

Раздел 2. Компрессорное оборудование

Доцент ОНД ИШПР
Холодная Галина Евгеньевна

Основные понятия

Определение

Степень сжатия ($\epsilon = p_2/p_1$) – отношение конечного давления p_2 , создаваемого компрессорной машиной, к начальному давлению p_1 , при котором происходит всасывание газа

Основные понятия

Определение

Машины для подачи газовых сред в зависимости от развиваемого ими давления называют:

- вентиляторами ($\epsilon < 1,15$);
- газодувками ($\epsilon > 1,15$; искусственного охлаждения нет);
- *компрессорами* ($\epsilon > 1,15$, имеется искусственное охлаждение).

Основные понятия

Компрессорная установка –
совокупность компрессора, привода и
вспомогательного оборудования
(газоохладителя, осушителя и т.д.).

Основные функции компрессорных машин

1. Подача газа в аппараты, печи и машины

для технологической обработки (очистка, разделение, улавливание жидких фракций), химического синтеза (производство спирта, полиэтилена и др.), для сгорания (в двигателях, печах) и для осуществления и интенсификации других процессов (очистка нефтепродуктов от сернистых соединений, переработка нефти и нефтепродуктов);

Основные функции компрессорных машин

2. Перемещение газа:

- 1) сбор природного газа из «слабых» газовых скважин и нефтяного из нефтяных скважин с перекачиванием его на головную компрессорную станцию;
- 2) транспортирование по магистральным газопроводам

Основные функции компрессорных машин

3. Аккумулирование газа:

- 1) в пластах – для подземного хранения, поддержания и восстановления пластового давления;
- 2) в сосудах – для хранения и перевозки в газообразном или жидком виде;
- 3) в сосудах – для питания пневматических систем воздухом силового назначения (привод грузоподъёмных, транспортных и других машин, различных инструментов и приспособлений; запуск ДВС; управление тормозами и трансмиссиями; питание пневматических КИП и органов систем автоматического регулирования и управления);
- 4) в трубопроводах и ёмкостях – для испытания на прочность и плотность путём опрессовки.

Основные функции компрессорных машин

4. Удаление газа:

- 1) создание вакуума в сосудах;
- 2) вентиляция помещений;
- 3) отсасывание продуктов сгорания из печей и топочных устройств.

Основные функции компрессорных машин

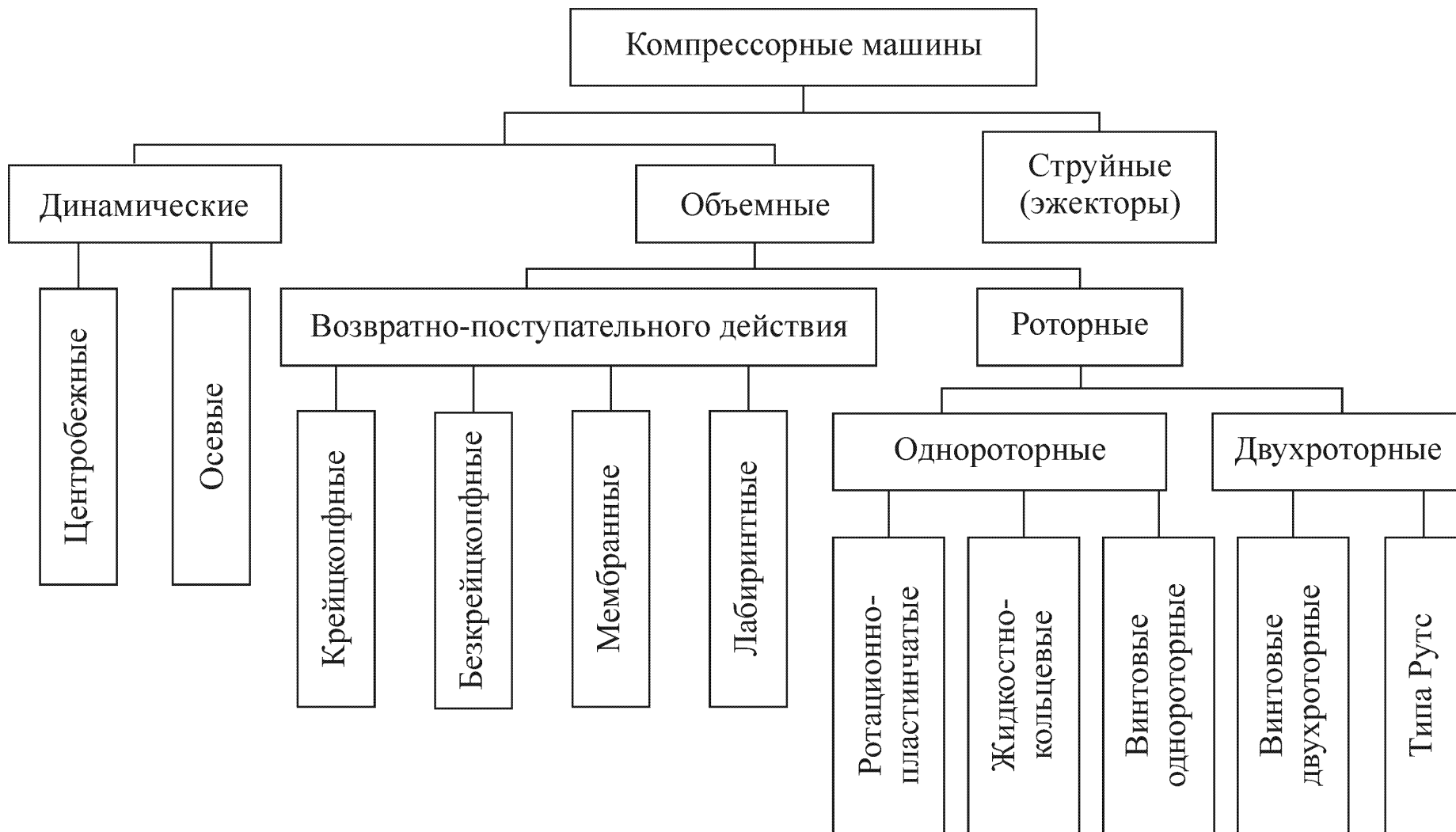
5. Создание потока газа

- 1) для транспортирования твёрдых тел и жидкости (вынос выбуренной породы при бурении скважины и ремонте скважины;
- 2) извлечение жидкости из скважины при компрессорном способе добычи нефти;
- 3) пневматический транспорт сыпучих материалов и капсул с грузом) или для теплопередачи (в охладителях, охлаждающих рубашках машин, подогревателях, градирнях, сушилках, холодильных установках)
- 4) для других целей (например, создание газового затвора в уплотнительном устройстве вала компрессора).

Основные параметры компрессоров

1. Объемная подача Q , указываемая при определенных условиях всасывания;
2. Начальное давление p_1 ;
3. Конечное давление p_2 ;
4. Степень повышения давления $\varepsilon = p_2/p_1$;
5. Частота вращения n ;
6. Мощность на валу компрессора N .

Классификация компрессоров



Классификация компрессоров

По **конечному давлению** различают:

- вакуум-компрессоры, которые отсасывают газ из пространства с давлением ниже атмосферного;
- компрессоры **низкого давления**, предназначенные для нагнетания газа при давлении от 0,15 до 1,2 МПа;
- компрессоры **среднего давления** от 1,2 до 10 МПа;
- компрессоры **высокого давления** от 10 до 100 МПа;
- компрессоры **сверхвысокого давления**, предназначенные для сжатия газа выше 100 МПа.

Классификация компрессоров

По **способу отвода теплоты** – с водяным и воздушным охлаждением.

По **типу приводного двигателя** – с приводом от:

- электродвигателя;
- двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- паровой или газовой турбины

Классификация компрессоров

По принципу действия компрессоры подразделяются на:

- **объемные**
- **лопастные**
- **струйные**

Под принципом действия понимают основную особенность процесса повышения давления, зависящую от конструкции компрессора.

Объемные компрессоры

Это машины, в которых процесс сжатия происходит в рабочих камерах, изменяющих свой объем периодически, попеременно сообщаящихся с входом и выходом компрессора.

