



Институт промышленной безопасности,  
охраны труда и социального партнерства

# ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК

Учебное пособие



**ПРОМЫШЛЕННАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ**



ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ,  
ОХРАНЫ ТРУДА И СОЦИАЛЬНОГО ПАРТНЕРСТВА»**

---

# **Промышленная безопасность компрессорных установок**

*Учебное пособие*

Санкт-Петербург  
ТД «ЦОТ»  
2018

УДК 621.51.614.8  
ББК 31.76н  
С50

Разработчики:  
*П.Ю. Смирнов, А.В. Сергеев, А.А. Артемов*

**С50 Промышленная безопасность компрессорных установок.  
Учебное пособие.**— СПб.: ТД «ЦОТ», 2018. – 128 с.

ISBN 978-5-326-00186-3

В настоящем издании содержатся требования нормативных документов к конструкции, проектированию, эксплуатации и ремонту компрессорных установок для сжатия воздуха и инертных газов, приведены сведения об устройстве оборудования компрессорных станций, основные характеристики рабочих сред компрессорных установок. Книга является учебным пособием для подготовки к аттестации на знание требований промышленной безопасности к проектированию, изготовлению, монтажу, эксплуатации, ремонту компрессорных установок и предназначена для использования в учебном процессе при проведении предаттестационной подготовки. Для самостоятельной подготовки и самопроверки в приложении приведены контрольные вопросы.

**УДК 621.51.614.8  
ББК 31.76н**

ISBN 978-5-326-00186-3

© Торговый дом  
«Центр охраны труда»,  
оформление, 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Введение</b> .....	3
Назначение и область применения «Правил устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов» .....	3
Основные термины и определения .....	4
Классификация компрессоров .....	4
<b>Принцип действия, устройство и характеристики компрессоров</b> .....	8
Поршневые компрессоры .....	8
Рабочий процесс поршневого компрессора .....	8
Многоступенчатое сжатие в компрессорах .....	12
Силы инерции, действующие в поршневом компрессоре .....	15
Коэффициент производительности (подачи) компрессора .....	15
Конструктивные схемы и устройство поршневых компрессорных установок .....	15
Ротационные компрессоры .....	22
Винтовые компрессоры .....	24
<b>Принципиальные схемы компрессорных станций</b> .....	30
Компрессорная станция с поршневыми компрессорами .....	30
Автоматизированная компрессорная станция с винтовым компрессором .....	32

---

<b>Характеристика сети потребителя</b> .....	39
Требования к воздуху .....	40
<b>Оборудование газовоздушных трактов компрессорных установок и станций</b> .....	42
Устройства для очистки всасываемого воздуха.....	42
Влагомаслоотделители .....	43
Концевые холодильники.....	44
Воздухосборники.....	44
<b>Смазка механизмов движения, цилиндров и сальников компрессоров</b> .....	47
Системы смазки.....	47
Требования к компрессорному маслу .....	48
Техническое обслуживание систем смазки.....	49
<b>Системы охлаждения компрессоров</b> .....	51
Виды систем охлаждения .....	51
Контроль циркуляции воды .....	51
<b>Трубопроводы и арматура</b> .....	53
Общая характеристика трубопроводов компрессорных станций... 53	
Арматура трубопроводов компрессорных станций .....	57
Требования к трубопроводной арматуре компрессорных станций.....	60
<b>Контрольно-измерительные приборы</b> .....	66
Требования по оснащению компрессорных станций КИП .....	66
Требования к манометрам.....	67
<b>Система противоаварийной защиты компрессорных установок</b> ....	69
Требования к компоновке оборудования компрессорных станций.....	71
<b>Обслуживание и ремонт компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов</b> .....	73
Требования к обслуживающему персоналу.....	73
Причины аварий компрессорных установок.....	76
Функции и права ответственного за безопасную эксплуатацию компрессорных установок.....	77

---

Требования к инструкции по обслуживанию компрессорной установки.....	78
Меры безопасности при обслуживании компрессорной установки.....	79
Техническая документация компрессорной установки.....	80
Техническое освидетельствование и диагностирование оборудования компрессорных станций.....	82
<b>Требования «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 03-576–03) к сосудам компрессорных станций.....</b>	<b>83</b>
Общие требования.....	83
Требования к организации эксплуатации сосудов.....	85
Схемы включения сосудов.....	85
Требования к обслуживающему персоналу.....	85
Организация надзора за сосудами на предприятии.....	85
Функции и права ответственного за осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением.....	86
Функции и права ответственного за исправное состояние и безопасное действие сосудов.....	87
Регистрация сосудов.....	89
Разрешение на ввод сосудов в эксплуатацию.....	89
Техническое освидетельствование сосудов.....	90
Техническое диагностирование.....	93
Условия перевода сосудов на пониженное давление.....	93
Случаи аварийных остановок сосудов.....	94
<b>Требования к компрессорным установкам, работающим на взрывоопасных и вредных газах.....</b>	<b>95</b>
<b>Литература.....</b>	<b>97</b>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Контрольные вопросы.....</i>	<i>100</i>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Условные обозначения оборудования и трубопроводов компрессорных станций на схемах.....</i>	<i>103</i>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Классификация вредных веществ по ГОСТ 12.1.007–76.....</i>	<i>105</i>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Соотношения между единицами давления и температуры.....</i>	<i>107</i>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Компрессоры. Справочный раздел.....</i>	<i>108</i>

# ВВЕДЕНИЕ

---

## **Назначение и область применения «Правил устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов»**

Основным нормативно-правовым документом по компрессорным установкам являются «Правила устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов» (ПБ 03-581–03)<sup>1</sup>, утвержденные постановлением Госгортехнадзора России<sup>2</sup> от 5 июня 2003 г. № 60 (зарегистрировано в Минюсте России 18 июня 2003 г., рег. № 4702).

Правила предназначены для применения при проектировании, монтаже, эксплуатации, ремонте, реконструкции, консервации и ликвидации компрессорных установок.

Правила *распространяются* на проектируемые, вновь изготавливаемые и реконструируемые стационарные поршневые, ротационные и винтовые маслозаполненные и сухие компрессорные установки, а также на действующие компрессорные установки мощностью от 14 кВт и выше,

---

<sup>1</sup> Далее – Правила.

<sup>2</sup> В 2004 г. Госгортехнадзор России преобразован в Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

---

воздуховоды и газопроводы, работающие на воздухе и инертных газах<sup>3</sup> с давлением от 0,2 до 40 МПа (от 2 до 400 кгс/см<sup>2</sup>).

Правила *не распространяются* на холодильные и кислородные компрессорные установки, а также на компрессорные установки, работающие на взрывоопасных, токсичных, радиоактивных газах и газах ацетиленового ряда.

## Основные термины и определения

В правилах не приведены термины и определения понятий, относящиеся к компрессорным установкам, поэтому в настоящем пособии, как правило, используются термины по ГОСТ 28567–90 «Компрессоры. Термины и определения». Ниже приведены основные понятия в соответствии с указанным стандартом:

*Компрессором* называется энергетическая машина или устройство для повышения давления и перемещения газов или их смесей.

Компрессор совместно с приводом (электродвигателем, двигателем внутреннего сгорания, паровой или газовой турбиной) образует *компрессорный агрегат*.

Компрессорный агрегат с дополнительным оборудованием, обеспечивающим его работу, называется *компрессорной установкой*.

Одна или несколько компрессорных установок вместе со зданием, в котором они размещены, с системами управления и необходимым вспомогательным оборудованием называются *стационарной компрессорной станцией*.

## Классификация компрессоров

**По принципу действия.** Согласно ГОСТ 28567–90 компрессоры подразделяются на компрессоры объемного действия и компрессоры динамического действия (рис. 1).

В компрессорах объемного действия рабочий процесс осуществляется в результате циклического изменения объемов рабочих камер. К таким компрессорам относятся поршневые и роторные компрессоры.

---

<sup>3</sup> К инертным газам относятся гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, радон. На практике к инертным газам причисляют также азот и углекислый газ. Инертные газы бесцветны, неядовиты, не способны к горению, не имеют запаха. Небольшое их количество содержится в атмосферном воздухе. На живые организмы инертные газы оказывают удушющее действие.



