вращения 1500—3000 об/мин</p>



В зависимости от конструкции уплотнения вводы движения можно классифицировать следующим образом [21, 22]:

- 1) с контактными уплотнительными элементами;
- 2) с деформируемыми уплотнительными элементами;
- 3) с передачей движения через неподвижную перегородку.

В табл. 7 приведены основные схемы конструкций вводов движения с контактными уплотнительными элементами.

Уплотнительные элементы в конструкциях по схемам 1 и 2 табл. 7 изготавливаются из маслостойкой вакуумной резины. Надежная работа устройства может быть обеспечена лишь при полированной поверхности вала и тщательном изготовлении резиновых колец. Особое внимание следует обращать на качество изготовления внутренних кромок резиновых колец. Между резиновыми кольцами заливается вакуумное масло. Устройства требуют частой проверки и поэтому должны быть расположены в удобных для обслуживания местах.

Ввод движения, выполненный по схеме 3 табл. 7, с самосмазывающим уплотнителем (фторопластом) не требует смазки, что выгодно отличает его от вводов по схемам 1 и 2 табл. 7. Фторопласт-4 менее упруг, чем резина, и имеет значительную остаточную деформацию, поэтому для компенсации износа и обеспечения плотного контакта уплотняющей фторопластовой втулки 1 (см. схему 3 табл. 7) с подвижным полированным валом 2 используются упругие свойства резиновых колец 3, предварительно деформированных с помощью гайки и втулки.

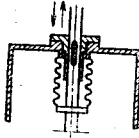
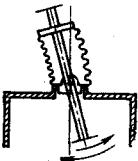
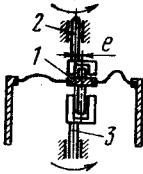
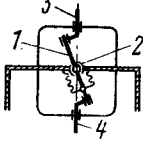
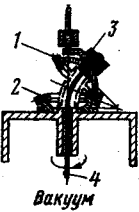
Схемы конструкций вводов движения с деформируемыми уплотнительными элементами приведены в табл. 8.

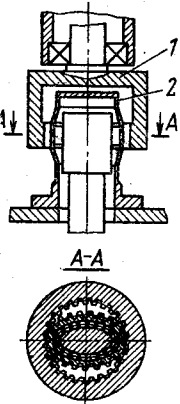
Вводы движения с применением металлических сильфонов или резиновых диафрагм, выполненные по схеме 1 табл. 8, надежнее устройств, приведенных в табл. 7, проще в эксплуатации, но могут обеспечить передачу сравнительно небольших поступательных перемещений. Так, в случае применения металлического сильфона для получения достаточной долговечности устройства рекомендуется использовать не более 50% максимального линейного хода сильфона [7, 13].

Угол качательного движения устройства, выполненного по схеме 2 табл. 8 также из-за соображений надежности ограничен допустимой величиной деформации уплотнительного элемента — металлического сильфона или резиновой мембраны.

Для передачи вращения в вакуумный объем часто применяется сравнительно простое по конструкции и технологии изготовления устройство, выполненное по схеме 3 табл. 8. В этом устройстве промежуточное звено 1 совершает плоскопараллельное движение по цилиндрической поверхности радиуса  $e$  с центром на общей оси ведущего и ведомого валов 2 и 3. Крутящий момент от сил трения в опорах промежуточного звена 1, смонтированного на ведущем и ведомом валах, воспринимается гибким уплотнительным элементом (металлическим сильфоном или резиновой

## Вводы движения с деформируемыми уплотнительными элементами

Наименование ввода движения	Схема конструкции	Примечание
1. Ввод поступательного движения		<p>1. Уплотнительный элемент — металлический сальфон или резиновая мембрана</p> <p>2. Допускается нагрев:</p> <p>а) до 150—700° С в зависимости от материала сальфона; перемещение 0,7 м и более</p> <p>б) до 70—150° С в зависимости от материала резиновой мембраны перемещение — 10% от диаметра мембраны</p>
2. Ввод качательного движения		То же
3. Ввод вращения с промежуточным звеном, совершающим плоскопараллельное движение		Частота вращения до 100 об/мин
4. Ввод вращения с пространственным шарниром		То же
5. Ввод вращения с разгрузкой гибкого элемента с помощью планетарной зубчатой передачи	 <p>Вакуум</p>	<p>1. Уплотнительный элемент — металлический сальфон или резиновая мембрана</p> <p>2. Допускает нагрев:</p> <p>а) до 150—700° С в зависимости от материала сальфона;</p> <p>б) до 70—150° С в зависимости от материала резиновой мембраны; частота вращения до 500 об/мин</p>

Наименование ввода движения	Схема конструкции	Примечание
<p>6. Ввод вращения с использованием деформируемой шестерни (зубчатой волновой передачи)</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Уплотнительный элемент — металлический тонкостенный деформируемый стакан с зубчатым венцом на наружной поверхности</li> <li>2. Применяется в сверхвысоковакуумных системах</li> <li>3. Частота вращения до 500 об/мин</li> </ol>

мембраной), нагружая его касательными напряжениями, величина которых обратно пропорциональна эксцентриситету  $e$ . В свою очередь эксцентриситет  $e$  должен быть весьма малый для ограничения деформации гибкого уплотнительного элемента. Указанные причины сужают область применения ввода вращения подобных конструкций, допуская его использование в случае относительно малых крутящих моментов сопротивления на ведомом валу 3.

Несколько сложнее по конструкции также довольно распространенное устройство для передачи вращения в вакуумный объем, выполненное по схеме 4 табл. 8.

Промежуточное звено 1 описывает коническую поверхность с вершиной в центре шарнира 2. Крутящий момент от сил трения, возникающий в шарнирах между промежуточным звеном 1 и ведущим и ведомым валами 3 и 4, может восприниматься гибким уплотнительным элементом. В случае значительных нагрузок следует применять пространственный шарнир 2, воспринимающий крутящий момент; гибкий уплотнительный элемент при этом нагружается лишь напряжениями изгиба, а касательные напряжения (скручивание) будут отсутствовать, что соответственно повысит надежность и долговечность гибкого уплотнительного элемента.

Для передачи вращения в вакуумный объем при больших моментах сопротивления и высоких требованиях к кинематической жесткости применяется ввод, выполненный по схеме 5 табл. 8. В этом устройстве моменты от сил трения, возникающие в опорах промежуточного звена 1, воспринимаются планетарным механизмом с коническими шестернями, что позволяет разгрузить гибкий

уплотнительный элемент (металлический сильфон) от касательных напряжений [18].

Ведущий поводок 3 связан с изогнутым концом ведомого вала 4, между которыми размещено промежуточное звено 1, представляющее собой коническую шестерню (сателлит) планетарного механизма с солнечной конической шестерней 2. Сателлит 1 и солнечная коническая шестерня 2 имеют одинаковое количество зубьев. Внешняя цилиндрическая поверхность сателлита 1 входит в расточку поводка 3. Промежуточное звено 1 имеет глухую расточку, благодаря которой герметизируется вакуумный объем.

Значительный интерес представляют зубчатые волновые передачи, построенные по схеме 6 табл. 8 и позволяющие передавать в вакуумный объем большие крутящие моменты [17]. Передача состоит из жесткого колеса 1, тонкостенного зубчатого колеса 2, являющегося одновременно герметизирующей перегородкой, и генератора деформации 3.

Шаг зубчатых колес 1 и 2 сделан одинаковым, а число зубьев — разным. Генератор 3 при своем вращении упруго деформирует тонкостенное колесо 2 таким образом, что в зоне большей оси эллипса зубья колес находятся в зацеплении, а в зоне малой оси между их вершинами создается гарантированный зазор. В промежуточных положениях зубья между большой и малой осями находятся в неполном зацеплении. Общее количество зубьев, находящихся в контакте и передающих нагрузку, зависит от формы генератора деформации 3 и профиля зубьев.

При вращении генератора 3 волнообразно деформируется тонкостенное колесо 2 и зона зацепления будет перемещаться. Так как тонкостенное колесо 2 неподвижно, то начнет вращаться жесткое колесо 1, при этом передаточное число устройства

$$i = z_1 / (z_1 - z_2), \quad (4)$$

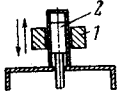
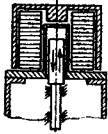
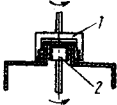
где  $z_1$  — число зубьев на жестком колесе 1 с внутренним зацеплением;  $z_2$  — число зубьев на тонкостенном колесе 2 с внешним зацеплением.

Разность чисел зубьев жесткого колеса 1 и тонкостенного колеса 2 делают равной числу волн деформации. В нашем случае эллиптический генератор 3 создает одновременно две волны деформации по большой оси и разность чисел зубьев будет равна 2.

Необходимо отметить, что волновая передача может работать как в режиме редуктора с очень большим передаточным отношением, так и в режиме мультипликатора. Благодаря тому, что в зацеплении одновременно участвует большое количество зубьев, передача обладает высокой кинематической жесткостью при практическом отсутствии люфта между зубчатыми колесами.

В табл. 9 приведены схемы конструкций вводов движения через неподвижную перегородку из немагнитного материала.

## Вводы движения с неподвижной перегородкой

Наименование ввода движения	Схема конструкции	Примечание
1. Ввод поступательного движения с постоянным магнитом		Кинематическая жесткая передача не-
2. Ввод поступательного движения с электромагнитом		То же
3. Ввод вращения с постоянным магнитом		Частота вращения 500—700 об/мин

Герметичность таких устройств высока, так как в них отсутствуют подвижные вакуумные уплотнения.