Объемные машины по геометрической форме рабочих органов и способу изменения объема рабочих камер можно разделить на **поршневые** и **роторные** компрессоры.

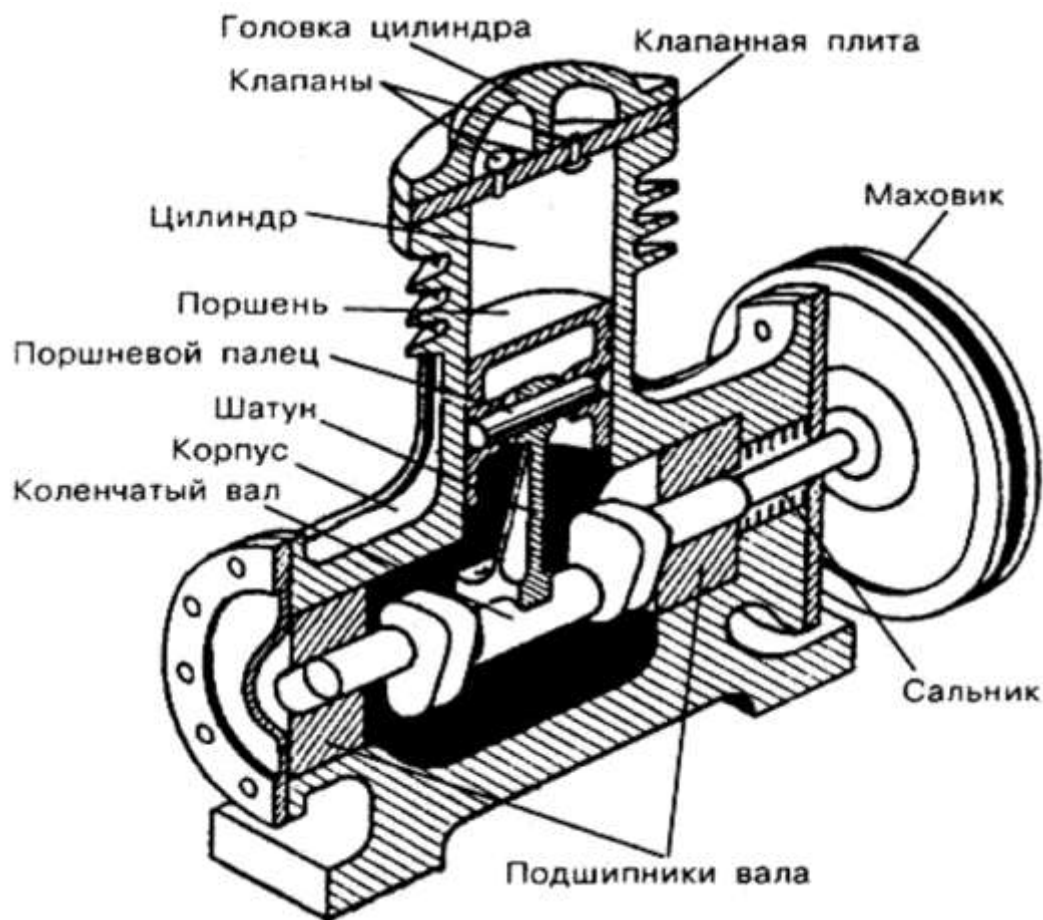
Объемные компрессоры

Поршневые компрессоры могут быть одностороннего или двухстороннего действия.

К объемным машинам с вращающим сжимающим элементом (роторным машинам) относятся:

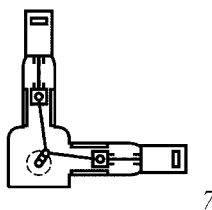
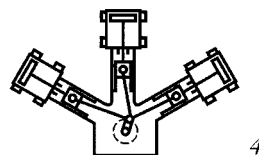
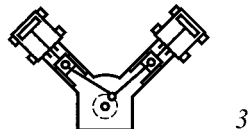
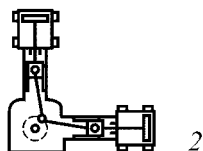
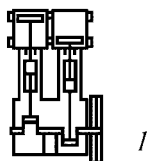
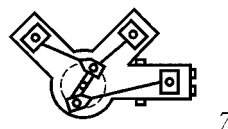
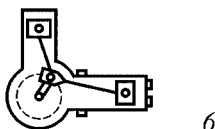
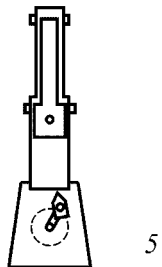
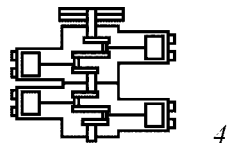
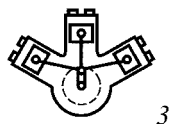
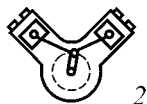
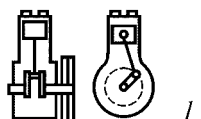
- ротационно-пластинчатые;
- жидкостно-кольцевые и другие конструкции;
- винтовые.

Объемные компрессоры



Конструктивная схема **однопоршневого** компрессора

Объемные компрессоры

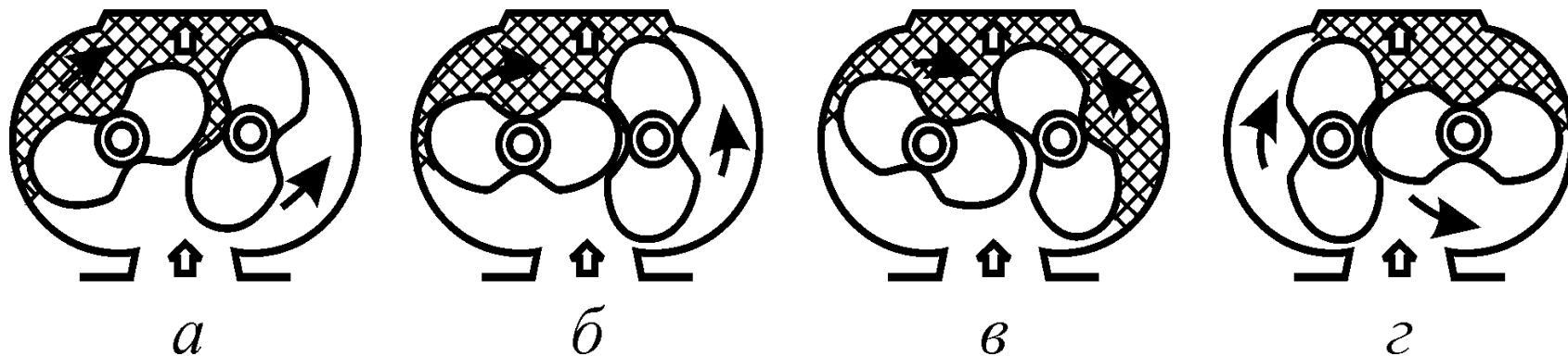


Типовые конструкции поршневых компрессоров и двигателей-компрессоров:

а) бескрейцкопфные (одностороннее всасывание):
1 - вертикальный; 2 - У-типа;
3 - Ш-типа; 4 - горизонтальный оппозитный (корпусного типа);
5 - вертикальный со ступенчатым поршнем; 6 - двигатель-компрессор L-типа; 7 - двигатель-компрессор Ш-типа;

б) крейцкопфные (с двусторонним всасыванием):
1 - в одну линию; 2 - L-типа;
3 - У-типа; 4 - Ш-типа;
5 - горизонтальный оппозитный;
6 - горизонтальный со ступенчатым поршнем;
7 - двигатель-компрессор L-типа