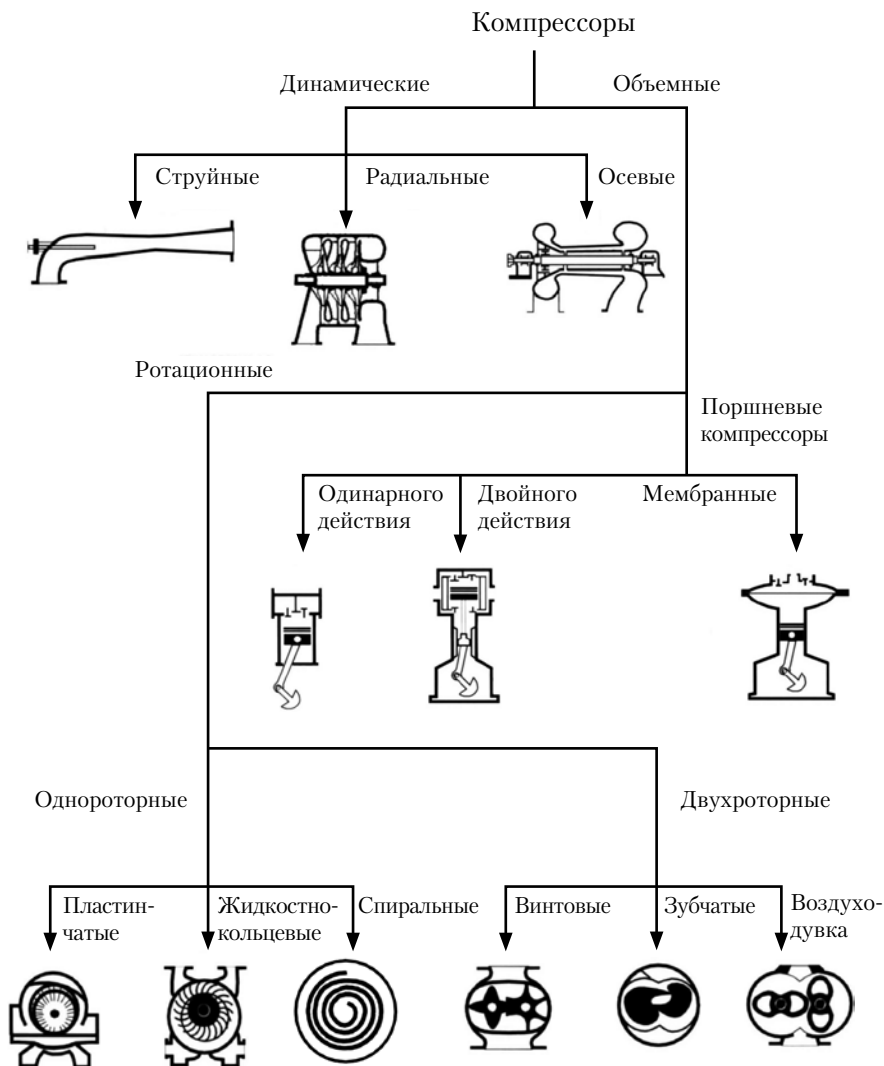


Рис. 1. Классификация компрессоров по принципу действия

В поршневых компрессорах изменение объема рабочих камер осуществляется поршнями, совершающими прямолинейное возвратно-поступательное движение. В роторных компрессорах изменение объемов рабочих камер происходит в результате вращения ротора (роторов). При увеличении объема камер газ поступает в камеры, а при уменьшении объема камер газ сжимается в них.

К компрессорам объемного типа относятся поршневые, ротационные и винтовые компрессоры.

В компрессорах динамического действия рабочий процесс осуществляется путем динамического воздействия на непрерывный поток сжимаемого газа. Например, в турбокомпрессорах динамическое воздействие на поток производят вращающиеся решетки лопаток, установленные на роторе. Механическая энергия лопаток расходуется вначале на образование потока газа, а затем на его сжатие. В струйных компрессорах динамическое воздействие на поток сжимаемого газа оказывает поток с большей удельной энергией.

**По давлению.** Согласно ГОСТ 28567–90 компрессоры по величине конечного давления (давления газа на выходе из компрессора) подразделяются на:

- компрессоры низкого давления (конечное давление ниже 1,5 МПа (15 кгс/см<sup>2</sup>);
- компрессоры среднего давления (конечное давление от 1,5 до 10 МПа (от 15 до 102 кгс/см<sup>2</sup>);
- компрессоры высокого давления (конечное давление от 10 до 100 МПа (от 102 до 1020 кгс/см<sup>2</sup>);
- компрессоры сверхвысокого давления (конечное давлением от 100 МПа (от 1020 кгс/см<sup>2</sup>) и выше).

**По производительности.** Производительность компрессора подразделяется на массовую и объемную. Массовая производительность характеризуется массовым расходом газа на выходе из компрессора в кг/с или кг/мин и не зависит от величины конечного давления.

Согласно ГОСТ 28567–90 объемная производительность измеряется объемным расходом газа на выходе из компрессора. ГОСТ допускает использовать в технической документации объемную производительность, приведенную к начальным условиям, характеризуемым давлением и температурой на входе в компрессор. По ГОСТ 2939–63 объем газов должен приводиться к следующим условиям: температура 20°С (293,15К); давление 760 мм рт. ст. (101 325 Н/м<sup>2</sup>); влажность 0. Объем газа, приведенный к этим условиям, обозначается  $V_{\text{н}}$ . Такие расчетные параметры более достоверны при сравнении компрессоров по производительности, поэтому при классификации компрессоров

используется объемная производительность, приведенная к начальным условиям.

ГОСТ 28567–90 не приводит классификации компрессоров по этому признаку. На практике в зависимости от производительности компрессоры условно подразделяют на:

- компрессоры малой производительности (до  $10 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $0,17 \text{ м}^3/\text{с}$ ));
  - компрессоры средней производительности (выше  $10$  до  $100 \text{ м}^3/\text{мин}$  (выше  $0,17$  до  $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ ));
  - компрессоры большой производительности (более  $100 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ )).
-

# ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, УСТРОЙСТВО И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРОВ

---

## Поршневые компрессоры

Поршневым называется компрессор объемного действия, в котором изменение объемов рабочих камер осуществляется поршнями, совершающими прямолинейное возвратно-поступательное движение. Компрессоры этого типа часто встречаются на практике и отличаются многообразием по конструктивному исполнению (рис. 2). Их различают по устройству кривошипно-шатунного механизма и расположению цилиндров, числу ступеней сжатия. Поршневые компрессоры широко применяются в машиностроении, строительстве, химической промышленности и в других отраслях хозяйства.

### *Рабочий процесс поршневого компрессора*

Рассмотрим процесс<sup>4</sup> сжатия газа (воздуха) в одноступенчатом<sup>5</sup> поршневом компрессоре.

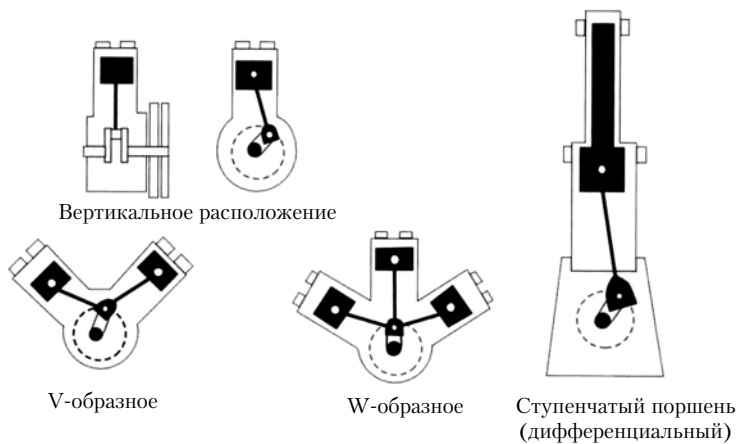
---

<sup>4</sup> *Рабочий процесс* компрессора представляет собой совокупность физических явлений, сопровождающих повышение давления и перемещение газа в компрессоре и обеспечивающих передачу газу механической энергии двигателя.