Недостатками вводов движения через неподвижную перегородку являются трение в вакууме, ограниченная величина передаваемых усилий и нежесткость кинематической передачи.

В конструкции устройства по схеме 1 табл. 9 при перемещении наружного постоянного магнита 1 перемещается якорь 2, отделенный от магнита 1 тонким стаканом из немагнитного материала.

В конструкции устройства по схеме 2 табл. 9 в отличие от схемы 1 табл. 9 для тех же целей применен электромагнит.

В устройстве, выполненном по схеме 3 табл. 9 для передачи вращения использован постоянный магнит 1. На ведомом валу укреплен якорь 2, который отделен от магнита 1 тонким герметизирующим стаканом, выполненным из немагнитного материала. На полюсах якоря и магнита сделаны канавки, перераспределяющие магнитный поток с целью его концентрации. Магниты изготавливаются из никелькобальтовых сплавов с направленной кристаллизацией [21].

#### 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ ВВОДЫ

Во внутренних объемах вакуумных установок могут находиться нагревательные элементы, различные датчики и иные уст-

ройства, требующие применения электрических вводов. В зависимости от электрических параметров питания, конструктивных особенностей и условий эксплуатации электрические вводы могут быть подразделены на три основные группы: 1) низковольтные низкочастотные; 2) высоковольтные низкочастотные; 3) высокочастотные.

**Низковольтные вакуумные вводы** (до 250 В) в свою очередь делятся на *сильноточные* и *слаботочные*. Сильноточные вводы служат в основном для подвода электроэнергии к нагревательным элементам, расположенным внутри откачиваемого объема. Для исключения нагрева свыше допустимой температуры сильноточные вводы часто охлаждаются водой. Практически вводы, предназначенные для пропускания тока свыше 100 А, должны иметь водяное охлаждение. Пло-

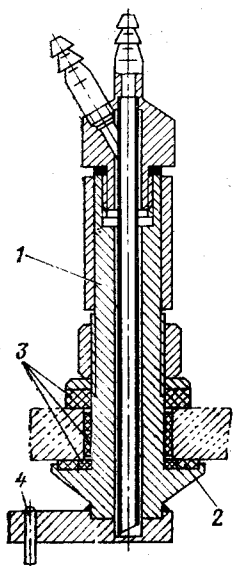


Рис. 10. Сильноточный вакуумный ввод:

1—медный стержень; 2—резиновый уплотнитель;  
3—изоляционные кольца;  
4—нагреватель

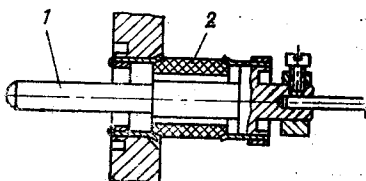


Рис. 11. Токоввод для прогреваемых вакуумных систем:

1—стержень; 2—металлокерамический изолятор

щадь поперечного сечения водоохлаждаемого электрического ввода должна быть такой, чтобы плотность тока не превышала  $(10-12) \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Без охлаждения допустимая плотность тока для меди не должна превышать  $3 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, а для стали марки 12Х18Н10Т —  $1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Стенка вакуумного объема, граничащая с вводом, предназначенным для пропускания переменного тока, также должна охлаждаться водой, так как в ней выделяется значительное количество тепла. Плотность тока в месте контакта токоподвода должна быть не более  $2 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, а в случае, если токоподвод тоже охлаждается водой, допустимая величина плотности тока может быть увеличена до  $5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

На рис. 10 изображен сильноточный ввод, применяемый в вакуумных установках с давлением не ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.

Вакуумные вводы, используемые в прогреваемых установках, должны уплотняться с камерой через металлическую прокладку.

Изоляционные элементы этих вводов изготавливаются из керамики или стекла, что позволяет при необходимости прогреть вводы с целью их обезгаживания.

На рис. 11 приведен прогреваемый ввод простейшей конструкции, пригодный для использования в системах высокого и сверхвысокого вакуума.

**Высоковольтные** вакуумные вводы применяются при напряжениях свыше 250 В, а также при необходимости исключить утечки в измерительных цепях.

Вакуумный ввод с малыми электрическими утечками лучше всего изготавливать с использованием керамических изоляторов, как показано на рис. 11. В случае напряжений, больших 1500 В, керамический изолятор делается ребристым для увеличения протяженности изолирующей поверхности.

**Высокочастотные** вакуумные вводы чаще всего применяются для подвода тока высокой частоты (свыше 1500 Гц) от высокочастотного генератора к индуктору, помещенному в вакуумном объеме. Высокочастотные вводы для уменьшения потерь высокочастотной энергии, как правило, выполняются коаксиальными и охлаждаются водой [19].

## 5. СМОТРОВЫЕ ОКНА

При давлениях выше  $5 \cdot 10^{-5}$  Па широко применяются смотровые окна с резиновыми уплотнителями. Одна из конструкций такого смотрового окна показана на рис. 12. Полированный стеклянный диск 5 с помощью нажимного кольца 1 через мягкую прокладку 2 прижимается к резиновому уплотнителю 3. При проведении в вакуумном объеме термических операций, связанных с тепловыми излучениями, стеклянный диск изготавливается из тугоплавкого стекла. Для предохранения внутренней поверхности стеклянного диска от загрязнения иногда ставится защитное стекло 4, которое периодически заменяется. В некоторых конструкциях, особенно в тех, которые связаны с интенсивным загрязнением, применяются защитные металлические заслонки, отводимые на короткие промежутки времени. В конструкциях с поворотными дисками с набором защитных стекол и светофильтров применяются механические щетки, которые очищают защитные стекла и светофильтры.

Для защиты смотровых окон от загрязнения и теплового излучения также применяют быстро вращающиеся диски с прорезами. При этом интенсивность загрязнения снижается пропорционально отношению длины окружности с радиусом, равным расстоянию от оси вращения диска до середины окна, к ширине паза. При частоте вращения диска более 1500 об/мин достигается хорошая видимость через окно.

В установках со сверхвысоким вакуумом употребляются смотровые окна без резиновых уплотнений (рис. 13). Стеклян-

ный колпак 1 припаян к коваровому стакану 2, сваренному в свою очередь с фланцем 3 из нержавеющей стали. Фланец уплотняется с вакуумным объемом через металлическую прокладку.

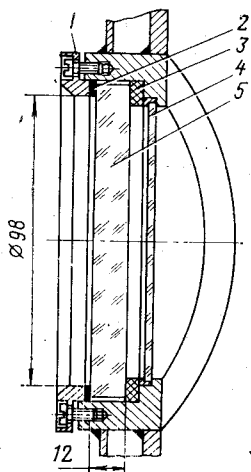


Рис. 12. Смотровое окно с резиновым уплотнителем

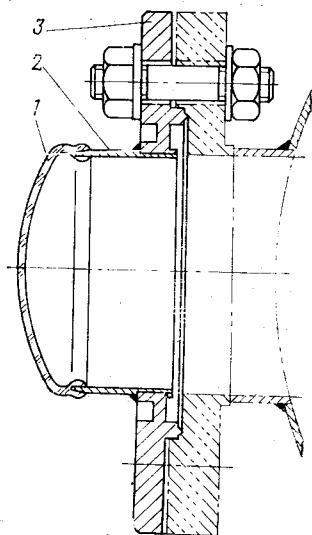


Рис. 13. Смотровое окно для прогреваемых высоковакуумных систем

Для предохранения от разрушения соединения стекла с металлом при затяжке металлического уплотнения необходимо предусматривать разгрузочные канавки.

### Глава 3

## КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

### 1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

Коммутационная аппаратура (краны, затворы, клапаны, на- текатели) являются одним из важнейших элементов вакуумных систем.

Особенности конструкций вакуумной коммутационной аппаратуры вытекают из специфических требований, резко отличающихся от требований, предъявляемых к подобной аппаратуре, применяемой в газовых, пневматических или гидравлических системах [5]. К таким специфическим требованиям относятся:

1) Высокая герметичность. Особо жесткие требования по герметичности предъявляются к аппаратуре, применяемой в системах высокого и сверхвысокого вакуума.



2. Максимальная проводимость в открытом положении. Для аппаратуры, работающей при молекулярном режиме течения газа (в диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума), это требование лучше всего обеспечивается созданием прямооточных конструкций, оказывающих наименьшее сопротивление потоку откачиваемого газа.

3. Минимальное газовыделение внутренних частей аппаратуры. Необходимо исключить применение смазок и уплотнителей с высокой упругостью паров. Конструкция аппаратуры должна быть разборной и не должна иметь недоступных для промывки мест и труднооткачиваемых карманов.

4. Незначительная адсорбция газов внутренними поверхностями аппаратуры. Аппаратура должна изготавливаться из некорродирующих металлов.

5. Возможность многократного прогрева аппаратуры, предназначенной для работы в системах сверхвысокого вакуума до температуры 300—700° С с целью ее обезгаживания.

Конструктивное выполнение коммутационной аппаратуры (ГОСТ 14715—69\* и ГОСТ 14718—69\*), предназначенной для работы в условиях среднего и высокого вакуума, часто отличается лишь стремлением уменьшить поверхность резиновых уплотнений, обращенную в вакуумную полость. Заметим, что с целью унификации в системах среднего вакуума довольно часто применяют аппаратуру, предназначенную для работы в системах высокого вакуума, несмотря на некоторые осложнения конструкции и несколько большую стоимость.