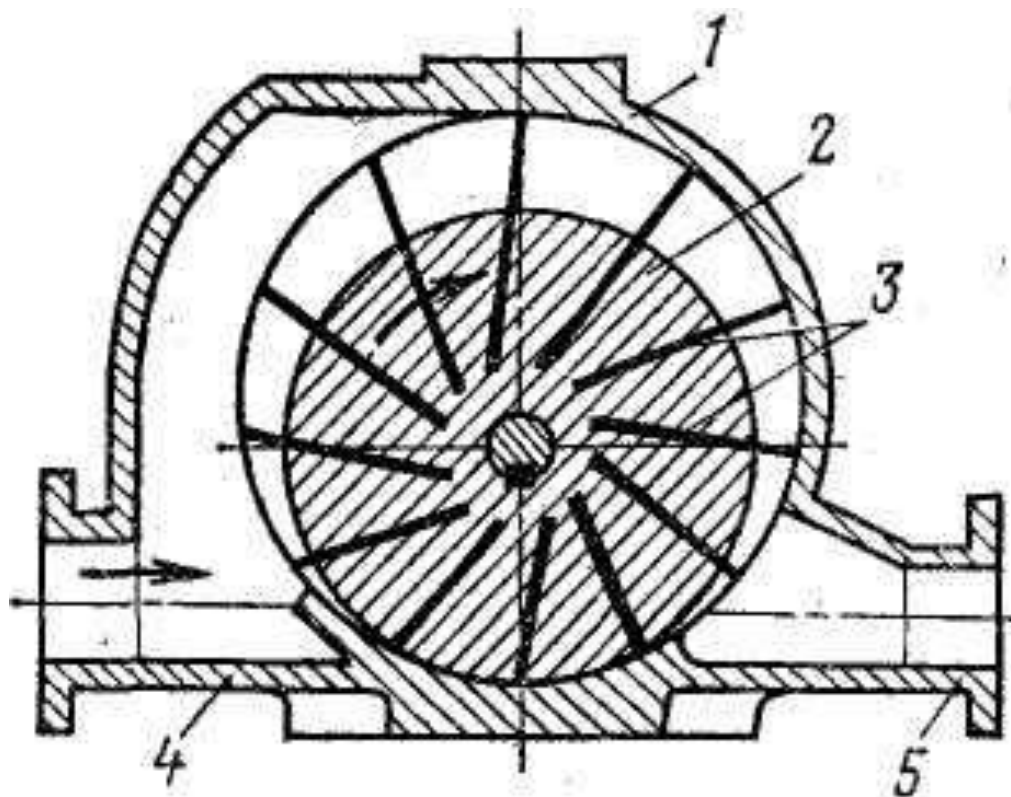
Объемные компрессоры



Принцип работы двухроторного компрессора типа Рутс:

- а) такт всасывания; б) такт отсечки;*
- в) такт сжатия; г) такт нагнетания*

Объемные компрессоры



Ротационно-пластинчатый компрессор:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – пластины; 4 – всасывающий патрубков; 5 – подающий патрубков.

Жидкостнокольцевой компрессор

Достоинства жидкостнокольцевых компрессоров:

- простота конструкции,
- отсутствие масла и трущихся элементов в рабочей полости машины,
- хорошее уплотнение зазоров жидкостью, низкий уровень шума и равномерная, практически без пульсаций, подача газа.

Жидкостнокольцевой компрессор

Эти *достоинства* обеспечивают

- высокую надёжность компрессоров в самых тяжёлых условиях эксплуатации при минимальных требованиях к обслуживанию;
- возможность сжатия токсичных, взрывоопасных, легкоразлагающихся, полимеризующихся и воспламеняющихся газов, паров и газожидкостных смесей, в том числе агрессивных и загрязнённых механическими примесями;
- возможность использования в качестве вакуумных насосов; перспективность применения в качестве химических реакторов для среды жидкость – газ (благодаря интенсивному перемешиванию двух фаз на границе контакта).

Жидкостнокольцевой компрессор

- Жидкостнокольцевые компрессоры в одноступенчатом исполнении рассчитаны на давление до 0,2 МПа, а при трёх ступенях – до 2 МПа.
- Объёмный расход газа на входе компрессоров составляет до 10 тыс. м³/ч.

Жидкостнокольцевой компрессор

Частота вращения ротора – от 4 (крупные компрессоры) до 60 об / с (небольшие машины).

При малой частоте вращения жидкостное кольцо разрушается.

Жидкостнокольцевой компрессор

Пределный вакуум, достигаемый водокольцевыми вакуумными насосами, определяется давлением насыщенного пара при температуре водяного кольца (95 % - ный вакуум в одноступенчатых, 97 % - ный в двухступенчатых).

Более глубокий вакуум достигается при замене воды жидкостью с низким давлением паров – соляным раствором, маслом или серной кислотой.

Жидкостнокольцевой компрессор

В компрессорах большое, а в вакуумных насосах решающее влияние на коэффициент объёмного расхода λ оказывает зазор между рабочим колесом и крышками цилиндра (из-за перетекания сжатого газа). Зазор в 0,1 - 0,2 мм зависит от точности изготовления.

Жидкостнокольцевой компрессор

Жидкостнокольцевые компрессоры имеют сравнительно низкий изотермический КПД.

В лучших образцах максимальное его значение равно 0,55 – 0,60.

Жидкостнокольцевой компрессор

Оптимальная окружная скорость концов лопастей равна 16,5 – 20 м/с для компрессоров и 12,5 – 15,5 м/с для вакуумных насосов (при работе на воде). Как для компрессора, так и для вакуумного насоса оптимум степени повышения давления $\varepsilon \approx 2$.

Трохоидный компрессор

Трохоидный компрессор

построен по схеме, которая в последние годы всё шире используется как в компрессорах, так и в двигателях внутреннего сгорания.

Трохоидный компрессор

Основными органами служат две детали: охватывающая и охватываемая цилиндрическая поверхность одной из них выполняется по трохоиде, а другой – по огибающей семейства трохоид.(см. рис).

Трохоидный компрессор

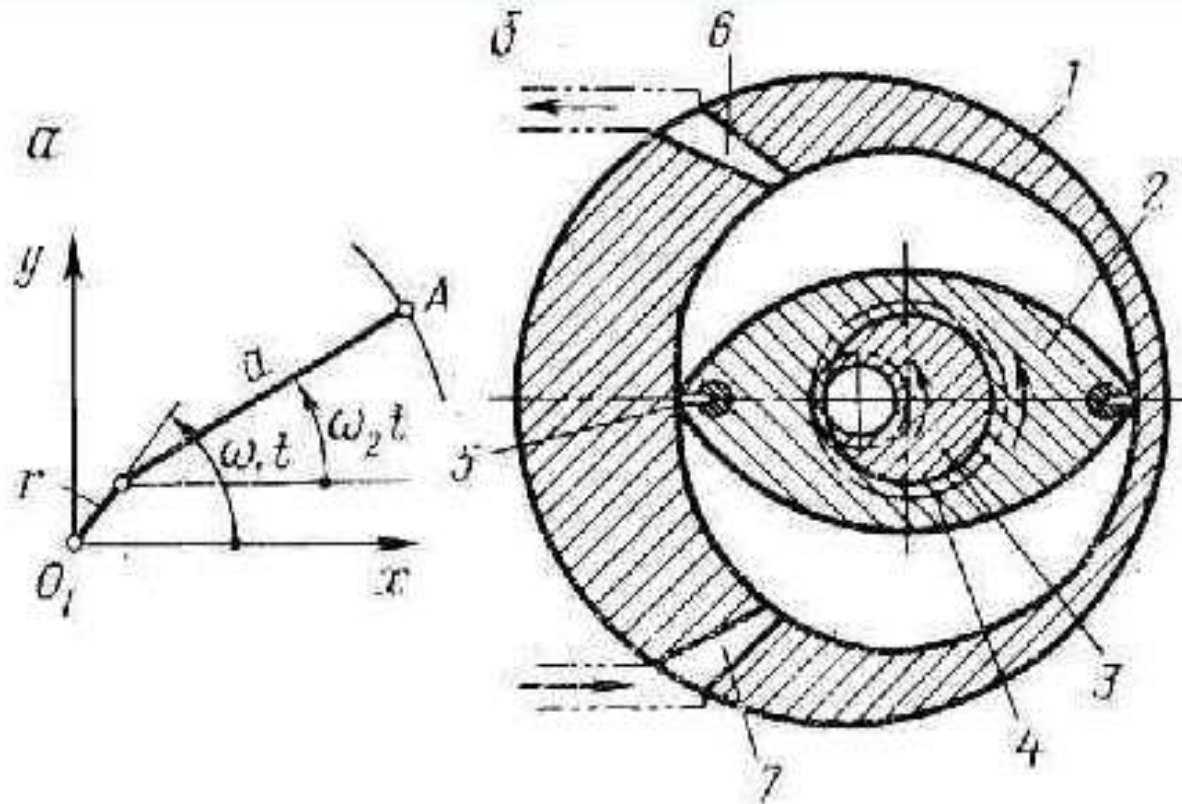
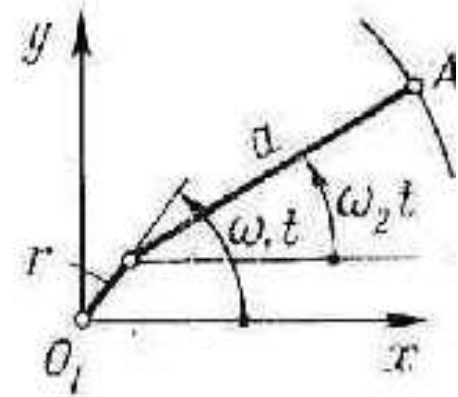