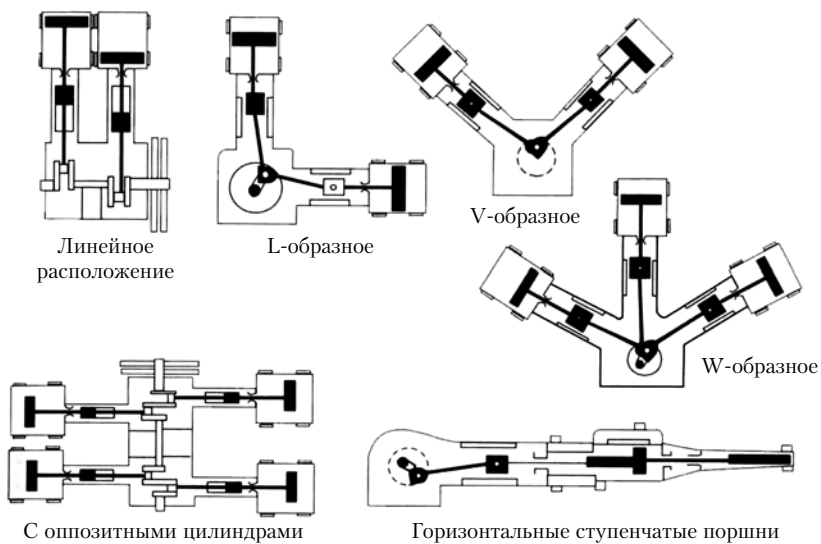
<sup>5</sup> *Ступенью компрессора* называется совокупность элементов компрессора, обеспечивающих повышение давления и перемещение газа в определенном интервале давлений внутри заданного диапазона.

---

*Компрессор одинарного действия*



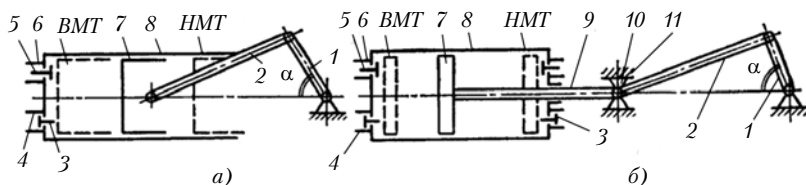
*Компрессор двойного действия (крейцкопфный)*



**Рис. 2.** Классификация поршневых компрессоров

Одноступенчатый компрессор (рис. 3а) представляет собой цилиндр с охлаждающей рубашкой, внутри которого движется поршень. К цилиндру компрессора подведены всасывающий и нагнетательный патрубки с впускными и нагнетательными клапанами, через которые сжатый воздух (газ) подается потребителю. Поршень имеет два крайних положения, называемых верхней и нижней мертвыми точками (ВМТ и НМТ). Расстояние между этими положениями, умноженное на площадь поршня, называется *рабочим объемом* ( $V_h$ ) цилиндра компрессора. При каждом ходе поршень описывает рабочий объем цилиндра. Во избежание столкновения поршня с крышкой цилиндра в ВМТ над поршнем остается минимально возможный зазор, объем которого  $V_0$  называется *мертвым (вредным) пространством*. Относительная величина объема мертвого пространства не превышает 5% от  $V_h$ . Поршень получает движение от вала через шатун (бескрейцкопфные компрессоры) или через шатун и шток (рис. 3), соединенные между собой особым устройством – крейцкопфом (крейцкопфные компрессоры)<sup>6</sup>.

В одноступенчатых поршневых компрессорах всасываемый и сжимаемый воздух (газ) контактирует с одной верхней поверхностью поршня. На всасывание газа и его сжатие затрачивается по одному ходу поршня. Недостатком такого компрессора является то, что полезная работа совершается только при движении поршня в одном



**Рис. 3.** Конструктивные схемы компрессоров:

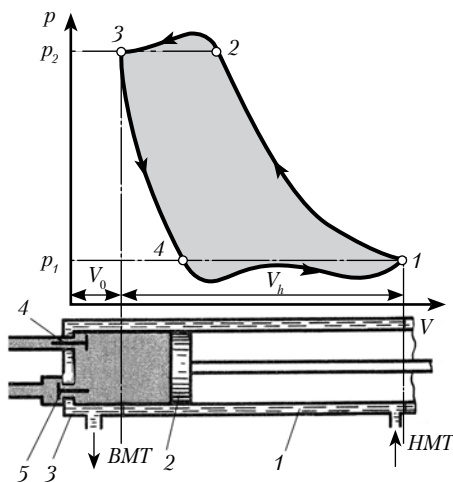
а – бескрейцкопфного; б – крейцкопфного:

- 1 – коленчатый вал; 2 – шатун; 3 и 5 – клапаны нагнетательный и всасывающий;  
4 и 6 – нагнетательный и всасывающий патрубки; 7 – поршень; 8 – цилиндр;  
9 – шток; 10 – крейцкопф; 11 – направляющие крейцкопфа

<sup>6</sup> *Крейцкопф* (нем. Kreuzkopf) – ползун – деталь кривошипно-ползунного механизма, совершающая возвратно-поступательное движение по неподвижному направляющим. Крейцкопф предназначен для соединения поршня и шатуна в крейцкопфном кривошипно-шатунном механизме. При таком сочленении поршень жестко связан с крейцкопфом с помощью штока. Это позволяет разгрузить поршень от «нормальной» силы, так как ее действие переносится на крейцкопф. Такая схема соединения позволяет создать вторую рабочую полость в цилиндре под поршнем.

направлении. Более производительной и экономичной является конструкция компрессора *двойного действия* (рис. 3б). В этих компрессорах в одном цилиндре одновременно производится сжатие газа (в объеме над поршнем) и всасывание газа (в объеме под поршнем). При движении поршня вправо в левой части цилиндра создается разрежение. Воздух (газ) через левый всасывающий клапан поступает в цилиндр. Одновременно в правой части цилиндра происходит сжатие воздуха (газа), вошедшего в рабочее пространство в предыдущем цикле, и выталкивание его через правый нагнетательный клапан в нагнетательный патрубок. При движении поршня влево всасывание происходит через правый всасывающий клапан, а выталкивание сжатого газа – через левый нагнетательный клапан. Таким образом, в компрессоре двойного действия рабочими являются обе стороны поршня.

При движении поршня от НМТ влево всасывающий клапан закрывается и воздух, имеющийся в цилиндре, сжимается (рис. 4). В точке 2 давление в цилиндре компрессора оказывается равным давлению воздуха в нагнетательном патрубке. Однако затем давление в цилиндре повышается дополнительно, что обеспечивает открытие клапана и выталкивание воздуха в нагнетательный патрубок (в воздушный ресивер с давлением  $p_2$ ). По мере приближения поршня к крайнему левому положению скорость его движения уменьшается, перепад давлений между цилиндром и расположенным за компрессором ресивером (воздухосборником) также уменьшается, и при достижении поршнем ВМТ (точка 3) давления в цилиндре и ресивере сравниваются. При движении поршня в обратном направлении давление в цилиндре падает, клапан закрывается и воздух, сжатый в объеме  $V_0$  вредного пространства, расширяется (процесс 3–4). В точке 4 давление в цилиндре оказывает-



**Рис. 4.** Индикаторная диаграмма и схема одноступенчатого поршневого компрессора: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – охлаждающая рубашка; 4 – всасывающий клапан; 5 – нагнетательный клапан

ся равным давлением  $p_1$  окружающей среды, после чего в цилиндре образуется некоторое разрежение, обеспечивающее открытие всасывающего клапана и всасывание воздуха в цилиндр из окружающей среды. В точке 1 всасывающий клапан закрывается, и при обратном движении поршня сжимается новая порция воздуха.

Изменение давления газа в цилиндре при движении поршня показывает индикаторная диаграмма компрессора (рис. 4). Она отражает ход следующих процессов:

1–2 – сжатие газа поршнем в цилиндре при движении поршня от НМТ к ВМТ;

2–3 – нагнетание сжатого до давления  $p_2$  газа из цилиндра в нагнетательный патрубок;

3–4 – расширение сжатого газа, оставшегося в мертвом объеме  $V_0$ , до давления на входе в цилиндр  $p_1$  и далее до давления, при котором открывается всасывающий клапан;

4–1 – всасывание газа в цилиндр при движении поршня от ВМТ к НМТ.

При сжатии газа (воздуха) его температура повышается. Сжатие горячего газа требует больших затрат энергии и сопряжено с опасностью ухудшения смазки цилиндров. Поэтому цилиндры охлаждаются водой, которая прокачивается через водяную рубашку (полость), окружающую цилиндр. Применяется также и воздушное охлаждение компрессорных цилиндров.