Коммутационную аппаратуру целесообразно рассматривать в зависимости от области применения, которая часто предъявляет дополнительные требования.

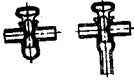
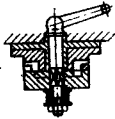
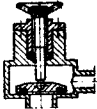
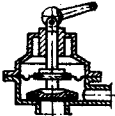
## 2. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА НЕПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Схемы конструкций аппаратуры с ручным управлением приведены в табл. 10.

В вакуумных системах, предназначенных для лабораторных целей, нашли широкое применение стеклянные пробковые краны различных конструкций (проходные, угловые, многоходовые, порционные), выполненные по схеме 1 табл. 10. В промышленных установках стеклянные краны почти не применяются из-за малой механической прочности и трудности автоматизации таких вакуумных систем.

В неавтоматизированных промышленных установках весьма часто используются краны золотникового типа, выполненные по схеме 2 табл. 10. Краны этого типа позволяют совместить в одном золотнике несколько коммутирующих элементов и исключить ошибки оператора, возникающие при неправильной последовательности включения соответствующих коммутирующих уст-

## Коммутационная аппаратура с ручным управлением для непрогрваемых вакуумных систем

Наименование	Схема	Примечание
1. Пробковые краны		<p>Применяются в стеклянных вакуумных системах с давлением <math>p</math> больше <math>1 \cdot 10^{-3}</math> Па. Материал — стекло С49-2. Герметичность обеспечивается с помощью вакуумной смазки (ГОСТ 9645—61). Применяются для диаметра условного прохода (ДУ) 6,3—40 мм</p>
2. Краны золотникового типа		<p>Применяются в металлических системах с давлением <math>p</math> больше <math>1 \cdot 10^{-3}</math> Па вместо блоков клапанов. Имеют положения, соответствующие различным этапам откачки и наполнения. Герметичность обеспечивается притиркой поверхностей и применением смазок</p>
3. Краны с винтовым приводом и сальниковым или сильфонным уплотнением штока		<p>Применяются в металлических системах с давлением <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па. Сильфонное уплотнение штока выполняется по схеме 1 табл. 8. Вместо резьбы часто применяют байонетное соединение штока с корпусом</p>
4. Кран с эксцентриковым приводом		<p>Область применения та же, что и схемы 3 табл. 10</p>

ройств. Однако необходимость смазки трущихся поверхностей в этих конструкциях приводит к загрязнению вакуумной системы, что в большинстве случаев является недопустимым.

В кранах с винтовым приводом, выполненных по схемам 3 табл. 10, давление тарелки на седло определяется усилием, прикладываемым оператором, что часто приводит к преждевременному выходу из строя уплотнителя.

На рис. 14 изображен кран ДУ-25 с сильфонным уплотнением штока, выполненным по схеме 3 табл. 10. Для удобства сбор-

ки привод крана с подвижным сильфонным уплотнителем смонтирован на фланце 3 и представляет собой съемный узел.

На рис. 15 изображен кран с ручным эксцентриковым приводом (см. схему 4 табл. 10), выпускаемый отечественной промышленностью. Усилие уплотнения крана создается эксцентриком 1, перемещение по вертикали которого ограничивается направляющей 2 (кинематическое замыкание). Кинематическое замыкание позволяет исключить пружины и обеспечить герметичность при возникновении давления с любой стороны тарелки крана. Положение рукоятки указывает на состояние крана (открыт — закрыт).

В автоматизированных откачных системах применяется коммутационная аппаратура с дистанционным управлением. Дистанционное управление позволяет производить более рациональную компоновку вакуумных систем и обеспечивает возможность достаточно простого осуществления блокировок и программирования [29, 25].

На рис. 16 представлены три типоразмера из серии кранов с эксцентриковым ручным приводом.

На рис. 17 изображены краны с электромеханическим приводом, выполненные по схеме 3 табл. 10. Закрытие крана производится электродвигателем или вручную при вращении маховика.

В табл. 11 приведены наиболее распространенные схемы коммутационной аппаратуры с дистанционным управлением. В ряде автоматизированных вакуумных установок получили распространение клапаны с пневматическим или гидравлическим приводами, выполненными по схеме 1 табл. 11. Уплотнение резинового клапана в этих конструкциях осуществляется путем подачи воздуха или жидкости в цилиндр привода клапана, а открытие — под действием пружины или подачи воздуха или жидкости в штоковую полость.

Электромагнитные клапаны по конструкции сложнее клапанов с пневматическим или гидравлическим приводом, но, обладая малым временем срабатывания (около 0,1 с) незаменимы в качестве блокировочных элементов. Электромагнитные клапаны имеют простые цепи управления и получили широкое применение в автоматизированных установках. Усилие, уплотняющее клапан

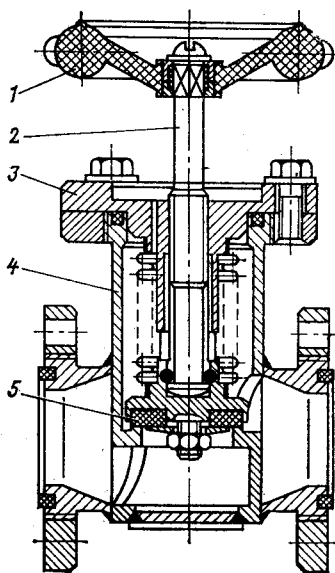


Рис. 14. Вакуумный кран с ручным приводом:

1—маховик; 2—винт; 3—фланец;  
4—корпус; 5—резиновый уплотнитель

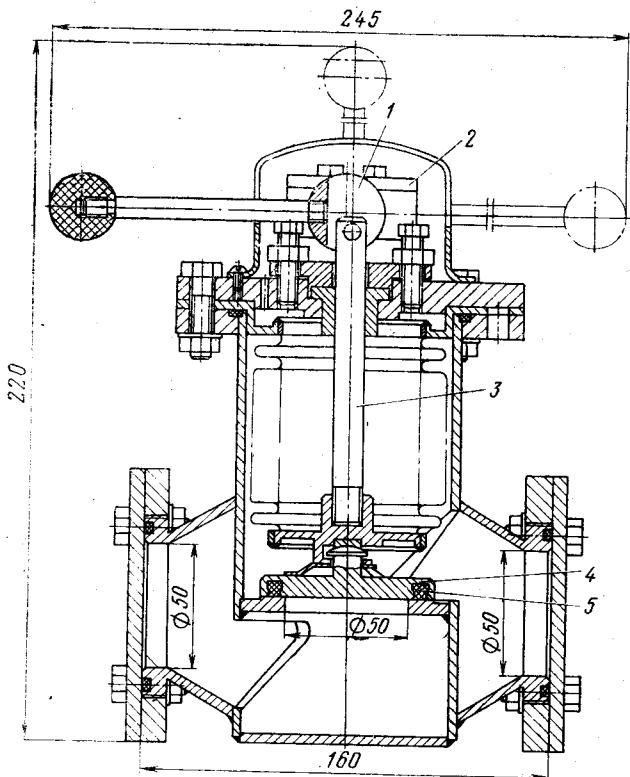


Рис. 15. Кран с ручным эксцентриковым приводом:  
 1—эксцентрик; 2—направляющая эксцентрика; 3—шток с сильфоном; 4—тарелка клапана; 5—резиновый уплотнитель

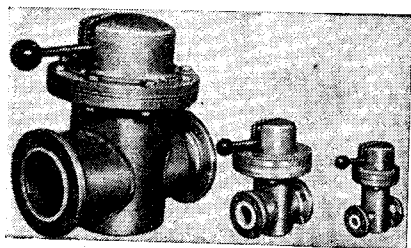


Рис. 16. Краны с эксцентриковым ручным приводом

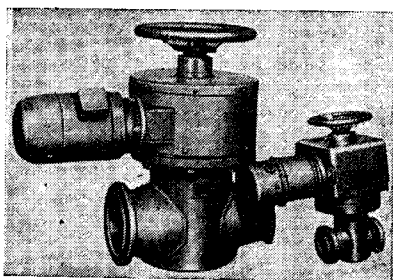
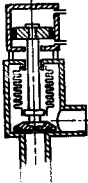
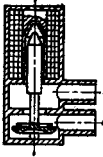
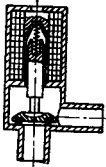
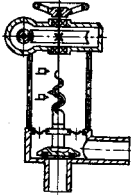


Рис. 17. Краны с электромеханическим приводом

**Коммутационная аппаратура с дистанционным управлением  
для непрогреваемых вакуумных систем**

Наименование	Эскиз	Примечание
1. Клапан с пневматическим или гидравлическим приводом		<p>Применяется в системах с давлением <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па. Уплотнение штока выполнено по схеме 1 табл. 8. Обычно комплектуется с электромагнитным золотником</p>
2. Клапан с электромагнитным приводом (усилие уплотнения обеспечивается магнитом)		<p>Применяется в системах с давлением <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па. Уплотнение штока выполнено по схеме 2 табл. 9. Работает только в одном положении. Открытие — под действием силы тяжести якоря</p>
3. Клапан с электромагнитным приводом (усилие закрытия создается пружиной)		<p>Применяется в системах с давлением <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па. Уплотнение штока выполнено по схеме 2 табл. 9. Работает в любом положении. Может служить предохранительным клапаном.</p>
4. Кран с электромеханическим приводом		<p>Применяется в металлических системах: а) с уплотнением штока (по схеме 2 табл. 7) до давления <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па; б) с уплотнением штока резиновой диафрагмой (по схеме 2 табл. 7) до давления <math>p</math> больше <math>1 \cdot 10^{-1}</math> Па; в) с уплотнением штока металлическим сильфоном (по схеме 1 табл. 8) до давления <math>p</math> больше <math>5 \cdot 10^{-5}</math> Па</p> <p>Применяется для <math>DU \geq 63</math> мм</p>

(см. схему 2 табл. 11) создается электромагнитом, а открытие происходит под действием силы тяжести якоря; поэтому клапан может работать только в одном (вертикальном) положении, что является существенным недостатком конструкции. Предохранительный клапан, выполненный по схеме 3 табл. 11, может рабо-

тат в любом положении, так как уплотняющее усилие в нем создается пружиной, а открытие — с помощью электромагнита.