Схема трохоидного компрессора:
 а – образование трохоиды; б – элементы машины:
 1 – корпус, 2 – ротор, 3 – эксцентриковый вал,
 4 – зубчатая передача, 5 – радиальное уплотнение,

Трохоидный компрессор

Трохоида - кривая, описываемая точкой A (рис. a).



Звено длиной r (эксцентриситет) вращается с угловой скоростью ω_1 , а звено длиной a (производящий радиус) – со скоростью ω_2 .

Передаточное отношение $z = \omega_1 / \omega_2$; параметр формы $k = a/r$.

Трохоидный компрессор

При относительном вращении двух деталей между профилированными поверхностями образуются камеры переменного объёма, в которых осуществляется рабочий процесс.

Трохоидный компрессор

Вращение обеспечивается передачей с внутренним зацеплением. Газ всасывается и нагнетается через газообменные каналы.

За один оборот ротора каждая его грань совершает один рабочий цикл, т. е. такой компрессор двукратного действия.

Трохоидный компрессор

Трохоидные машины долгое время не реализовались из-за отсутствия эффективного уплотнения рабочих камер. В последние годы эта проблема решена с помощью контактной системы уплотнений. Применение последних снижает требования к макрогеометрии и точности изготовления профилированных поверхностей, что упрощает изготовление трохойдного компрессора по сравнению с другими роторными машинами.

Трохоидный компрессор

Изотермический КПД более высокий, чем у других роторных компрессоров, и приближается к уровню поршневых, а по ресурсу в условиях запылённости воздуха превышают последние. Небольшой относительный остаточный объём (менее 0,01) позволяет сжимать воздух в одной ступени до 0,8 – 0,9 МПа при V_H до 1 м³/мин (у охлаждаемых до 12 м³/мин) и до 0,4 МПа при V_H до 40 – 50 м³/мин.

Трохоидный компрессор

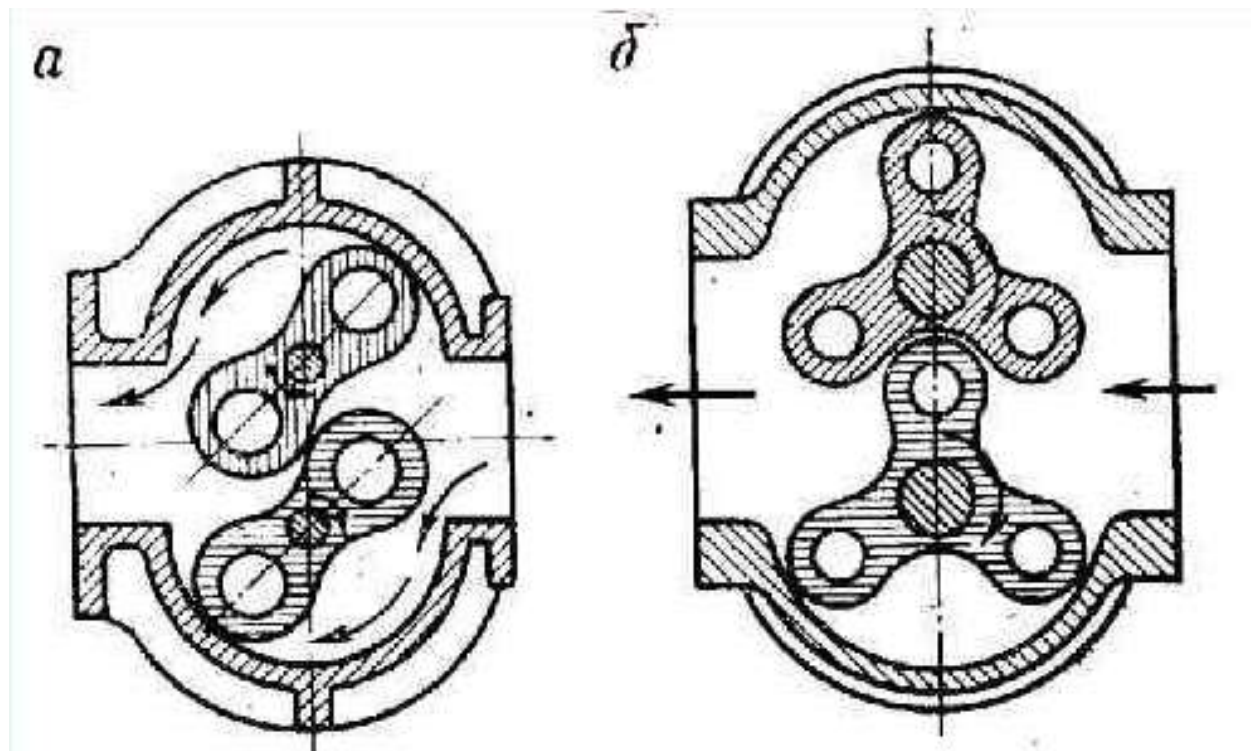
Трохоидные компрессоры, выпускаемые в нашей стране, предназначены для пневмосистем железнодорожного и автомобильного транспортов.

За рубежом их применяют в различных областях, в том числе в вакуумной и холодильной технике.

Коловратный компрессор

Коловратный компрессор типа Рутс, применяемый при невысоких давлениях, действует аналогично коловратному насосу, т. е. порция газа переносится между зубьями ротора при постоянном объёме, а сжатие газа происходит в момент, когда рабочая камера сообщается с нагнетательной стороной машины (см. рис)

Коловратный компрессор



Схемы коловратных нагнетателей:
a – двухлопастного; *б* - трёхлопастного

Коловратный компрессор

Вследствие малого числа зубьев передача равномерного вращения от одного ротора к другому становится затруднительной.

Передача осуществляется зубчатой парой, расположенной вне компрессора, а между роторами сохраняется зазор в 0,1 – 0,2 мм, что позволяет избежать их износа и необходимости вводить в компрессор смазку.

Коловратный компрессор

Это – важное достоинство таких машин, используемых в качестве газодувок и вакуумных насосов там, где присутствие масла в сжимаемом газе недопустимо.

Коловратный компрессор

Коловратные компрессоры широко используются для наддува двигателей внутреннего сгорания.

Их главное достоинство – надёжность и долговечность благодаря исключительной простоте конструкции.

Коловратный компрессор

Объёмный расход газа
на входе – от 10 до 60000 м³/ч,
в вакуум – насосах – до 100 тыс. м³/ч.

Степени повышения давления – до
1,4, в редких случаях до 1,8. При более
высоких отношениях (примерно до 2,5)
применяется двухступенчатое сжатие с
промежуточным охлаждением.

Адиабатический КПД $\eta = 0,5 - 0,7$.