### **Многоступенчатое сжатие в компрессорах**

Компрессоры классифицируются по числу цилиндров и числу ступеней сжатия. При сжатии воздуха (газа) в одном цилиндре (одной ступени) температура воздуха (газа) непрерывно растет. При достижении определенного значения, близкого к значению температуры вспышки паров масла (200–240°С), начинается разложение смазочных масел, которые теряют эксплуатационные качества, образуют нагар, что может привести к воспламенению и взрыву. Во избежание взрыва в компрессорах температура сжатого воздуха (газа) должна быть ниже температуры вспышки на 20–50°С. По соображениям безопасности и надежности работы компрессоров одноступенчатое сжатие воздуха (газа) производится, как правило, до давления не более 0,8 МПа.

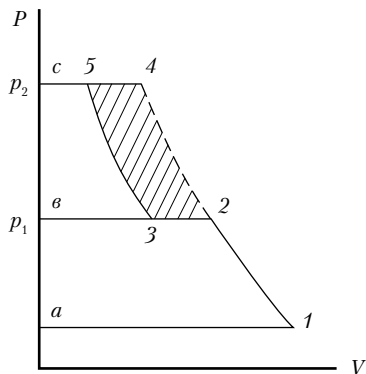
Последовательное сжатие воздуха (газа) в нескольких ступенях (цилиндрах) обусловлено необходимостью ограничить температуру сжимаемого воздуха (газа). Воздух (газ) после сжатия в цилиндре первой ступени с температурой нагнетания 150–200°С (в зависимости от



свойств газа) поступает в межступенчатый охладитель, где охлаждается до температуры всасывания в цилиндр второй ступени, и так далее до требуемого конечного давления. Отношение конечного давления воздуха (газа) в компрессоре (секции, ступени) к начальному называют *отношением давлений*<sup>7</sup> (обычно от 1:2 до 1:4).

Многоступенчатые компрессоры (до 6–7 ступеней) позволяют получать воздух (газ) давлением до 40 МПа (400 кгс/см<sup>2</sup>) и более. После каждой ступени сжатый воздух (газ) охлаждается в межступенчатом холодильнике до температуры, близкой к температуре всасывания. На индикаторной диаграмме двухступенчатого компрессора (рис. 5) отрезок линии всасывания во вторую ступень 2–3 короче линии нагнетания первой ступени 2–в, так как в межступенчатом холодильнике воздух (газ) охлаждается и его объем становится меньше.

Конструкция двухступенчатого прямоугольного (L-образного) компрессора показана на рис. 6.



**Рис. 5.** Сравнение затрат работы при одноступенчатом и двухступенчатом сжатии газа в идеальном компрессоре:

двухступенчатый компрессор: а–1 – всасывание газа в цилиндре первой ступени;

1–2 – сжатие газа в цилиндре первой ступени до давления  $p_1$ ;

2–3 – нагнетание сжатого газа в холодильник при давлении  $p_1$ ;

в–3 – всасывание охлажденного газа в цилиндр второй ступени;

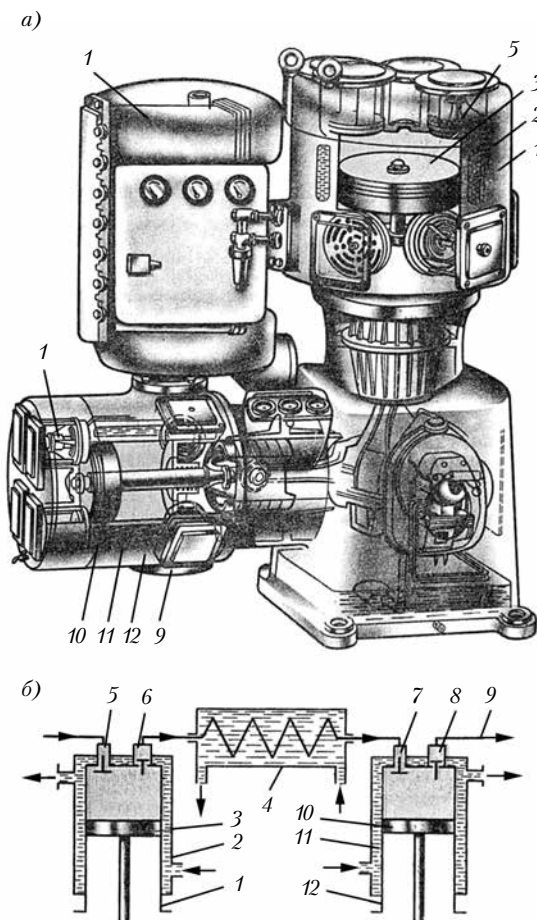
3–5 – сжатие газа в цилиндре второй ступени до конечного давления  $p_2$ ;

одноступенчатый компрессор: а–1 – всасывание газа;

1–2–4 – сжатие газа до конечного давления  $p_2$ ; 4–5–с – нагнетание сжатого газа.

Площадь 2–4–5–3–2 – работа, сэкономленная при двухступенчатом сжатии газа.

<sup>7</sup> ГОСТ 28567 не рекомендует называть это отношение давлений *степенью сжатия*.



**Рис. 6.** Прямоугольный (L-образный) двухступенчатый компрессор:

*а* – общий вид; *б* – схема;

- 1 – цилиндр первой ступени; 2, 11 – охлаждающая рубашка; 3, 10 – поршень;  
 4 – холодильник; 5, 7 – впускной клапан; 6, 8 – нагнетательный клапан;  
 9 – нагнетательный патрубок; 12 – цилиндр второй ступени

### **Силы инерции, действующие в поршневом компрессоре**

В поршневом компрессоре эти силы возникают вследствие возвратно-поступательного движения поршня и вращательного движения коленвала. Величина этих сил зависит от массы движущихся частей и скорости их движения. Наличие сил инерции вызывает дополнительные нагрузки на движущиеся части компрессора, которые могут привести к повышенному износу и разрушению трущихся деталей.

Для уравнивания сил инерции используют:

- противовесы, которые крепятся к коленвалу;
- рациональный выбор схем поршневых компрессоров (оппозитная схема);
- уравнивающие механизмы.

### **Коэффициент производительности (подачи) компрессора**

Производительность компрессора подразделяется на *теоретическую* и *действительную* (реальную). Действительная производительность в 1,25–1,6 раза меньше теоретической по следующим причинам:

- в идеальном компрессоре отсутствуют потери энергии на трение и преодоление гидравлических сопротивлений в клапанах;
- в реальном компрессоре всасывание газа начинается после расширения сжатого газа, оставшегося в мертвом объеме  $V_0$ , от давления  $p_2$  до давления  $p_1$  и ниже;
- стенки цилиндра компрессора имеют температуру несколько выше, чем температура всасываемого газа, несмотря на водяное охлаждение цилиндра. Поэтому газ в процессе всасывания подогревается, его объем возрастает, вследствие чего масса всасываемого газа уменьшается;
- компрессионные кольца поршня негерметичны, поэтому часть сжатого газа перетекает из полости нагнетания в полость всасывания и препятствует поступлению газа в цилиндр.

Отношение действительной производительности к теоретической называют *коэффициентом производительности* (подачи) компрессора. Его величина, как правило, составляет 0,6–0,8.

### **Конструктивные схемы и устройство поршневых компрессорных установок**

Основными техническими характеристиками поршневых компрессоров являются: тип, производительность (подача), давление

нагнетания, частота вращения вала, мощность, масса. Частично эти показатели указываются в маркировке компрессора. В качестве привода поршневых компрессоров используют электродвигатели или двигатели внутреннего сгорания. Производительность современных поршневых компрессоров достигает  $210 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $3,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и более.

По расположению осей цилиндров поршневые компрессоры подразделяются на вертикальные, прямоугольные (L-образные), V- (У)-образные, оппозитные, Ш- (W)-образные и др. (см. рис. 2). Наибольшую уравновешенность имеют компрессоры с оппозитными цилиндрами. Цилиндры расположены горизонтально, а их поршни совершают противоположно направленное движение.

Чаще других на практике применяются поршневые компрессоры трех типов: бескрейцкопфные с У-образным расположением цилиндров (маркируют ВУ и ГУ), крейцкопфные с прямоугольным расположением цилиндров (ВП и ГП) и крейцкопфные с горизонтальным оппозитным расположением цилиндров по обе стороны рамы (ВМ и ГМ)<sup>8</sup>. В маркировке компрессоров буквы В и Г указывают назначение компрессора (воздушный или газовый). Следующие буквы У, П или М определяют расположение цилиндров (У – У-образное, П – прямоугольное и М – горизонтальное оппозитное).

#### Примеры обозначения:

ВМ4–24/9 – компрессор воздушный крейцкопфный оппозитный, поршневое усилие базы (номер базы) 4 тс (40 кН), производительность  $24 \text{ м}^3/\text{мин}$ , абсолютное конечное давление  $9 \text{ кгс}/\text{см}^2$ .