При создании клапанов с электромагнитным приводом открытия и проходным сечением более 50 мм необходимо применять весьма жесткие пружины для надежного уплотнения и, следовательно, сильные электромагниты [4]. Поэтому для перекры-

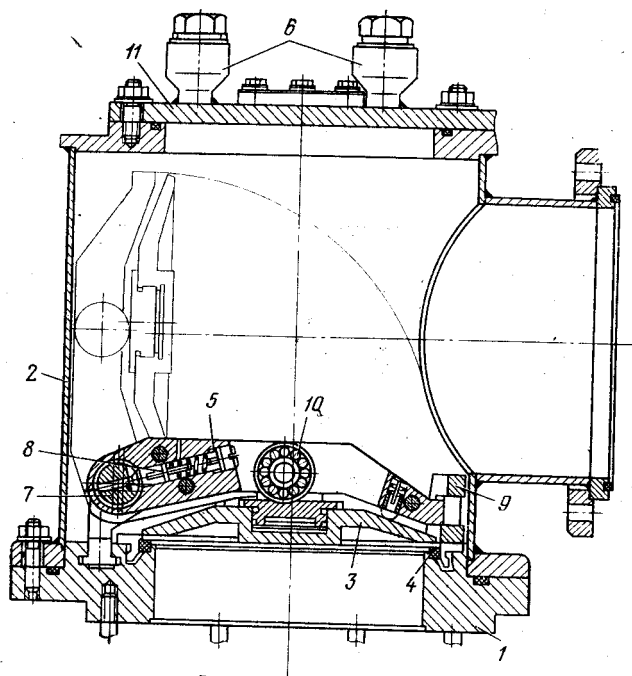


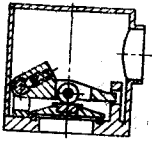
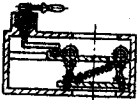
Рис. 18. Высоковакуумный затвор:

- 1—фланец затвора; 2—корпус; 3—тарелка клапана; 4—резиновый уплотнитель; 5—рычаг; 6—штуцер; 7—эксцентриковый валик; 8—фиксатор; 9—рамка; 10—шарикоподшипник; 11—заглушка

тия трубопроводов больших сечений чаще всего применяют вакуумные затворы, оказавшиеся проще по конструкции и создающие минимальное сопротивление потоку откачиваемых газов. Широкое распространение в отечественной промышленности получил высоковакуумный затвор (рис. 18), выполненный по схеме 1 табл. 12 [8], [24].

В открытом положении тарелка 3 расположена вертикально в корпусе 2. При вращении эксцентрикового валика 7 по часовой стрелке тарелка поворачивается на  $90^\circ$  и занимает горизонтальное положение. В это время еще сохраняется небольшой зазор между тарелкой и резиновым уплотнителем 4. При дальнейшем вращении эксцентрикового валика выдавливается фиксатор 8, а

## Затворы для непрогрваемых вакуумных систем

Наименование	Схема	Примечание
<p>1. Затвор с эксцентриковым механизмом уплотнения тарелки</p>		<p>Имеет ручной или электро-механический привод. Уплотнение эксцентрикового вала выполнено по схеме 1 табл. 7. Натекание воздуха не более <math>5 \cdot 10^{-4}</math> м<sup>3</sup>Па/с. Применяется для ДУ=63—400 мм</p>
<p>2. Затвор с подвеской тарелки на шарнирном параллелограмме</p>		<p>Имеет ручной или электро-механический привод. Уплотнение ввода движения выполнено по схеме 1 табл. 7. Применяется для ДУ=63—1000 мм</p>

рычаг 5 вдвигается в рамку 9. Затем эксцентриковый валик начинает опускаться вниз левое плечо рычага 5 и через шарикоподшипник 10 прижимает тарелку к резиновому уплотнителю.

При применении электропривода вращение валика 7 ограничивается концевыми выключателями, а при ручном закрытии — упорами. Затвор открывается при вращении эксцентрикового валика против часовой стрелки.

Вал, передающий вращение к эксцентриковому валику, вращается в патрубке, приваренном к корпусу. Валик в патрубке уплотняется через сильфонный вращающийся ввод. Ведущий вал связан с эксцентриковым валиком через крестоподвижную муфту.

При применении электропривода вращение от электродвигателя передается ведущему валу через двухступенчатый редуктор с прямозубой и червячной передачами.

Для предохранения механизма от перегрузки предусмотрена фрикционная многодисковая муфта. К заглушке затвора 11 приварены два вакуумных ввода с грибовыми уплотнениями, один из которых предназначен для установки манометрического преобразователя, а другой — для предварительной откачки системы. В зависимости от компоновки вакуумной системы затвор может быть как угловым, так и прямооточным.

Конструкция затвора, выполненная по схеме 2 табл. 12 приведена на рис. 19.

Тарелка 5 с резиновым уплотнителем 7 перекрывает отверстие затвора, уплотняясь по седлу, сделанному за одно целое с крышкой 10. Тарелка подвешена на четырех серьгах 6 к каретке

4, перемещающейся на шарикоподшипниках 12 в пазах корпуса 9. Движение каретки сообщается кривошипом 3, который также имеет опоры качания и уплотняется с крышкой 8 двумя резиновыми кольцами, пространство между которыми заполняется вакуумным маслом. В крайних положениях затвора кривошип стопорится фиксатором 2, вмонтированным в рукоятку 1. При по-

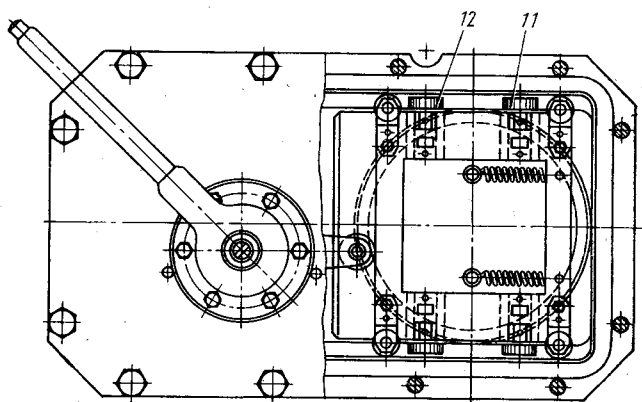
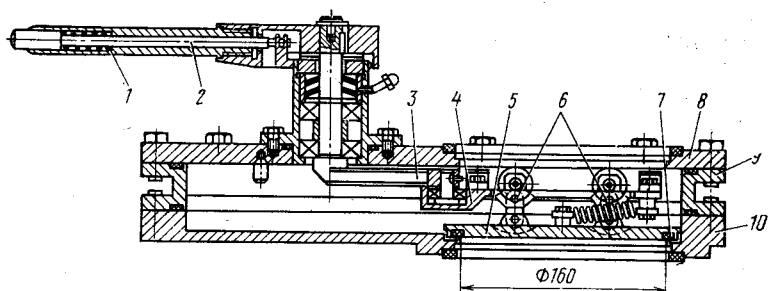


Рис. 19. Вакуумный затвор с ручным приводом

вороте рукоятки по часовой стрелке каретка перемещается вправо до тех пор, пока тарелка не упрется в крышку. При дальнейшем движении каретки вправо серьги выпрямляются, а тарелка опускается вниз и уплотняет отверстие затвора.

Затвор не разуплотняется под действием атмосферного давления с любой стороны тарелки. Открытие затвора производится вращением рукоятки против часовой стрелки. При этом в первый момент тарелка двумя пружинами 11 подтягивается вверх и вправо, а затем вместе с кареткой перемещается влево, в карман крышки, полностью открывая проходное сечение затвора. Затворы, снабженные электроприводом, могут управляться дистанционно.



### 3. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Коммутационная аппаратура, предназначенная для работы в сверхвысоковакуумных системах, обычно обезгаживается прогревом до температуры 300—700°С. При обезгаживании аппаратуры не должно происходить заклинивание деталей клапанов и нарушение герметичности в соединениях из-за возможной деформации деталей. Уплотняющие элементы аппаратуры должны выдерживать многократные нагревы и охлаждения, а также обеспечивать большое число закрытий.

Уплотнение клапанов может осуществляться как вследствие расплавления и затвердевания металла или сплавов с низкой температурой плавления и низкой упругостью пара при температуре плавления (жидкометаллические уплотнения), так и вследствие деформации металлического клапана или синтетического уплотнителя с малым газовыделением (например, резины ИРП-2043).