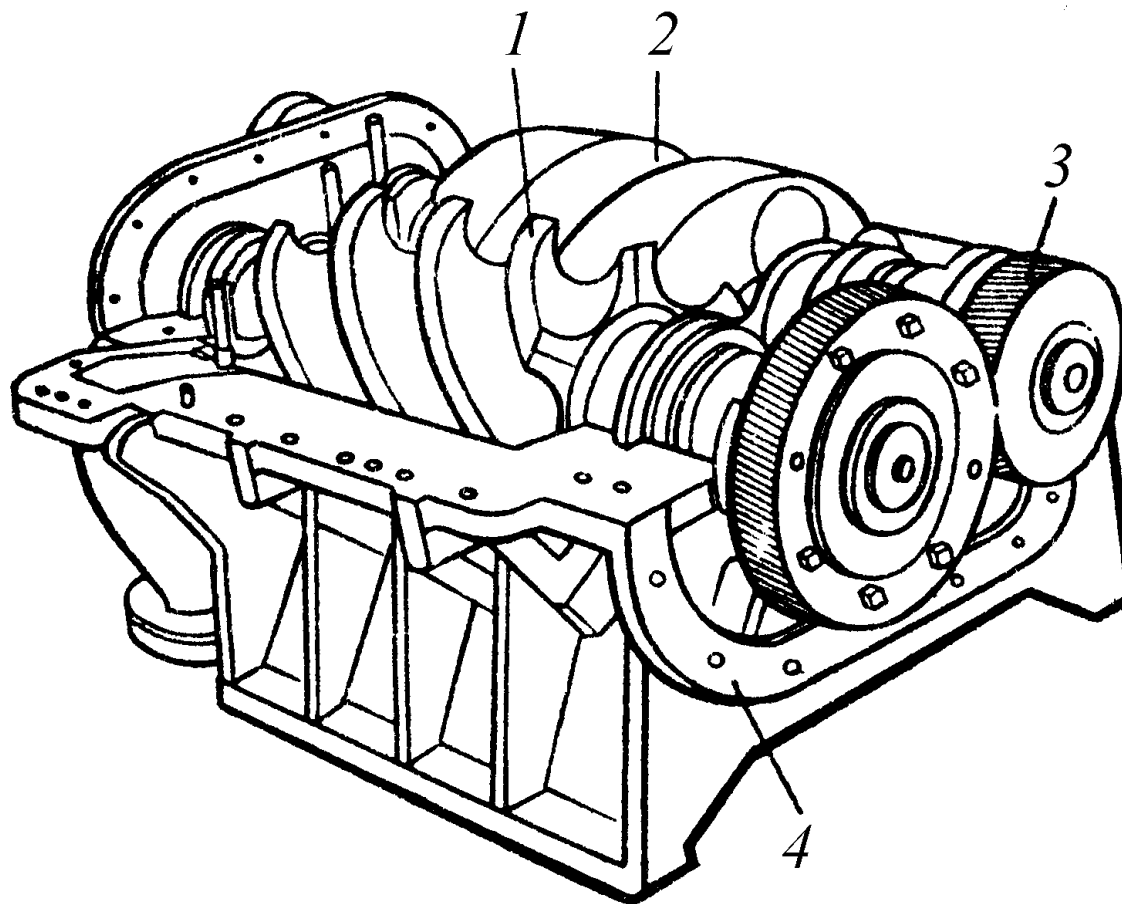
Винтовые компрессоры

Винтовые компрессоры – двухроторные (реже трёхроторные) машины, выполненные в виде винтовой зубчатой передачи с большим углом подъёма (см. рис.). Торцы винтов повернуты относительно друг друга на углы T_1 и T_2 .
Условие зацепления винтов:

$$T_1 r_1 = - T_2 r_2,$$

где z_1 и z_2 – число зубьев соответственно ведущего и ведомого роторов.

Винтовые компрессоры



Винтовой компрессор сухого трения:

1 и 2 - ведомый и ведущий роторы;

3 - синхронизирующие шестерни; 4 - корпус

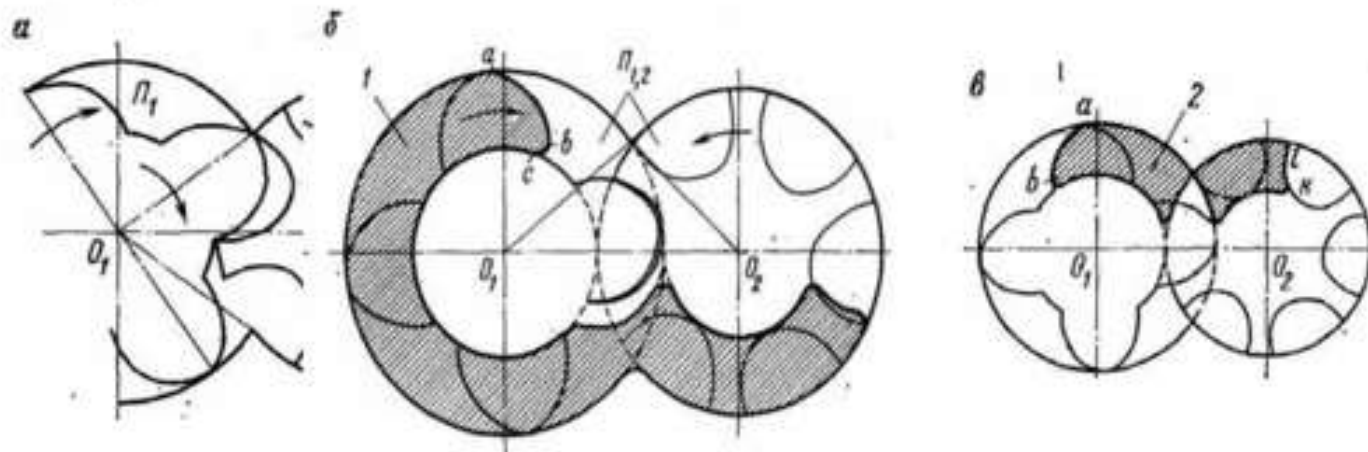
Винтовые компрессоры

Между соседними зубьями каждого винта образуются полости, ограниченные в радиальном направлении цилиндрическими, а по длине – торцовыми поверхностями расточек в корпусе.

При зацеплении винтов каждая полость в различной степени (в зависимости от углового положения) заполняется зубьями соседнего ротора, причём линия контакта зубьев разделяет полость на две части.

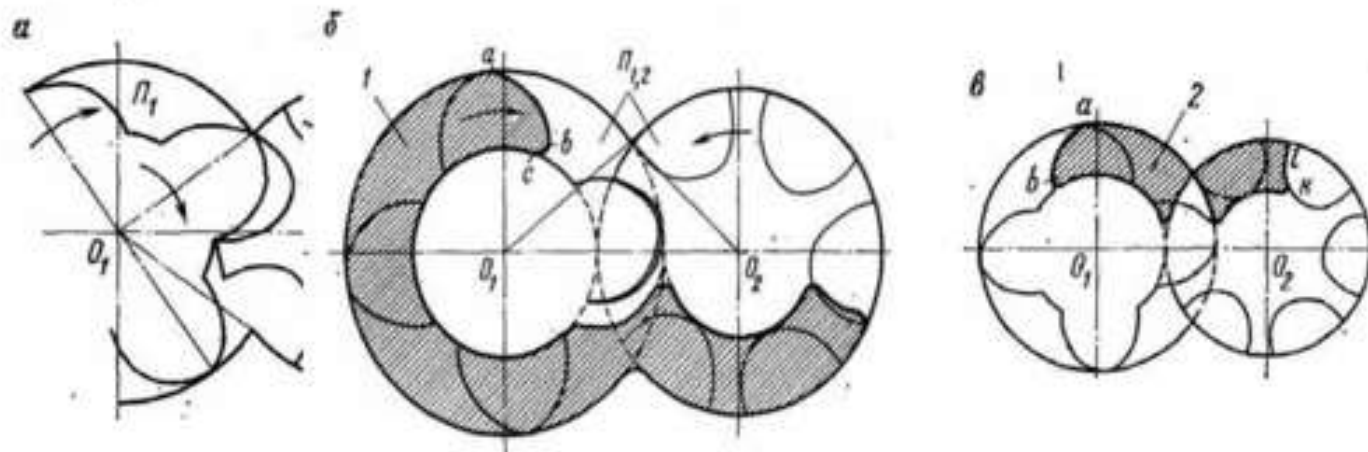
Винтовые компрессоры

При вращении винтов объём нижней части полости увеличивается, благодаря чему обеспечивается всасывание газа, а объём верхней части уменьшается, вследствие чего сначала происходит сжатие газа, а затем выталкивание (когда у заднего торца данная полость достигает нагнетательного окна).