ВУ1-2,4/13 – компрессор воздушный бескрейцкопфный с У-образным расположением цилиндра, поршневое усилие 1 тс (10 кН), производительность  $2,4 \text{ м}^3/\text{мин}$ , абсолютное конечное давление  $13 \text{ кгс}/\text{см}^2$ .

В прямоугольном компрессоре (рис. 6) цилиндр низкого давления расположен вертикально, а цилиндр высокого давления – горизонтально. Каждый цилиндр имеет свой крейцкопф.

Поршневая компрессорная установка включает в себя:

- кривошипно-шатунный и воздухораспределительный механизмы;
- системы смазки, охлаждения и регулирования производительности;
- всасывающий и нагнетательный коллекторы;
- предохранительное устройство;
- контрольно-измерительные приборы.

---

<sup>8</sup> Компрессоры стационарные воздушные поршневые двухступенчатые общего назначения с избыточным конечным давлением до  $0,78 \text{ МПа}$  ( $8 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ) в крейцкопфном исполнении и  $0,78, 1,18 \text{ МПа}$  ( $8, 12 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ) в бескрейцкопфном исполнении выпускались по ГОСТ 23680–79, остальные компрессоры – по техническим условиям (ТУ) заводов-изготовителей.

*Совокупность сборочных единиц*, объединяющая кривошипно-шатунные механизмы и включающая станину с коренными подшипниками и направляющими крейцкопфов, коленчатый вал, шатуны, крейцкопфы, элементы системы смазки кривошипно-шатунных механизмов, предназначенная для использования в различных компрессорах, составляет *базу компрессора*. Разных значений подачи и давления для компрессоров одной базы достигают путем присоединения соответствующих цилиндров и поршневых групп. Станина служит для размещения кривошипно-шатунного механизма и крепления цилиндров. Ее отливают из серого чугуна, реже выполняют сварной. Цилиндры для компрессоров с малой подачей изготавливают с воздушным охлаждением, со средней и большой подачей – с водяным. Цилиндры низкого и среднего давления получают литьем из высокопрочного чугуна, цилиндры высокого давления – из стальных отливок или поковок. Иногда цилиндры низкого и среднего давления выполняют составными (корпус, втулка, крышки с клапанными коробками).

*Поршни компрессора*. Тронковые (односторонние) поршни из алюминия и чугуна применяют в бескрейцкопфных компрессорах. Дисковые (двусторонние) поршни (алюминиевые или сварные из стали) используют в крейцкопфных компрессорах низкого давления. Для среднего давления применяют поршни литые из чугуна (полые или сплошные) и дисковые.

*Поршневые кольца* предназначены для устранения зазора между цилиндром и поршнем и отвода от него теплоты к стенкам цилиндра. Они имеют прямоугольное или квадратное сечение и в месте разреза – замок (прямой, косой или фасонный). При низком и среднем давлении газа используют кольца из чугуна. Для работы при высоком давлении кольца изготавливают из стали, бронзы, чугуна с баббитовой заливкой канавок, текстолита, капрона, кроме того, их выполняют комбинированными (например, из чугуна и бронзы). Для работы без смазывания цилиндра применяют кольца на фторопластовой основе.

*Кривошипно-шатунный механизм компрессора* служит для преобразования вращательного движения коленчатого вала в возвратно-поступательное движение поршней.

Кривошипно-шатунный механизм состоит из металлической коробки (картера), на которой установлены цилиндры с крышками, поршней с кольцами и поршневыми пальцами, шатунов и коленчатого вала с подшипниками и маховиком.

В У-образных компрессорах применяют бескрейцкопфный кривошипно-шатунный механизм. Коленчатый вал из ковкого чугуна

устанавливают на подшипниках качения. С каждым кривошипом соединяют по два шатуна.

*Механизм воздухораспределения.* Воздухораспределение в поршневых компрессорах осуществляется самодействующими клапанами. Клапаны называются самодействующими потому, что они открываются и закрываются автоматически: открываются от разности давлений до и после клапана, а закрываются под действием пружин (в ленточных клапанах роль пружин исполняет сама пластина). Например, всасывающий клапан открывается, когда давление газа в цилиндре становится меньше давления газа перед клапаном. На каждом цилиндре компрессора устанавливают всасывающие и нагнетательные клапаны. Конструктивное исполнение самодействующих клапанов разнообразно. Различные условия работы поршневых компрессоров потребовали создания различных типов клапанов, отличающихся конструктивным исполнением, материалом деталей и др.

Согласно ГОСТ 13529–93 выпускаются четыре типа клапанов:

К – кольцевые клапаны, в которых запорное устройство выполнено в виде кольца, расположенного перпендикулярно к направлению потока газа в клапане;

Д – дисковые клапаны, в которых запорное устройство выполнено в виде диска, снабженного дуговыми окнами для прохода газа, расположенного перпендикулярно к направлению потока газа в клапане;

П – прямоточные клапаны, в которых запорное устройство выполнено в виде пластины, расположенной параллельно направлению потока газа в клапане;

Л – ленточные клапаны, в которых запорное устройство выполнено в виде прямоугольной полосы или пластины с одним или несколькими параллельными окнами для прохода газа, расположенной перпендикулярно к потоку газа в клапане.

Вид клапана (всасывающий или нагнетательный) обозначается соответственно буквой В или Н.

Тип пружины обозначается следующими буквами:

Т – точечная пружина;

К – концентрическая пружина;

У – рессорная пружина.

После буквенного обозначения в марке клапана указываются посадочный диаметр (мм) и допускаемая разность давлений.

#### **Примеры обозначения:**

ВКТ 70–4,0 – клапан всасывающий кольцевой с точечными пружинами, посадочный диаметр 70 мм, допускаемая разность давлений на клапане до 4,0 МПа;

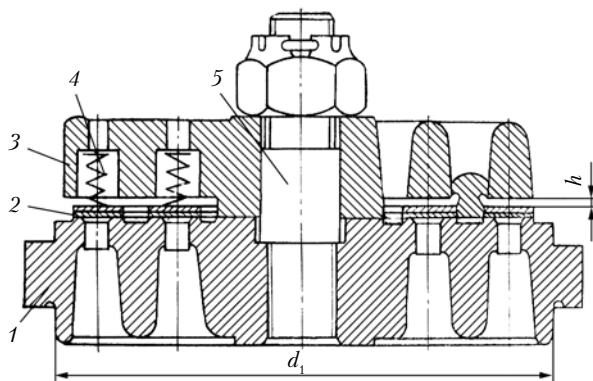
ПИК 220–1,6 – клапан прямоточный индивидуальный круглый, посадочный диаметр 220 мм, допускаемая разность давлений на клапане 1,6 МПа.

Основными элементами клапана являются седло с проходными каналами для воздуха (газа), замыкающие элементы (например, в виде пластин), перекрывающие каналы, пружинящие элементы и ограничитель подъема замыкающего элемента.

По форме замыкающего (запорного) элемента клапаны подразделяются на кольцевые (тарельчатые), полосовые, дисковые и др. Замыкающим элементом клапанов являются подвижные металлические пластины различной формы: тарельчатые, дисковые, полосовые.

*Кольцевые клапаны* (рис. 7а) имеют седло с концентрическими каналами для прохода газа и радиальными перемычками. Каждый канал перекрыт отдельной концентрической пластиной 2. Ограничитель хода пластин 3 скреплен с седлом центральной шпилькой 5 с конрончатой гайкой и шплинтом. В ограничителе хода пластины расположены пружины 4, прижимающие пластину к седлу. Для прохода газа, выходящего из седла и щели между пластиной и седлом, в ограничителе выполнены концентрические каналы, смещенные по радиусу относительно каналов в седле. В ограничителе или седле выполнены бурты для направления пластины относительно каналов седла при ее движении. С помощью фиксирующего штифта предотвращается проворачивание деталей относительно друг друга и обеспечивается правильное расположение седла относительно ограничителя подъема. Разность давлений на кольцевых клапанах в соответствии с ГОСТ 13529 не должна превышать 45 МПа.

*Дисковые клапаны* (рис. 7б) используются в поршневых компрессорах различного назначения, как правило, высокого давления.