Аппаратура с жидкометаллическим уплотнителем применяется ограниченно из-за большого времени срабатывания, эксплуатационных неудобств, связанных со взаимодействием жидких металлов и сплавов со стенками аппаратуры и атмосферой, а также из-за неизбежного попадания частиц расплавленного металла в вакуумную систему. Промежуточное положение между расплаваемыми и деформируемыми уплотнениями занимают уплотнения с использованием индия и его сплавов [1, 9].

В уплотнении, выполненном по схеме 1 табл. 13, надежная герметизация достигается благодаря высокой смачиваемости индием и его сплавами большинства металлов.


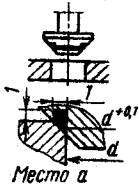

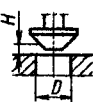



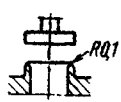
Удельное давление, необходимое для уплотнения крана, невелико. Приложение чрезмерного усилия может привести к выдавливанию индия из канавки. Поэтому в конструкциях кранов с индиевым уплотнением необходимо предусматривать ограничители усилия закрытия. При обезгаживании прогревом до температуры, превышающей температуру плавления индия, кран необходимо монтировать таким образом, чтобы не происходило вытекания индия, либо прогреть его в закрытом состоянии.

Как уже отмечалось, наибольшее распространение в настоящее время получили цельнометаллические прогреваемые краны, в которых уплотнение происходит благодаря пластической деформации материала тарелки клапана или седла.

В уплотнении, выполненном по схеме 2 табл. 13, герметизация осуществляется путем смятия конуса уплотняющего элемента кромками отверстия корпуса крана. Конус уплотняющего элемента изготавливается из мягкого материала, чаще всего из отожженной меди или алюминия.

Шероховатость поверхности уплотняющих кромок седла должна быть не ниже 0,5, что соответствует 8-му классу, а ко-

## Схемы уплотнения кранов с использованием пластических деформаций

Схема уплотнений		Примечание
Уплотненное положение	Открытое положение	
1 		Уплотнение с помощью индия и его сплавов. Применяется для ДУ=6,3—400 мм. Усилие уплотнения 8—1 Н/мм*
2 		Применяется для ДУ=6,3—250 мм. Натекание не более $1,3 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> ·Па/с. Усилие для пары медь—сталь 300—400 Н/мм. Усилие для пары алюминий—сталь 150 Н/мм
3 		Применяется для ДУ=16—160 мм. Натекание не более $6,5 \cdot 10^{-12}$ м <sup>3</sup> ·Па/с. Усилие для пары медь—сталь 200 Н/мм
4 		Применяется для ДУ=6,3—400 мм. Натекание не более $1,3 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> ·Па/с. Усилие для пары медь—сталь 150 Н/мм

\* Удельные давления, необходимые для уплотнения аппаратуры, отнесены к 1 мм ДУ крана.

нической поверхности уплотняющего элемента — не ниже 1,0 (7-й класс). На конической поверхности не допускаются риски, забоины и другие механические дефекты.

С целью уменьшения уплотняющего усилия иногда применяются краны, в которых уплотнение происходит при врезании острых кромок седла корпуса в конус уплотняющего элемента, изготовленного из более мягкого материала (как показано на схеме 3 табл. 13). В конструкции крана с подобной схемой уплотнения должны быть обеспечены хорошее направление штока уплотняющего элемента и жесткое крепление к нему уплотняющего конуса.

Срок службы кранов с медным уплотняющим элементом невелик, например, для кранов с уплотнением по схеме 2 табл. 13 он составляет всего 500—1000 циклов (открытий—закрытий). Такой малый срок службы обусловлен тем, что в конструкциях цельнометаллических кранов с ручным и электромеханическим приводом трудно обеспечить постоянство усилия на штоке уплотняющего элемента, и поэтому приходится с каждым новым циклом вновь деформировать его, что требует приложения постоянно возрастающего усилия.

Отметим, что в случае использования в кране с уплотнением по схеме 2 табл. 13 пневматического привода, обеспечивающего постоянство усилия на штоке уплотнительного элемента, срок службы увеличивается.

В кранах с уплотнением по схеме 4 табл. 13 достигается практически постоянная ширина кольца смятия грибка независимо от точности изготовления и сборки, что обеспечивает двукратное уменьшение усилия уплотнения и увеличение более чем на порядок срока службы по сравнению со схемой 1 табл. 13.

Кран, выполненный по схеме 1 табл. 14, представлен на рис. 20. Сменный медный грибок 4 крепится к штоку 3, перемещающемуся во втулке по посадке второго класса точности. Высокие требования предъявляются в этой конструкции к правильности геометрической формы конической поверхности грибка и кромок седла. Кроме того, надежное многократное уплотнение грибка по седлу может быть достигнуто лишь в случае, если их несоосность не превышает 0,1 мм. При этом достигается равномерный отпечаток кромок седла на конической поверхности грибка и, следовательно, равные удельные давления по всему периметру уплотнения. Узел 8 с сильфоном 6 уплотняется с корпусом 5 медной прокладкой 7. Медная прокладка затягивается гайками 9. Усилие уплотнения создается винтом 1 и передается на корпус крана

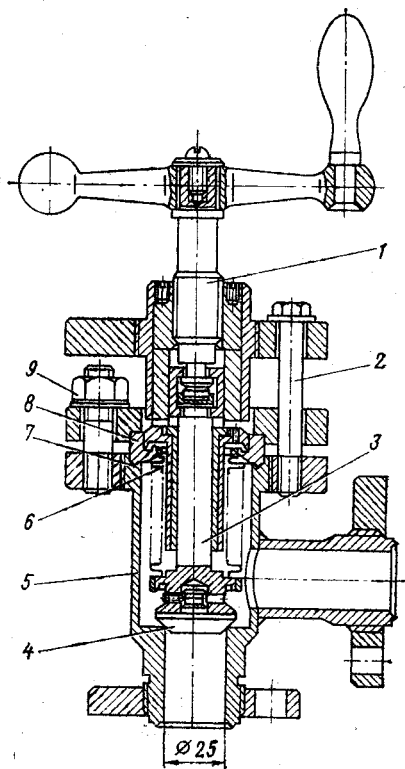
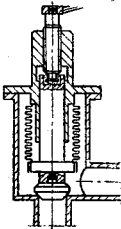
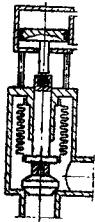


Рис. 20. Цельнометаллический прогреваемый кран с ручным приводом

через дополнительный фланец и болты 2. При этом исключается возможность разуплотнения сильфонного узла 8 с корпусом при закрытии крана.

Таблица 14

Коммутационная аппаратура для сверхвысоковакуумных систем

Наименование	Схема	Примечание
1. Кран с винтовым механизмом перемещения штока		<p>Имеет ручной или электромеханический привод. Применяется для <math>DU \leq 250</math> мм. Натекание через уплотняющий элемент не более <math>6,5 \cdot 10^{-5}</math> м<sup>3</sup> · Па/с</p>
2. Кран с пневматическим или гидравлическим механизмом перемещения штока		<p>Применяется для <math>DU \leq 400</math> мм</p>

При проходных сечениях более 63 мм для получения надежного уплотнения при многократных срабатываниях тарелку уплотняющего элемента подвешивают на шарнире и гибкой диафрагме. Такая подвеска тарелки применена в конструкции крана с электроприводом, который изображен на рис. 21. Диафрагма 7, изготовленная из нержавеющей стали, является гибкой подвеской тарелки уплотняющего элемента 8. Усилие, развиваемое электродвигателем 2, передается через червячный редуктор 1, винтовую пару и предварительно сжатые тарельчатые пружины (на рисунке не показаны) на шток 6. Тарельчатые пружины обеспечивают сохранение уплотняющего усилия в заданных пределах, несмотря на некоторые неточности в конечном положении системы при остановке электродвигателя и деформацию конической поверхности тарелки.

Предварительный натяг тарельчатых пружин в данной конструкции составляет примерно 20 000 Н. Шток через шарик 9 передает усилие на тарелку уплотняющего элемента и уплотняет ее по острой кромке корпуса 4. Открытое и закрытое положения

крана ограничиваются концевыми выключателями. После каждой переборки крана так же, как и в предыдущей конструкции, необходимо проточкой удалить отпечаток седла на конусе тарелки уплотняющего элемента. В этой конструкции крана также требуется обеспечить полное отсутствие забоин и рисок на уплотняющих поверхностях и высокую точность сборки (несоосность конической поверхности уплотняющего элемента и уплотняющей кромки корпуса допускается не более 0,15 мм). В конструкции крана уплотняющее усилие принимается теми же шпильками, которые затягивают прокладку 3, уплотняющую сильфонный узел 5 с корпусом, что нежелательно.

Срок службы кранов с медным уплотняющим элементом может быть повышен благодаря применению пневматического или гидравлического привода (схема 2 табл. 14). Однако такая система не всегда удобна, так как требует постоянного поддержания расчетного давления в закрытом положении крана.