В момент, когда зуб ведомого ротора начинает входить в полость Π_1 ведущего ротора (рис. а), объём её начинает сокращаться. Вначале темп сокращения очень невысокий, поэтому отсечку полости от всасывающего окна по кромке abc (рис. б) задерживают до тех пор, пока в результате соединения впадин обоих винтов не начнёт образовываться парная полость $\Pi_{1,2}$ (чтобы не было потерь при соединении пространств различными давлениями).

Винтовые компрессоры



Начиная с этого положения, в сокращающейся изолированной полости $\Pi_{1,2}$ происходит сжатие до момента, когда задние сечения полости не достигнут кромок нагнетательного окна ab и k_1 (рис. в). Степень сжатия, определяющая внутреннее повышение давления газа в полости, зависит от положения кромок нагнетательного окна по отношению к началу сжатия.

Винтовые компрессоры

Профили зубьев подбираются с таким расчётом, чтобы при взаимной обкатке винтов их зубья сопрягались теоретически без зазора. Были исследованы различные зубья – симметричного и асимметричного профиля с циклоидальным, круговым и эллиптическим профилем, скорректированные и без коррекции.

В нашей стране принят *эллиптический профиль*

Винтовые компрессоры

Винтовые компрессоры подразделяются на две группы:

1) сухого сжатия,

в рабочее пространство которых не подаётся ни смазывающая, ни охлаждающая жидкость; охлаждение – обдувом корпуса или потоком воды или масла через рубашку корпуса и полые винты, подаваемый газ не содержит масла и продуктов износа деталей;

Винтовые компрессоры

2) мокрого сжатия

с впрыскиванием жидкости в полости компрессора с целью охлаждения и уплотнения; компрессор называется маслозаполненным, если вводится значительное количество такой жидкости. В машинах мокрого сжатия после компрессора устанавливают отделители жидкости.

Винтовые компрессоры

В компрессоре сухого сжатия так же, как в коловратном, зубья не соприкасаются благодаря шестерням связи, синхронизирующим движение ВИНТОВ.

Зазор между зубьями шестерён приблизительно в два раза меньше зазора между зубьями винтов, что исключает взаимное касание винтов при работе.

Винтовые компрессоры

Зазоры обеспечивают свободное вращения винтов при деформации роторов под действием давления газа и изменения температуры, но должны быть минимальными для уменьшения перетеканий газа.

Винтовые компрессоры

Достоинство компрессоров сухого сжатия – нагнетание газа без загрязнения продуктами смазки.

Недостатки

- 1) высокий уровень шума;
- 2) сравнительно небольшое повышение давления в одной ступени ($\varepsilon \leq 4$).

Винтовые компрессоры

Шум винтового компрессора вреден для здоровья главным образом вследствие высокой частоты звуковых колебаний (200 – 2000 Гц), что определяется числом зубьев и частотой вращения роторов.

Для уменьшения шума винтовые компрессоры снабжают поглощающими и резонансными глушителями, укрывают звукоизолирующими кожухами.

Винтовые компрессоры

Повышение давления в одной ступени ограничено как и в поршневых машинах - конечной температурой сжатия.

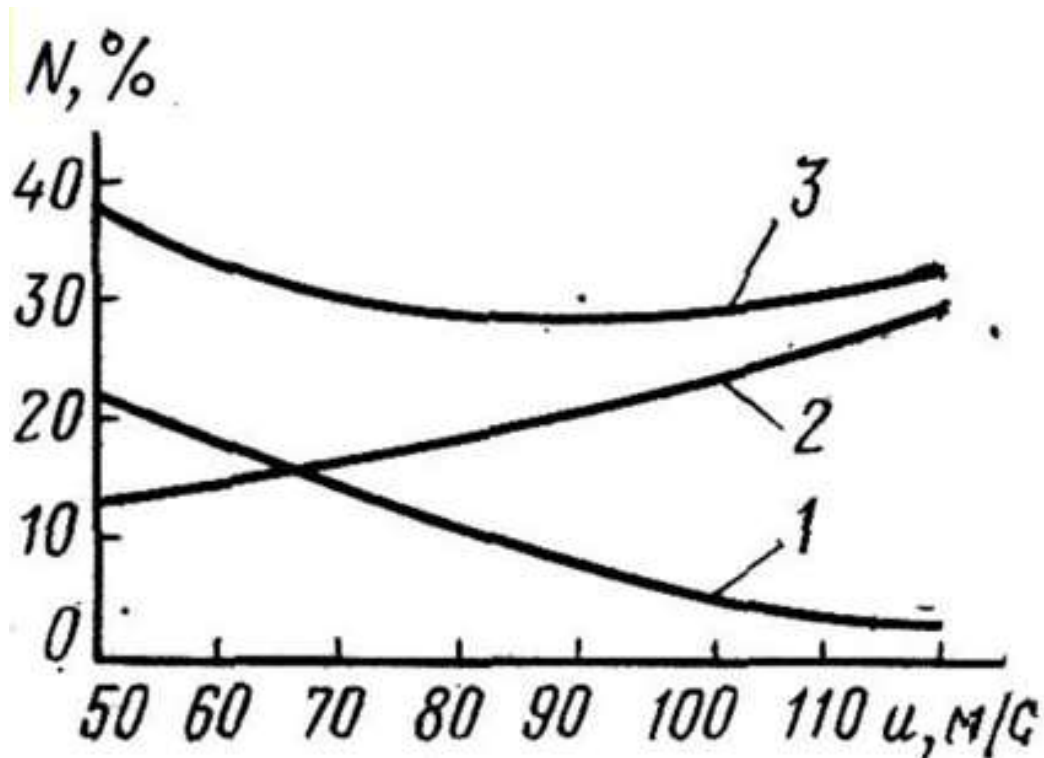
Охлаждение корпуса водой в винтовом компрессоре малоэффективно, так как процесс сжатия газа проходит гораздо быстрее, чем в поршневом.

Вместе с тем превышение определённой температуры при заданных зазорах не допустимо из-за опасности заклинивания роторов при температурных деформациях.

Винтовые компрессоры

Для снижения температуры нагнетания и увеличения допустимого значения ε применяют впрыскивание воды или масла в компрессор. Масло обволакивает тонкой плёнкой винты и уменьшает сечения щелей. Смазываемые винты могут контактировать, поэтому конструктивно маслonaполненный компрессор отличается тем, что в нём отсутствуют шестерни связи.

Винтовые компрессоры



Потери мощности (в % от адиабатической) в зависимости от окружной скорости: 1 – от внутренних перетечек; 2 – газодинамические потери; 3 – суммарные потери

Винтовые компрессоры

Верхняя граница конечного давления в двухступенчатом винтовом компрессоре сухого сжатия ($\approx 1,2$ МПа) обусловлена нагрузочной способностью упорных подшипников, которая не позволяет увеличить разность давлений газа на входе и выходе второй ступени более чем на $0,7 - 0,9$ МПа.

Винтовые компрессоры

Процесс сухого сжатия близок к адиабатическому, так как длительность его очень мала ($< 0,01$ с).