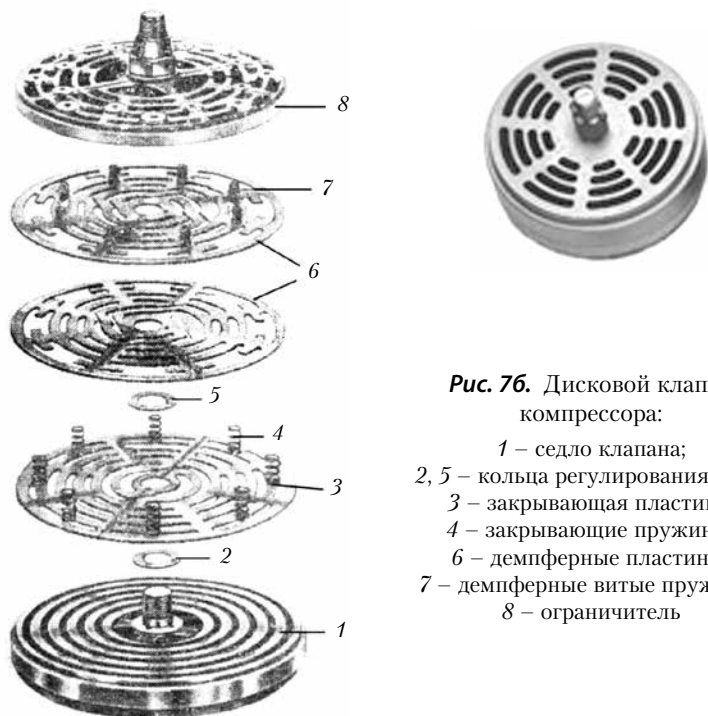


**Рис. 7а.** Кольцевой нагнетательный клапан компрессора:

1 – седло; 2 – пластина; 3 – ограничитель; 4 – пружина; 5 – шпилька

Диаметр клапанов обычно составляет 250–400 мм, а перепад давлений ГОСТ 13529 не нормирует. Дисковые клапаны производятся в комплекте с металлическими и пластмассовыми пластинами, в которых имеются концентрические отверстия. В компрессорах, сжимающих загрязненные газы, применяются клапаны с пластмассовыми пластинами. Для изготовления пластмассовых пластин применяются высококачественные ударпрочные и износостойкие полимеры, армированные стекловолокном. При использовании дисковых клапанов с пластмассовыми пластинами температура сжимаемого газа снижается до 10–15°С. В целях повышения долговечности и надежности дисковые клапаны могут быть изготовлены с одной или несколькими (до трех) демпферными пластинами.

В качестве рабочих клапанов поршневых компрессоров среднего и высокого давлений часто применяются *прямоточные* клапаны, которые характеризуются высокой пропускной способностью и малым сопротивлением. Перепад давления на клапане согласно ГОСТ 13529 не должен превышать 4 МПа. Сторона входа газа у нагнетательного



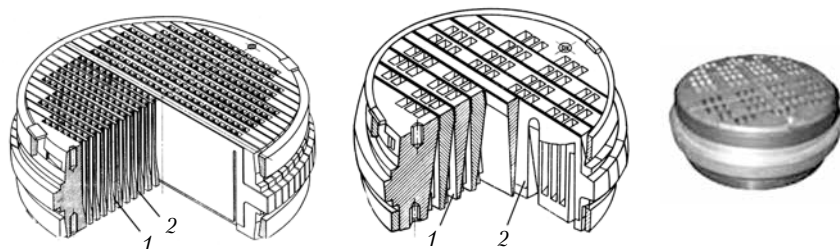
**Рис. 76.** Дисковой клапан компрессора:

- 1 – седло клапана;
- 2, 5 – кольца регулирования хода;
- 3 – закрывающая пластина;
- 4 – закрывающие пружины;
- 6 – демпферные пластины;
- 7 – демпферные витые пружины;
- 8 – ограничитель



клапана должна быть обращена внутрь цилиндра, а у всасывающего наоборот. Корпуса прямооточных клапанов изготавливаются из алюминия, латуни или стали в зависимости от характера рабочей среды.

Конструкция прямооточных клапанов несложная, они собираются из седел и пластин, соединенных запрессованными специальными кольцами (рис. 8). Пластины изготавливаются из специальной высококачественной нержавеющей пружинной стали. Поток газа, проходящий через клапан, практически не меняет направления, а большое проходное сечение клапана обеспечивает минимальные потери давления. При использовании прямооточных клапанов экономится электроэнергия, уменьшается температура сжимаемого газа, производительность компрессоров увеличивается до 6–10%. Они работают практически бесшумно.



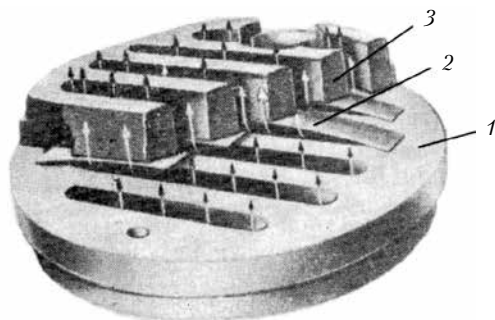
**Рис. 8.** Прямоточные клапаны компрессоров:

1 – седло клапана; 2 – упругая пластина

Преимущества прямооточных клапанов перед дисковыми:

- меньшее сопротивление потоку газа благодаря большому проходному сечению и прямому току;
- меньший объем мертвого пространства;
- отсутствие пружин и незначительная масса пластин;
- небольшая масса клапана.

*Ленточные (полосовые) клапаны* (рис. 9) применяются в компрессорах малой и средней производительности и при низких давлениях. В конструкции клапана отсутствуют дополнительные движущиеся части в виде пружин и демпферов, как у дисковых клапанов. Закрывающий элемент изготавливается из готовой пружинной ленты. Пластина при открытии перекачивается по ограничителю от концов к центру, не создает сильного шума и обеспечивает большой срок службы. Высота подъема пластины по длине неодинакова – максимальна в центре и минимальна по концам. Недостатками таких клапанов



**Рис. 9.** Ленточный (полосовой) клапан компрессора:

1 – седло клапана; 2 – закрывающий элемент в виде полоски; 3 – ограничитель

являются небольшие проходные сечения в щели и низкий расход вследствие небольших подъемов пластин, допускаемых из условий срока их службы. Разность давлений на клапане по ГОСТ 13529 не должна превышать 10 МПа.

## Ротационные компрессоры

Рабочая камера в роторных (ротационных) компрессорах<sup>9</sup> образуется расточкой корпуса и размещенным в ней ротором (роторами), а изменение объемов рабочих камер происходит в результате вращения ротора (роторов). Всасывающие и нагнетательные клапаны отсутствуют. К числу роторных компрессоров относятся однороторные пластинчатые и жидкостно-кольцевые компрессоры, а также двухроторные воздуходувки и компрессоры типа «Рутс»<sup>10</sup>, винтовые компрессоры и др.

На рис. 10 показан роторный компрессор с частичным внутренним сжатием газа. Компрессор состоит из корпуса 1, внутри которого установлены ведущий (большой) 2 и ведомый (малый) 3 роторы.

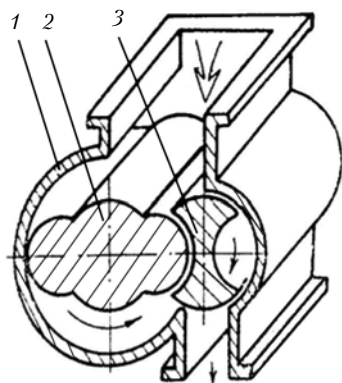
<sup>9</sup> ГОСТ 28567–90 относит название *ротационный компрессор* к синониму стандартизованного термина *роторный компрессор*.

<sup>10</sup> Компрессор типа «Рутс» в настоящее время применяется в автостроении. Его конструкция была разработана братьями Рутс во второй половине XIX в. и напоминает масляный шестеренчатый насос: в корпусе овальной формы вращаются в противоположные стороны два ротора, имеющие специальный профиль. (См. сайт: <http://auto-tuning.in.ua>)

По своей конфигурации роторы являются прямыми зубчатыми и вращаются навстречу друг другу. Большой ротор имеет форму цилиндра с выступами, которые при вращении входят во впадины малого ротора. Всасывающее окно делается на образующей поверхности обеих расточек корпуса (вход газа в окно показан сверху стрелкой), а нагнетательное окно располагается внизу в пределах расточки под малый ротор. Газ частично сжимается в расточке под большой ротор и малым ротором подается в нагнетательный трубопровод на окончательное сжатие в нем. Такие компрессоры называются компрессорами внешнего сжатия, они широко известны как ротационно-лопастные компрессоры. В их число входят воздуходувки, газодувки и компрессоры типа «Рутс».