Для прогрева коммутационной аппаратуры с целью ее обезгаживания чаще всего применяют нагревательные элементы в виде спиралей из никромовой проволоки, которыми обматывается аппаратура. В качестве электрической изоляции

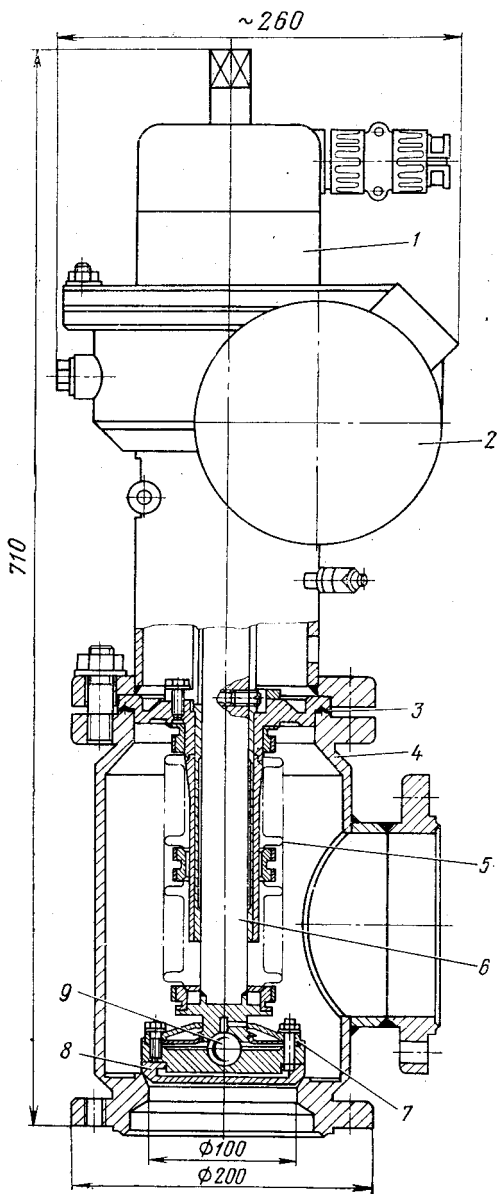


Рис. 21. Цельнометаллический кран с электромеханическим приводом

используют керамические бусы или чулки из термостойкой стеклоткани [19].

Все резьбовые элементы (гайки, винты, шпильки) в целях исключения прихватывания во время прогрева покрываются дисульфидом молибдена или сульфидируются. Корпусы аппаратуры, предназначенной для работы в области сверхвысокого вакуума, как правило, изготавливаются из нержавеющей сталей.

Вакуумные системы современных установок содержат, кроме средств откачки, большое количество коммутирующих элементов и соединительных трубопроводов. Стремление упростить обслуживание и исключить возможные ошибки оператора при работе с кранами приводит к необходимости компоновки коммутирующих элементов в едином блоке с жесткой последовательностью переключений [25].

#### 4. УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАПУСКА ГАЗОВ В ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

При изготовлении газонаполненных ламп, калибровке газоанализаторов и манометрических преобразователей, производстве тонкопленочных элементов, испытаниях различной вакуумной аппаратуры необходимо создавать дозированные потоки вполне определенных газов в вакуумную систему. Для этого применяют устройства, основные принципиальные схемы которых приведены в табл. 15 [5].

В лабораторной практике и мелкосерийном производстве нашли применение стеклянные порционные двухходовые краны (схема 1 табл. 15). В притертой пробке крана имеется карман, который при повороте в сторону баллона с газом наполняется им до определенного давления. При повороте пробки до совмещения кармана с вакуумной магистралью газ распространяется по всему объему вакуумной системы, причем давление газа устанавливается во столько раз меньшим, во сколько раз увеличивается его объем.

Основными недостатками порционных кранов являются малая надежность работы, необходимость смазки и трудность автоматизации процесса напуска.

Диффузионный натекатель (схема 2 табл. 15) нашел применение главным образом при калибровке гелиевых масс-спектрометрических течейскателей и манометрических преобразователей. Принцип его действия основан на диффузии газов через перегородку 2, впаянную в корпус натекателя 1.

Так, для создания заданного потока гелия используется стеклянный баллон 1 с гелием, в который впаяна кварцевая трубка, через которую и происходит интенсивная диффузия гелия даже при комнатной температуре.

Работа термодиффузионных натекателей (схема 3 табл. 15) основана на повышенной избирательной диффузии газов через некоторые материалы при их нагреве. Например, если палладие-

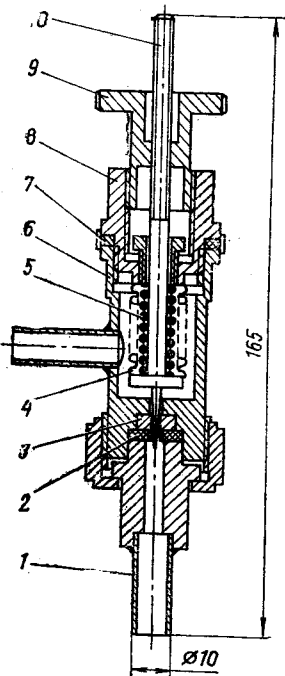
## Устройства для напуска газов в вакуумные системы

Наименование	Схема	Примечание
1. Порционный стеклянный кран		Наполнение объемов до определенного давления
2. Диффузионный натекатель		Калибровка масс-спектрометрических гелиевых гечискателей. Калибровка манометров, потокометров и т. п.
3. Термодиффузионный натекатель		Напуск чистых газов в вакуумные системы технологических установок
4. Игольчатый натекатель с ручным управлением		Напуск газа в объем при проведении различных исследований

вую трубку 1, закрытую с одного конца, с другой через какой-либо переход спаять со стеклянной трубкой 2, то ее можно использовать как фильтр, пропускающий только чистый водород; последний диффундирует через стенки трубки, нагретой нагревателем 3 до достаточно высокой температуры ( $800^{\circ}\text{C}$ ). С меньшей скоростью водород диффундирует также через нагретый никель, железо и платину.

Для напуска чистого кислорода обычно используют серебряную трубку, также нагреваемую до температуры  $800^{\circ}\text{C}$ . Скорость диффузии газов в термодиффузионных натекателях определяется разностью давлений и температурой металлической перегородки. Значительным преимуществом диффузионных и термодиффузионных натекателей является высокая степень чистоты наполняющих газов и возможность автоматизации процесса напуска.

Конструкция игольчатого натекателя с ручным управлением по схеме 4 табл. 15 приведена на рис. 22. Величина потока газа регулируется погружением тонкой стальной конусной каленой конической иглы 10 с углом конуса  $2^\circ$  в отверстие медного седла 3. Перемещение иглы в осевом направлении осуществляется вращением гайки 9 с дифференциальной резьбой, люфт в корпусе подбирается пружиной 5. В качестве подвижного уплотнения иглы применен металлический сильфон 4. Сильфонный узел уплотняется с корпусом через резиновую прокладку 7.



Наименьший поток газа, напускаемый этим натекателем, составляет  $1,3 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>. Па/с. Очень тонкое регулирование потока газа, напускаемого в вакуумную систему, можно осуществить путем уменьшения перепада давлений на натекателе. Для этого применяют два последовательно установленных натекателя с промежуточным объемом. На первом натекателе создается основная часть перепада давлений.

Рис. 22. Игольчатый натекатель:

1—штуцер; 2, 7—резиновые уплотнители; 3—медное седло; 4—металлический сильфон; 5—пружина; 6—корпус; 8, 9—гайки; 10—игла



# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

## СОРТАМЕНТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортамент
Пруток	Ст. 3	5—250	Горячекатаный	535—58*	2590—71
	Сталь 10, 20, 25	5—250	Горячекатаный	1050—74	2590—71
		3—100	Нагартованный и калиброванный	1051—73	7417—75
	Сталь 40X	5—250	Горячекатаный и кованный	4543—71	2590—71
		3—100	Нагартованный и калиброванный	1051—73	2591—71 7417—75
	Сталь 1X13, 2X13, 12X18N10T, 12X18N10T	До 200	Горячекатаный и кованный	5949—61*	2590—71
	Медь М1, М2, М3	5—40	Тянутый	1535—71	1535—71
		14—120	Прессованный	1535—71	1535—71
		35—100	Катанный	1535—71	1535—71
Латунь Л63	5—40 10—160	Тянутый Прессованный	2060—73	2060—73	
Бронза БрБ2	6—32	Отожженный и нагартованный	15835—70	15835—70	
Алюминиевые сплавы АД, АД1, Д16, АМц	5—50 5—300 10,5—180	Тянутый Прессованный Катанный	4783—68**	24488—76	
Пруток квадратный	Ст. 3	5—250	Горячекатаный	535—58*	2591—71

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортмент
Пруток квадратный	Сталь 10, 20, 45	5—250	Горячекатаный Нагартованный и калиброванный	1050—74	2591—71
		3—100		1051—73	8559—75
	Сталь 40X	5—250	Горячекатаный Нагартованный и калиброванный	4543—71	2591—71
		3—100		1051—73	8559—75
	Сталь 12X18H10T	До 200	Горячекатаный	5949—75	2590—71
Латунь Л63	5—40 10—160	Тянутый Прессованный	2060—73	2060—73	
Алюминиевые сплавы АД, АД1, АМц, Д16	5—40 5—70 10,5—70	Тянутый Прессованный Катанный	4783—68**	7857—73	
Пруток шестигранный	Ст. 3	8—100	Горячекатаный	535—58*	2879—69
	Сталь 10, 20, 45	8—100	Горячекатаный Нагартованный и калиброванный	1050—74	2879—69
		3—100		1051—73	8560—67
	Сталь 40X	3—100	Нагартованный и калиброванный	1051—73	8560—67
	Сталь 12X18H10T	—	Калиброванный	5949—75	8560—67
	Латунь Л63	5—40 10—160	Тянутый Прессованный	2060—73	2060—73
Алюминиевые сплавы АД, АД1, АМц, Д16	5—40 5—70 10,5—70	Тянутый Прессованный Катанный	4783—68**	21488—76	