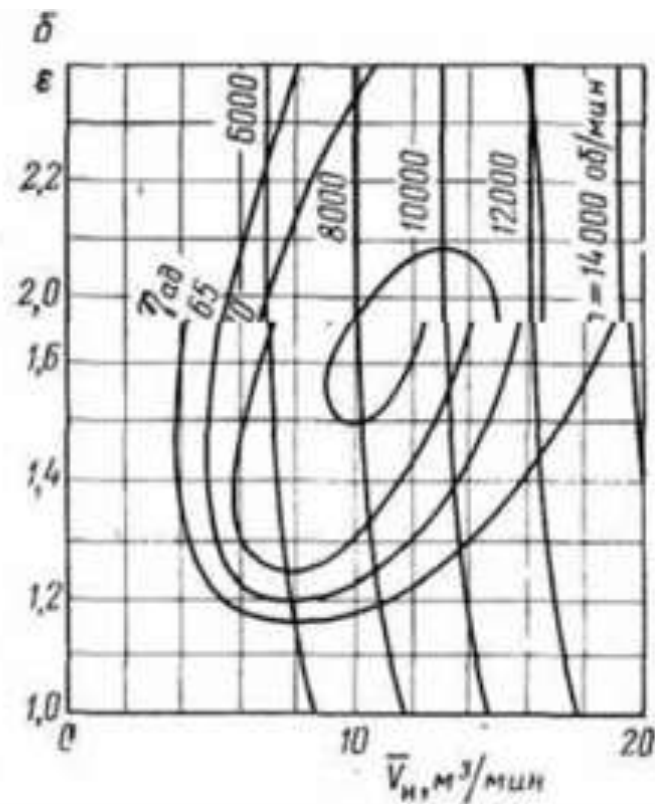
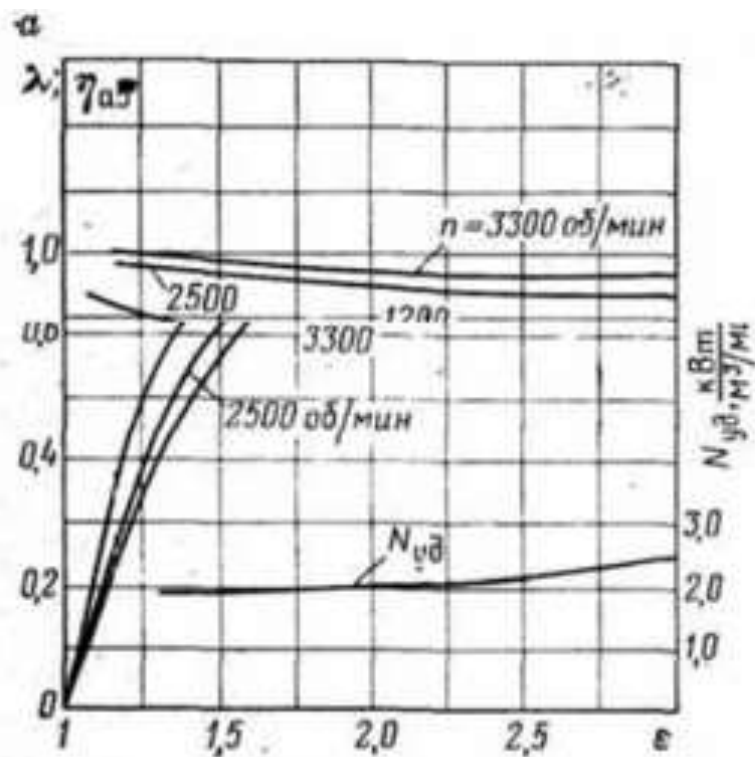
При впрыскивании воды или масла показатель политропы в зависимости от интенсивности охлаждения для воздуха находится в пределах 1,1 – 1,4.

Винтовые компрессоры

Мощность винтового компрессора обычно рассчитывают по адиабатическому КПД, который при сухом сжатии составляет:

- для крупных машин 0,80 – 0,83 при $\varepsilon = 3,2 – 4,2$;
- для средних машин 0,76 – 0,81 при $\varepsilon = 3,2 – 4,2$;
- для малых машин 0,70 – 0,75.

Винтовые компрессоры



Характеристика винтового компрессора:

а – с кривыми удельной мощности; б – с кривыми постоянного адиабатического КПД

Винтовые компрессоры

КПД винтового компрессора так же, как и компрессоров других типов, зависит от частоты вращения вала. Значение оптимальной окружной скорости винтов зависит от соотношения между потерями от внутренних перетеканий газа и газодинамическими потерями

Лопастные компрессоры

Это машина динамического действия, в которой сжатие газа происходит в результате взаимодействия потока с вращающейся и неподвижной решетками лопастей.

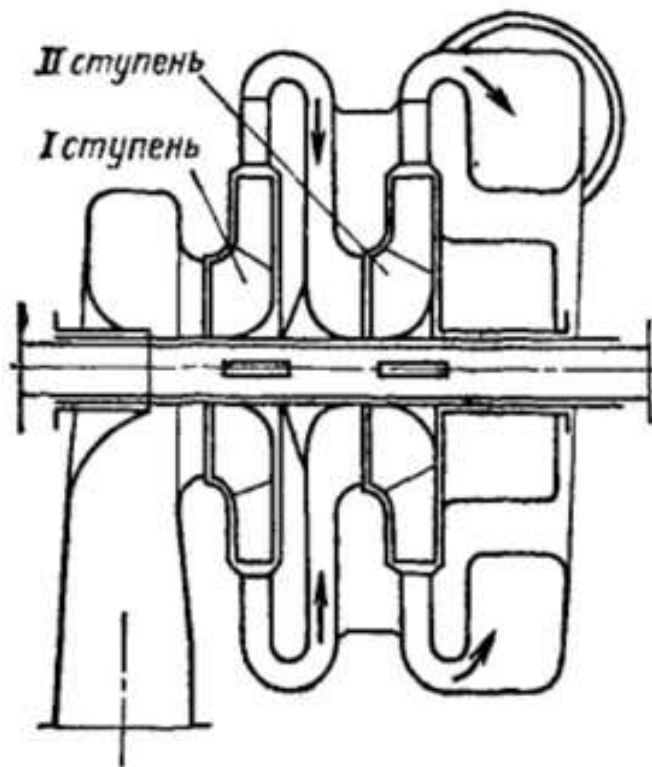
Характерной особенностью лопастных машин является отсутствие пульсации развиваемого ими давления.

Лопастные компрессоры

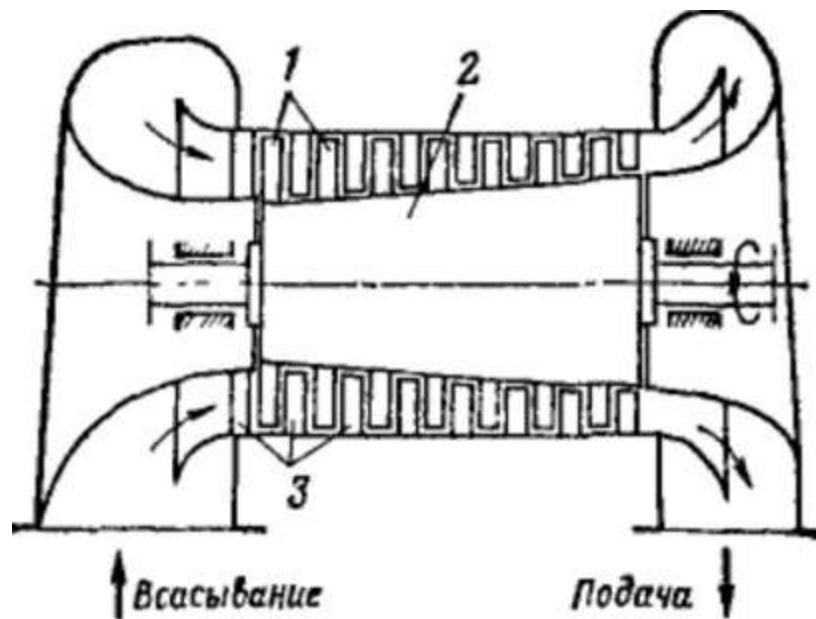
К лопастным компрессорам относятся:

- радиальные (**центробежные**);
- радиально-осевые (диагональные);
- осевые.