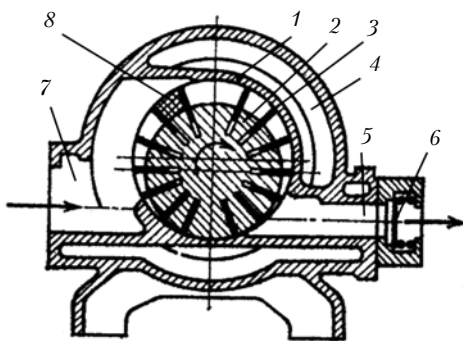
Роторные компрессоры с двумя роторами, имеющими зубчатые сопряженные профили, ГОСТ относит к шестеренчатым компрессорам. При одноступенчатом исполнении такие компрессоры позволяют получать сжатый газ давлением не более 0,4 МПа.

В *пластинчатых компрессорах* (ротационно-пластинчатых) ротор расположен внутри корпуса (цилиндра) так, что между корпусом и ротором образуется серповидное пространство (рис. 11). При вращении ротора пластины центробежными силами прижимаются к цилиндру и образуют замкнутые изолированные объемы. Со стороны



**Рис. 10.** Схема шестеренчатого (ротационно-лопастного) компрессора:

1 – корпус; 2 – ведущий ротор;  
3 – ведомый ротор



**Рис. 11.** Схема пластинчатого (ротационно-пластинчатого) компрессора:

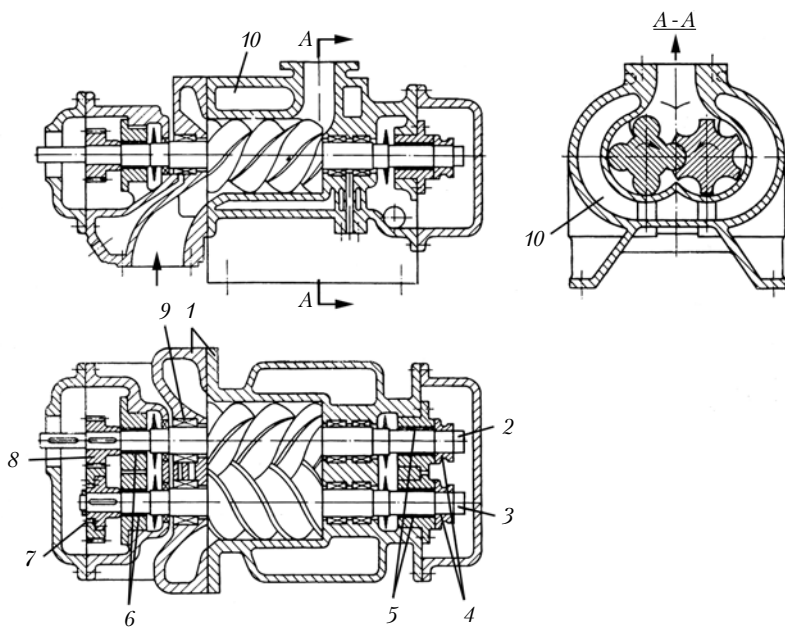
1 – корпус; 2 – ротор; 3 – пластина;  
4 – рубашка; 5 и 7 – нагнетательный  
и всасывающий патрубки;  
6 – клапан; 8 – камера сжатия

всасывающего патрубка объем между пластинами непрерывно увеличивается до совпадения с вертикальной осью цилиндра. В этой части ротора происходит всасывание газа в цилиндр. Справа от вертикальной оси объем между пластинами уменьшается и осуществляется сжатие газа, а затем подача его в нагнетательный патрубок.

Пластинчатые компрессоры общего назначения в одноступенчатом исполнении выпускаются производительностью от 0,1 до 100 м<sup>3</sup>/мин с конечным давлением до 1,2 МПа. В двухступенчатом исполнении это давление возрастает до 1,6 МПа, а в трехступенчатом – до 2,5 МПа.

## Винтовые компрессоры

Согласно ГОСТ 28567–90 винтовыми компрессорами (рис. 12а, б, в) называются роторные компрессоры, в которых рабочая камера образуется корпусом и винтообразными роторами, имеющими различные профили зубьев.



**Рис. 12а.** Конструктивная схема винтового компрессора:

- 1 – корпус; 2 – ведущий ротор (винт); 3 – ведомый ротор (винт);  
4 – упорные подшипники; 5, 6 – опорные подшипники; 7, 8 – шестерни;  
9 – уплотнения; 10 – полости для циркуляции охлаждающей жидкости

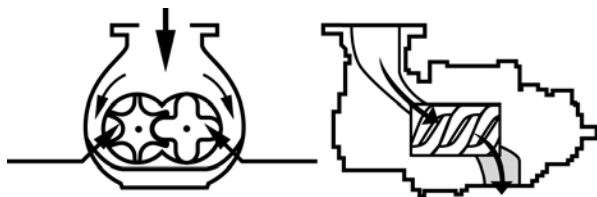


Рис. 126. Схема работы винтового блока

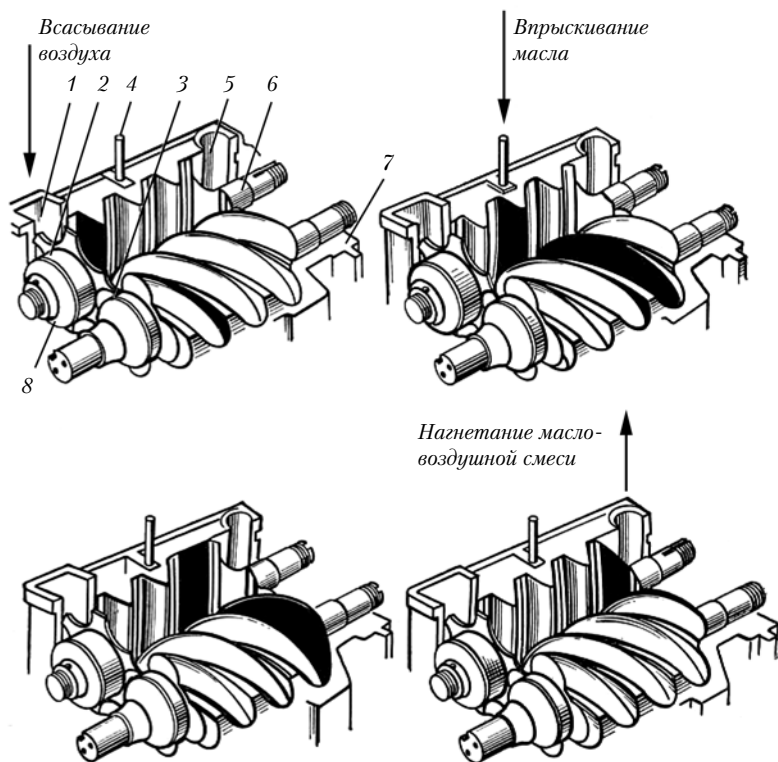


Рис. 12в. Процесс сжатия в одноступенчатом винтовом компрессоре:

- 1 – всасывающий патрубок; 2 – вспомогательный ротор; 3 – главный ротор;  
 4 – трубка подвода масла; 5 – нагнетательный патрубок; 6 и 8 – подшипники;  
 7 – корпус

Появление винтовых маслозаполненных компрессоров с пониженным уровнем шума вытеснило в промышленно развитых странах поршневые компрессоры производительностью от 1 до 100 м<sup>3</sup>/мин из области обеспечения производств сжатым воздухом с давлением до 1,5 МПа.

По сравнению с поршневыми и центробежными винтовые компрессоры обладают рядом преимуществ:

- низкий уровень шума и вибрации, благодаря малым габаритам и весу они могут устанавливаться непосредственно в цехах, где потребляется воздух, и не требуют специального фундамента;

- малый расход масла (2–3 мг/м<sup>3</sup>) в отличие от крупных поршневых компрессоров;

- безопасны, поскольку оснащены автоматической системой управления и контроля работоспособности;

- надежны;

- большой ресурс работы;

- возможность непрерывного круглосуточного функционирования;

- простота монтажа и подключения;

- сравнительно небольшие эксплуатационные затраты;

- высокая чистота получаемого сжатого воздуха;

- низкий уровень энергозатрат на кубический метр произведенного воздуха;

- воздушное охлаждение винтовых компрессоров позволяет отказаться от громоздкой системы оборотного водоснабжения (градирня), а кроме того дает возможность вторичного использования выделяемого в результате работы компрессора тепла, например, для обогрева помещений в зимнее время.