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортмент
Толстый лист	Ст. 3	4—160	Горячекатаный	14637—69	19903—74
	Сталь 10, 20, 45	4—60	Горячекатаный	1577—70*	19903—74
	Сталь 1X13, 2X13, 12X18Н9Т, 12X18Н10Т	4—25	Горячекатаный	7350—66*	19903—74
	Сталь 12X18Н9Т	30—75	Горячекатаный	ЧМТУ 2780—51	19903—74
	Сталь 12X18Н10Т	100—140	Горячекатаный	ЧМТУ 2780—51	СТУ 71447—63
Тонкий лист	Ст. 3	0,5—4 0,2—4	Горячекатаный Холоднокатаный	16523—70*	19903—74
	Сталь 10, 20, 45	0,5—4 0,2—4	Горячекатаный Холоднокатаный	16523—70*	19903—74
	Сталь 40Х	0,5—4 0,2—4	Горячекатаный Холоднокатаный	1542—71	19903—74
	Сталь 1X13, 2X13, 12X18Н9Т, 12X18Н10Т	0,5—4 0,2—4	Горячекатаный Холоднокатаный	5582—75	19903—74

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортмент
Тонкий лист	Медь М1, М2, М3	0,4—10 1—25	Холоднокатанный Горячекатанный	495—70	495—70
	Латунь Л63	5—22 0,4—10	Горячекатанный Холоднокатанный	931—70	931—70
	Алюминиевые сплавы АД, АД1, Д16А, АМцА	0,3—1	Горячекатанный	13722—68*	13722—68*
	Алюминиевый сплав Д16	0,3—10 0,3—10	Плакированный Неплакированный	12592—67** АМТУ 251—58	13722—68**
Лист рифленый	Ст. 3	2,5—8	Горячекатанный	8568—57*	8568—57*
Фольга	Алюминиевые сплавы АД, АД1	0,005—0,2	Холоднокатанный	618—73	618—73
Плита	Алюминиевые сплавы АД, АД1	11—80	Горячекатанный	АМТУ 347—55	АМТУ 347—55
	Алюминиевый сплав Д16	12—80	Горячекатанный неплакированный	АМТУ 347—61	АМТУ 347—61
	Алюминиевый сплав АМцС	12—80	Горячекатанный	СТУ 13-8-64	СТУ 13-8-64
Полоса	Ст. 3	4—60	Горячекатанный	535—58	103—57*

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортмент
Полоса	Сталь 12X18H9T, 12X18H10T	3—75	Горячекаленный и кованый	5949—75	4405—75
	БрБ2	0,05—6	Холоднокатаный нагартованный	1789—70	1789—70
	Латунь Л63	0,4—22	Холоднокатаный	931—70	931—70
	Сталь 10	0,05—3,6	Холоднокатаный	503—71*	503—71*
	Сталь 20, 45	0,1—3	Холоднокатаный нагартованный	2284—69*	2284—69*
	Сталь 1X13, 2X13, 12X18H9T	0,1—2	Холоднокатаный	4986—70*	4086—68*
Лента	Медь М1, М2, М3	0,05—2	Холоднокатаный	1173—70*	1173—70*
	Латунь Л63	0,05—2	Холоднокатаный	2208—70	2208—70
	Бронза БрБ2	0,05—6	Холоднокатаный	1789—70	1789—70

Наименование полуфабрикатов	Марка материала	Характерный размер сечения, мм	Способ изготовления	ГОСТ или ТУ на полуфабрикат	ГОСТ на сортмент
Лента	Алюминиевые сплавы АД, АД1	0,3—2,0	Холоднокатаный	13722—68*	13726—68**
	Ст. 3, 10, 20, 45	25—800	Горячекатаный	8731—74	8732—70*
		1—200	Холоднотянутый	8733—74	8734—58*
	Сталь 1Х13, 12Х18Н10Т	57—325	Горячекатаный	9940—72*	9940—72*
		5—120	Холоднотянутый	9941—72*	9941—72*
Труба	Медь М1, М2	3—360	Тянутый и холоднокатаный	617—72	617—72
	Латунь Л63	3—100	Тянутый	494—69	494—69
	Алюминиевые сплавы АД, АД1	6—120	Холоднотянутый Холоднокатаный	18475—73**	18475—73**

## СВОЙСТВА СТЕКОЛ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Марка стекла	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> , (при 20°—200 °С)	Температура размягчения, °С	Температура отжига, °С	Применение стекла	Слаиваемый металл	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> , (при 20°—200 °С)	Тип спая	Детали из металла	Применение спаяв
<i>Легкоплавкие (платиновые)</i>									
Баритовое стекло С-90-1	90 ± 2	550 ± 10	400—500	Колбы, трубки, штабки	Платина Х18МТФ Медь М0	90,7 110 ± 2 165	Согласованный Несогласованный	Проволока диаметром до 1 мм Трубка, проволока	Тоководы в стеклянные физические приборы, переходные детали от стекла к металлу
<i>Тугоплавкие (молибденовые)</i>									
Боросиликатное стекло С-49-1	49 ± 1	580 ± 10	410—530	Колбы, смотровые окна	Ковар	47 ± 2	Согласованный	Проволока, трубка	Тоководы для физических приборов
Боросиликатное стекло С-48-1	48 ± 1	555 ± 10	360—500	Колбы, смотровые окна	Никель Молибден	130 ± 2 55 ± 2	Несогласованный Согласованный	Проволока диаметром до 1 мм Проволока	Тоководы для физических приборов Тоководы

Продолжение									
Марка стекла	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> , (при 20°—200 °С)	Температура размягчения, °С	Температура отжига, °С	Применение стекла	Слаиваемый металл	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> , (при 20°—200 °С)	Тип спая	Детали из металла	Применение, сплав
Боросиликатное стекло С-47-1	$47 \pm 1$	$590 \pm 10$	420—550	Колбы, трубки, смотровые окна	Ковар	$47 \pm 2$	Согласованный	Проволока, трубки	Переходные детали от стекла к металлу
					Никель	$130 \pm 2$	Несогласованный	Проволока диаметром до 1 мм	Тоководы для физических приборов
					Молибден	$55 \pm 2$	Согласованный	Пруток, лента	Переходные детали
					Ковар	$47 \pm 2$		Проволока, трубка	
					Никель	$130 \pm 2$	Несогласованный	Проволока диаметром до 1 мм	Маломощные тоководы

*Тугоплавкие (вольфрамовые)*

Боросиликатное стекло С-40-1	$40 \pm 1,5$	$620 \pm 10$	390—520	Колбы	Молибден	$55 \pm 2$		Пруток, лента	Тоководы
					Вольфрам	44, 4	Согласованный	Проволока, прутки	
Боросиликатное стекло	$39 \pm 10$	$640 \pm 10$	410—540	Колбы, переходные стекла к	Н30К.ЗД	41		Проволока	Тоководы
					Вольфрам	44, 4	Согласованный	Проволока, лента	



(Нонекс) С-39

Блomosили-  
катное стекло  
С-37-1

Жаростой-  
кое стекло  
(пирекс П-15)

Кварцевое  
прозрачное  
стекло С-6-1

пирексу и кварцу	Молибден Никель	55 ± 2 130 ± 2	Несогла- сованный	Проволока	Токовводы
Колбы	Вольфрам	44, 4	Согласо- ванный	Проволока	Токовводы
Колбы, трубки	Вольфрам Молибден	44, 4 55 ± 2	Согласо- ванный	Проволока	Токовводы
То же	Молибден	55 ± 2		Фольга тол- щиной до 0,2 мм	Токовводы
	Вольфрам	44, 4	Несогла- сованный	Проволока диаметром до 0,5 мм	Токовводы

Приложение 3

**МЕТАЛЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СПАЕВ СО СТЕКЛОМ**

Металл	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup>	Температура плавления ме- талла, °С	Марка стекла	Рабочая тем- пература спаев (не выше) °С	Вид спая	Металлическая деталь	Цвет качественного спая
Платина	90,7	1771	Все, кроме П-15 и кварца	400	Согласован- ный	Проволока диаметром до 1 мм	Блестящий металличе- ский

Металл	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup>	Температура плавления, °С	Марка стекла	Рабочая температура спая (не выше) °С	Вид спая	Металлическая деталь	Цвет качественного спая
Медь	165	1083	С-90-1, С-87, П-15	300	Согласованный	Проволока диаметром до 0,5 мм, трубка диаметром до 60 мм, диск толщиной 0,25—0,35 мм	От ярко-красного до розово-желтого
Ковар	47 ± 2	1450	С-49-1, С-48-1, С-47-1	500	»	Проволока диаметром до 1 мм, трубка диаметром до 80 мм, диск толщиной 0,5—3 мм	Серый
Молибден	55 ± 2	2660	С-49-1, С-48-1, С-47-1 кварц	500	»	Проволока диаметром до 1 мм, прутки диаметром до 15 мм, лента толщиной до 0,5 мм, фольга 0,1—0,2 мм	От серо-коричневого до шоколадного
Вольфрам	44,4	3400	С-40-1, С-39-1, С-37-1, П-15, кварц	500	»	Проволока диаметром до 1 мм, прутки диаметром до 12 мм, лента толщиной до 0,5 мм	От красно-коричневого до соломенно-желтого
Никель	130 ± 2	1452	Все, кроме кварцевого	300	Несоответствующий	Проволока диаметром до 0,5 мм, трубка диаметром до 8 мм	От молочно-белого до зеленого