Принцип действия ротационных компрессоров объемного действия с поршнем в форме винта был разработан в 30-е годы XX века. Основными частями винтового компрессора являются ведущий и ведомый роторы, которые вращаются навстречу друг другу, в то время как пространство между ними и корпусом уменьшается. Каждый из винтовых элементов имеет постоянную, присущую ему степень повышения давления, которая зависит от их длины, шага винта и формы выпускного отверстия. Для получения наибольшего КПД степень повышения давления должна соответствовать требуемому рабочему давлению.

Винтовой компрессор не оснащен клапанами, в нем отсутствуют механические силы, вызывающие разбалансировку. Это значит, что он может работать при высокой скорости вращения вала. Осевое усилие, зависящее от разности давлений между входом и выходом

компрессора, должно приниматься подшипниками. Винт, который первоначально был симметричным, в дальнейшем видоизменился и приобрел различные асимметричные геликоидальные (спиральные) профили.

Такое устройство принципиально отличается от устройства поршневого компрессора, для которого характерно возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре, приводящее к повышенному нагреву и возникновению сильных вибраций.

В первых винтовых компрессорах, так называемых *безмасляных (компрессорах с сухим сжатием)*, винт имел симметричный профиль, в камере сжатия не использовалась жидкость. В конце 1960-х годов были внедрены высокоскоростные безмасляные винтовые компрессоры с асимметричным профилем винта. Новый профиль винта благодаря уменьшению внутренних утечек позволил значительно повысить КПД.

В компрессорах с сухим сжатием для синхронизации вращающихся навстречу друг другу роторов используется внешняя зубчатая передача. Так как роторы не соприкасаются друг с другом и с корпусом компрессора, в камере сжатия отдельной смазки не требуется. Роторы и корпус изготавливаются с высокой точностью, чтобы уменьшить утечку воздуха со стороны нагнетания в сторону всасывания. Степень повышения давления ограничивается разностью температур на входе и выходе. Поэтому безмасляные винтовые компрессоры часто изготавливаются двухступенчатыми.

Винтовые компрессоры с нагнетанием жидкости охлаждаются и смазываются жидкостью, которая поступает в камеру сжатия, а также часто и в подшипники компрессора. Жидкость предназначена для охлаждения и смазки элементов компрессора, а также для уменьшения обратной утечки воздуха в сторону воздухозабора.

В настоящее время для этих целей чаще всего используется масло из-за его хороших смазочных свойств, но могут применяться и другие жидкости, например вода. Масло в винтовом компрессоре выполняет сразу несколько функций: создание масляной пленки и обеспечение зазора между роторами винтовой пары; транспортировку воздуха; смазку подшипников рабочего элемента; отвод тепла. Масляные винтовые компрессоры могут изготавливаться с большой степенью повышения давления, поэтому для давлений до 1,5 МПа обычно достаточно одной ступени сжатия.

В стационарных компрессорных установках применяются маслозаполненные винтовые одноступенчатые и многоступенчатые безмасляные компрессоры производительностью от 1 до 70 м<sup>3</sup>/мин с давлением,

как правило, до 1,5 МПа (15 кгс/см<sup>2</sup>). Производительность компрессоров с впрыском воды составляет 60–400 м<sup>3</sup>/мин (1–7 м<sup>3</sup>/с) при конечном давлении до 0,5 МПа.

Винтовые компрессоры состоят из двух роторов червячного типа (см. рис. 12б). Ведущий ротор имеет выпуклые боковые поверхности, ведомый – вогнутые. Обычно ведущий ротор выполнен как винт с четырехзаходной резьбой (витками), а ведомый – с шестью. Такое передаточное число считается оптимальным, чтобы уменьшить нагрузку на ведущий винт. Объем сжатия образуется между витками винтовой группы и корпусом (выделено жирной линией). Полный рабочий цикл сжатия осуществляется за один оборот ведущего винта.

Рабочие камеры компрессора представляют собой полость, образованную винтовой поверхностью ротора и стенками корпуса. Роторы не соприкасаются и вращаются в разные стороны. Вращение от ведущего ротора к ведомому передается с помощью синхронизирующих зубчатых колес. Зазор между зубьями колес меньше зазора между роторами, благодаря чему исключается их контакт. При всасывании объем рабочей камеры максимальный, выступы роторов удаляются от впадин, и в момент полного наполнения камера разобщается с всасывающим патрубком компрессора. При нагнетании объем рабочей камеры вследствие вращения роторов уменьшается и газ выходит в нагнетательный патрубок, с которым камера сообщается по мере передвижения газа и его сжатия между витками роторов и стенками цилиндра и крышек. Равномерность потока газа достигается благодаря большой частоте вращения роторов и одновременной работе нескольких камер.

При сжатии воздуха через трубку над ведомым ротором подается под давлением масло, которое, смешиваясь с сжимаемым воздухом, охлаждает его и образует масловоздушную смесь. Сжатая масловоздушная смесь поступает в воздухосборник.

Применяемые на практике схемы компоновок винтовых компрессорных установок показаны на рис. 13.



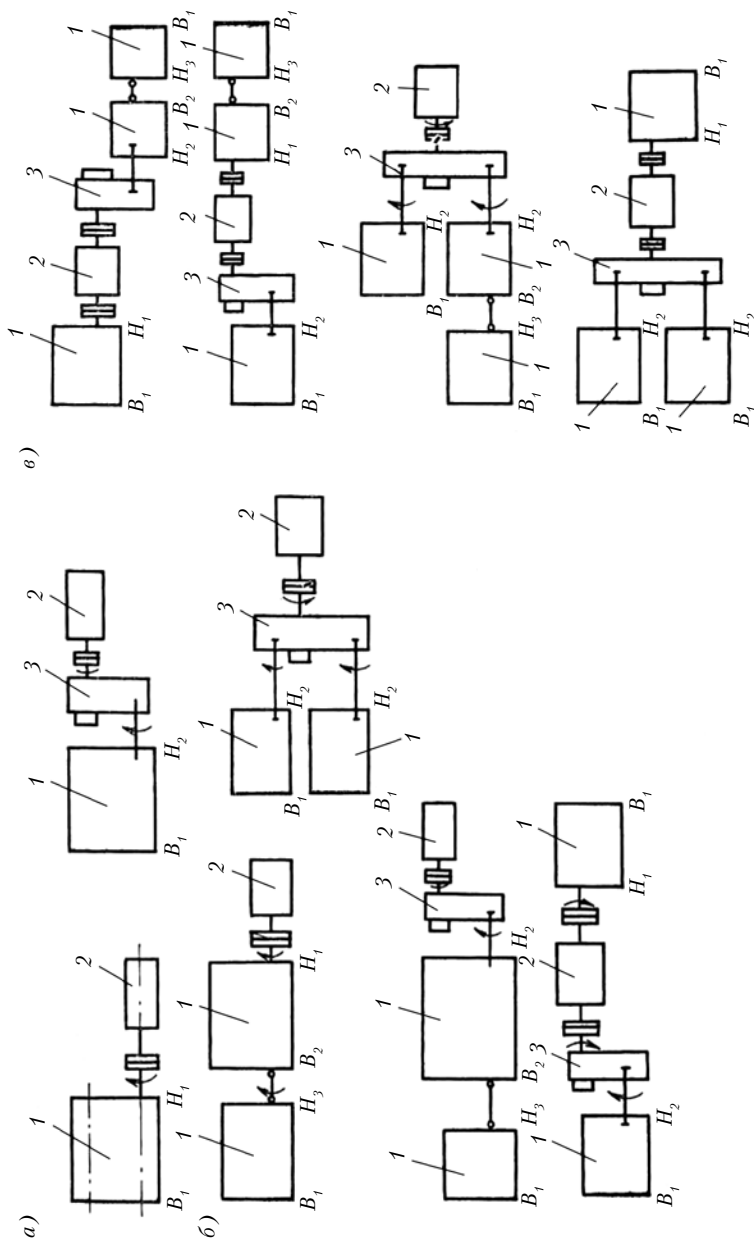


Рис. 13. Компоновка компрессорных установок:

*а* – одноступенчатых; *б* – двухступенчатых; *в* – трехступенчатых;

1 – ступень компрессора; 2 – привод; 3 – устройство для получения разных оборотов на ступенях компрессора (мультипликатор)