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИКИ

Наименование керамики	Марка керамики	Температура спекания, °С	$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> (20—200 °С)	$\lambda \cdot 10^5$ , ккал/м <sup>2</sup> ·ч·град	Материал металлизации	Металл спая	Материал припоя	Рабочая температура, °С, не выше	Примечание
Ультрафарфор	УФ53К	1360 ± 10	50—65 (при 20—800 °С)		Оксиды Cu, Ni, Fe	Ковар, никель	ПСр-45 ПСр-50	400	Металлокерамические изоляторы
	№ 102	1340 ± 10	55—70 (при 20—900 °С)	47	Органическая связка с порошком Мо-Мп	Ковар, медь, никель	Медь, серебро	500	То же
Глиноземистая	К-1	1330 ± 10	74 (при 20—900 °С)	47					
	22Х	1620 ± 10	65—80	90	Паста МП-9			500	Ножки ламп, тоководы, металллокерамические изоляторы
Высокоглиноземистая	22ХС	1570 ± 10	60—76	115	Органическая связка с порошком Мо-Мп	Ковар, медь, никель	Медь, ПСр-72, ПСр-50, ПСр-45	400	
	ВГ-14 К-4, ЛК-4	1650 ± 10 1330 ± 20	62—74 70—75 (при 20—700 °С)	130 173	Паста МП-6 Органическая связка с порошком Мо-Fe	Ковар, никель, железо	ПСр-45 ПСр-50 ПСр-72	400 400	Корпусы керамических ламп, металллокерамические изоляторы
Стеатитовая	Б, ЛБ	1320 ± 20	80—90 (при 20—600 °С)	216	Без металлизации	Титан, ВТ1Д-1, ИМП-1А	Медь, никель, ПСр-72	500	Металлокерамические изоляторы
Форстеритовая	ЛФ-11	1350 ± 20	90—100 (при 20—600 °С)	—					

## НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

Наименование величин	Старые единицы измерения	Единицы измерения в системе СИ	Перевод единиц измерения
Давление	мм рт. ст.	Па или Н/м <sup>2</sup>	1 Па — Н/м <sup>2</sup> = = 7,5 · 10 <sup>-3</sup> мм. рт. ст.
Концентрация (удельное газо-содержание)	см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup> или см <sup>3</sup> /100 г	м <sup>3</sup> · Па/м <sup>3</sup>	1 м <sup>3</sup> Па/м <sup>3</sup> = 1 · 10 <sup>-5</sup> см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup> = см <sup>3</sup> /100 г
Коэффициент диффузии	см <sup>2</sup> /с	м <sup>2</sup> /с	1 м <sup>2</sup> /с = 10 <sup>4</sup> · см <sup>2</sup> /с
Поток, производительность	л · мм рт. ст./с или л · мкм рт. ст./с	м <sup>3</sup> · Па/с	1 м <sup>3</sup> Па/с = 1 Вт 7,5 л · мм. рт. ст./с = = 7,5 · 10 <sup>3</sup> л · мкм рт. ст./с
Проводимость или быстрота откачки	л/с	м <sup>3</sup> /с	1 м <sup>3</sup> /с = 10 <sup>3</sup> л/с
Энергия активации	кал/моль	Дж/кмоль	1 Дж/кмоль = = 4,1868 · 10 <sup>3</sup> кал/моль

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арефьев А. В.** Уплотнение индием разъемных соединений сверхвысоковакуумных систем. — ПТЭ, 1966, № 4, с. 138—140.
2. **Балицкий А. В.** Технология изготовления вакуумной аппаратуры. М., — «Энергия», 1974 г., 312 с.
3. **Балицкий А. В., Филатовский Л. А., Шувалов А. С.** Крупногабаритные высоковакуумные соединения. — ПТЭ, 1971, № 1, с. 175—176.
4. **Белкин А. М., Егоров В. Ф., Моисеенков А. Н.** и др. Расчет и конструирование малогабаритных электромагнитных вакуумных клапанов. — «Электронная техника, сер. 4», 1972, вып. 2, с. 68—69.
5. **Гусев Г. А.** Системы газонаполнения и их элементы. — «Электронная техника, сер. 10», 1970, вып. 8(40), с. 23—42.
6. **Данилов К. Д.** Сверхвысоковакуумный прогреваемый ввод. — ПТЭ, 1972, № 2, с. 151—153.
7. **Данилов К. Д.** Сверхвысоковакуумный ввод поступательного движения. — «Электронная техника, сер. 1», 1973, вып. 4, с. 112—114.
8. **Данилов К. Д., Алексеев Г. А., Ермаков Н. Н.** и др. Вакуумный затвор. — «Электронная техника, сер. 7», 1973, вып. 2, с. 68—69.
9. **Двойченко В. Д., Взацкая Е. И.** Сверхвысоковакуумный вентиль с индиевым уплотнением. — ПТЭ, 1971, № 2, с. 190—191.
10. **Дэшман С.** Научные основы вакуумной техники. М., «Мир», 1964, 715 с.
11. **Киршенштейн Н. И., Николаев Е. А.** Прогреваемые вакуумные разборные соединения с резиновыми уплотнителями. — «Электронная техника, сер. 1», 1968, вып. 3, с. 149—156.
12. **Коль В.** Технология материалов для электровакуумных приборов. М., Госэнергоиздат, 1957, 448 с.

13. **Конюшков Г. В.** Механизм для передачи больших перемещений в высоковакуумный объем. — «Обмен опытом в электронной промышленности», 1968, вып. 1, с. 39—40.
14. **Королев, Б. И., Кузнецов В. И., Пипко А. И.** и др. Основы вакуумной техники. М., «Энергия», 1975, 414 с.
15. **Лебединский М. А.** Электровакуумные материалы. М.—Л., «Энергия», 1966, 232 с.
16. **Любимов М. Л.** Спаи металла со стеклом. М., «Энергия», 1968, 280 с.
17. **Медников М. И.** Вводы движения в вакууме. М., «Машиностроение», 1974, 184 с.
18. **Николаев Б. В., Кичаев П. М.** Планетарные механизмы для передачи движения в герметизированное пространство. — «Вестник машиностроения». 1968, № 5, с. 14—16.
19. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А.** Оборудование для откачки вакуумных приборов. М., «Энергия», 1965, 464 с.
20. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А.** Конструирование и расчет вакуумных систем. М., «Энергия», 1970, 504 с.
21. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** Устройства для передачи движения в вакуумный объем. — ПТЭ, № 6, 1965, с. 12—18.
22. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Гаврилов А. А.** и др. Механизмы для перемещения деталей в вакуумных и водородных электрических печах сопотвления. — «Электротермия», 1965, № 45, с. 17—21.
23. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** Элементы соединения вакуумных трубопроводов. — «Обмен опытом в электронной промышленности», 1967, № 5, с. 30—33.
24. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** Вакуумная задвижка. — ПТЭ, 1965, № 3, с. 230—232.
25. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Трубников Ю. Ф.** Откачные ячейки для электровакуумных приборов. — «Электронная техника, сер. 10», 1969, вып. 7(32), с. 47—53.
26. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Семенова Ю. А.** и др. Коммутирующие элементы многотрубной централизованной форвакуумной системы. — «Обмен опытом в радиопромышленности», 1967, вып. 4, с. 38—42.
27. **Розанов Л. Н.** Вакуумные машины и установки. Л., «Энергия», 1975, 336 с.
28. **Черепнин Н. В.** Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М., «Советское радио», 1966, 350 с.
29. **Убогов В. П., Берлин А. Э.** Новая высоковакуумная и сверхвысоковакуумная арматура для серий откачных агрегатов. — «Обмен опытом в электронной промышленности», 1969, вып. 1, с. 104—113.
30. **Эспе В.** Технология электровакуумных материалов. т. 1, М., Госэнергиздат, 1960, 613 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение . . . . .	3
<b>Глава 1. Конструкционные материалы . . . . .</b>	<b>5</b>
1. Основные требования, предъявляемые к конструкционным материалам . . . . .	5
2. Металлы и их сплавы . . . . .	7
3. Неметаллические материалы . . . . .	10
<b>Глава 2. Элементы вакуумных систем . . . . .</b>	<b>14</b>
1. Разборные вакуумные соединения . . . . .	14
2. Элементы соединений вакуумных трубопроводов . . . . .	20
3. Устройства для передачи движения в вакуумный объем (вводы движения) . . . . .	24
4. Электрические вакуумные вводы . . . . .	29
5. Смотровые окна . . . . .	31
<b>Глава 3. Коммутационная аппаратура вакуумных систем . . . . .</b>	<b>32</b>
1. Основные требования, предъявляемые к коммутационной аппаратуре . . . . .	32
2. Коммутационная аппаратура непрогреваемых вакуумных систем . . . . .	33
3. Коммутационная аппаратура для сверхвысоковакуумных систем . . . . .	41
4. Устройства для напуска газов в вакуумные системы . . . . .	46
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>60</b>

---

Редактор издательства *Н. В. Корженевская*  
Технический редактор *В. И. Орешкина*

Корректор *Л. Е. Хохлова*

Сдано в набор 2/VI 1976 г.

Подписано к печати 6/IX 1976 г.

T—14871

Формат 60×90<sup>1/16</sup>

Бумага № 2

Печ. л. 4,0

Уч.-изд. л. 4,02

Бесплатно

Изд. зак. 4351

Издательство «Машиностроение», 107885 Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Хохловский пер., 7. Тип. зак. 873