Лопастные компрессоры



Конструктивная схема
двухступенчатого
центробежного
компрессора



Конструктивная схема
семиступенчатого
осевого компрессора

Сравнительные характеристики компрессорных машин

Тип	Назначение	Подача, м ³ /мин	Степень повышения давления	Частота вращения n, об/мин
Поршневые	Вакуум.насосы	0-100	1-50	60-1500
	Компрессоры	0-500	2,5-1000	100-3000
Роторные	Вакуум.насосы	0-100	1-50	250-15 000
	Газодувки	0-500	1,1-3	300-15 000
	Компрессоры	0-500	3-12	300-15 000
Центробежные	Газодувки	0-6 000	1-1,15	300-3000
	Вентиляторы	0-5 000	1,1-4	300-3000
	Компрессоры	100-4000	3-20	1500-45 000
Осевые	Вентиляторы	50-10 000	1-1,04	750-10 000
	Компрессоры	100-15 000	2-20	500- 20 000

Техническая характеристика применяемых компрессоров

Элементы характеристики	Обозначение											
	Э500	КТ6, КТ7,	КТ6эл	ПК-35	ПК5,25	ПК3,5	ПК1,75	ВПЗ-4/9	ВВ-1,5/9	ЭК-7Б (ЭК-7В)	К-1	К-2
Номинальная подача, м3/мин	1,75	5,3	2,75	3,5	5,25	3,5	1,75	3,5	1,75	0,62 (0,58)	2,0	2,63
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	200	850	440	1450	1450	1450	1450	1000	1000	560 (540)	700	720
Давление нагнетания, МПа	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9
Расположение цилиндров	Г	W	W	V	V	V	V	Г и В	В	Г	V	W
Число цилиндров: общее	2	3	3	2	6	4	2	2-д	1-д	2	2-д	2
первой ступени	1	2	2	1	3	2	2	2	1	2	2	1
второй ступени	1	1	1	1	3	1	1	2	1		2	1
Диаметр цилиндров, мм:												
первой ступени	245	198	198	190	140			185	185	112	155	155
второй ступени	140	155	155	110	80			152	152	-	125	125
ход поршня, мм	225	144 п 146-1ст 153-2ст	144 п 146-1ст 153-2ст	110	98			80	80	92	100	120
Масса компрессора, кг: общая	670	646	630	350	310			344	238	118*	220	360
на 1 м3/мин	384	122	295	108	59			114	136	190 (203)	110	137
Потребляемая мощность, кВт: общая	15	44	24,2	32	37			21	13,3	5,0 (4,7)	17,6	18,7
на 1 м3/мин	8,6	8,3	8,76	9,15	7,04			7,02	7,6	8,06 (8,1)	8,8	7,2

Термодинамика компрессорных машин

Простейшая теория компрессоров основывается на термодинамике *идеального* газа

$$P = \rho \cdot R \cdot T$$

При конечном давлении $p_2 > 10 \text{ МПа}$ используют уравнение состояния реального газа

$$P = z \cdot \rho \cdot R \cdot T,$$

z – коэффициент сжимаемости.

Термодинамика компрессорных машин

Основные уравнения и процессы , характерные для компрессорных машин

Термодинамика компрессорных машин

Основные уравнения и процессы , характерные для компрессорных машин

процес с	характеристика процесса	соотношение между параметрами	подведенное тепло ΔQ	внутренняя энергия ΔU	работа, совершаемая системой A
изохорический	$V = Const$	$\frac{P}{T} = Const$	$\Delta Q = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T$ $C_V = \frac{i}{2} R$	$\Delta U = \Delta Q$	$A = 0$
изобарический	$P = Const$	$\frac{V}{T} = Const$	$\Delta Q = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T$ $C_p = \frac{i+2}{2} R$	$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$ или $\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T$	$dA = p dV$ $A = p(V_2 - V_1)$

Термодинамика компрессорных машин

Основные уравнения и процессы , характерные для компрессорных машин

процес с	характеристика процесса	соотношение между параметрами	подведенное тепло ΔQ	внутренняя энергия ΔU	работа, совершаемая системой A
изотермический	$T=Const$	$pV = Const$	$\Delta Q=A$	$\Delta U=0$	$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$
адиабатный	$\Delta Q=0$	$pV^\gamma = Const$ $TV^{\gamma-1} = Const$ $Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = Const$ $\gamma = \frac{i+2}{i}$	$\Delta Q=0$	$ \Delta U = A $	$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma-1} \left\{ 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right\}$

Термодинамика компрессорных машин

Политро́пный процесс, политропический процесс - термодинамический процесс, во время которого теплоёмкость газа остаётся неизменной.

Термодинамика компрессорных машин

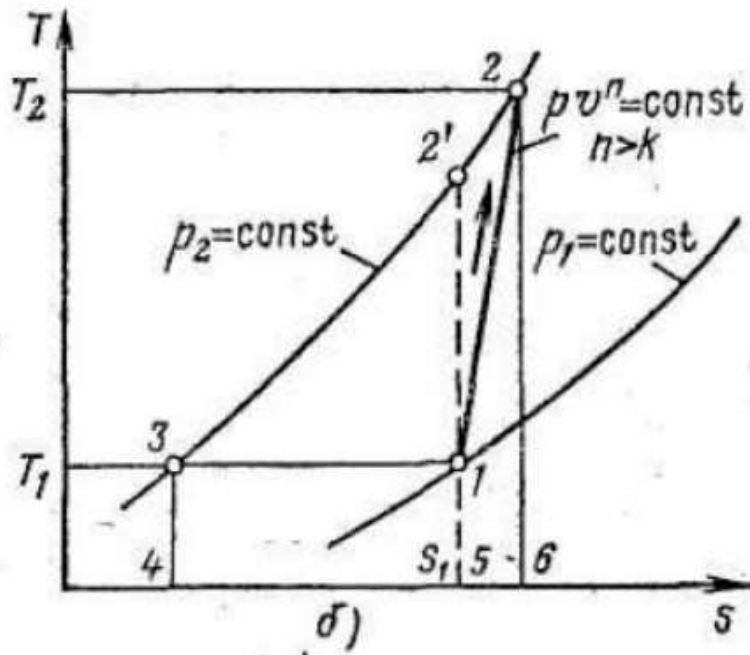
Основные уравнения и процессы , характерные для компрессорных машин

процес с	характеристика процесса	соотношение между параметрами	подведенное тепло ΔQ	внутренняя энергия ΔU	работа, совершаемая системой A
политропический	—	$pV^n = Const$ $TV^{n-1} = Const$ $Tp^{\frac{1-n}{n}} = Const$	$\Delta Q = \frac{m}{\mu} G \Delta T$ $C = R \frac{n-\gamma}{(\gamma-1)(n-1)}$	$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$	$A = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right\}$

где n – показатель политропы

Графики процессов в ST-диаграмме

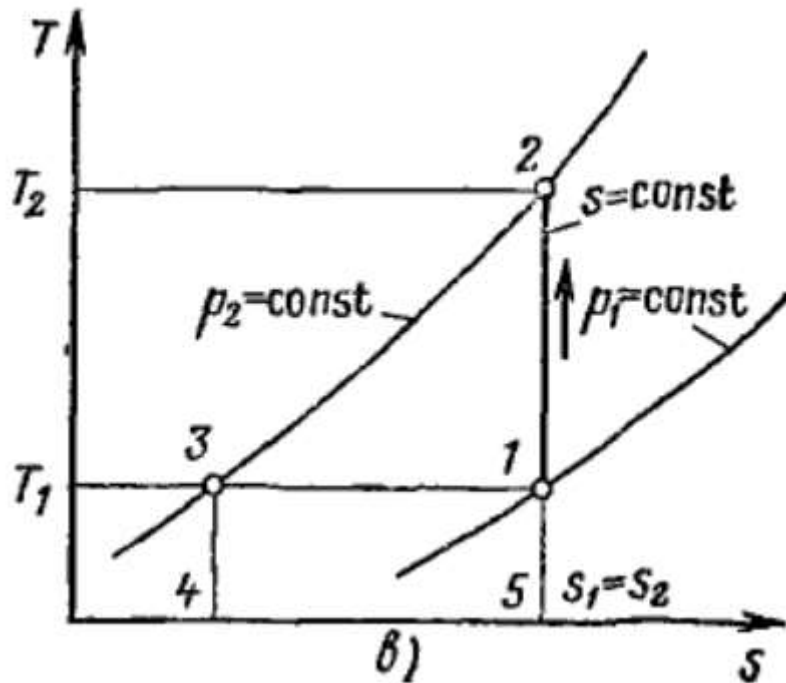
Политропный $n > k$



*Лопастные
компрессоры с
неинтенсивным
охлаждением*

Графики процессов в ST -диаграмме

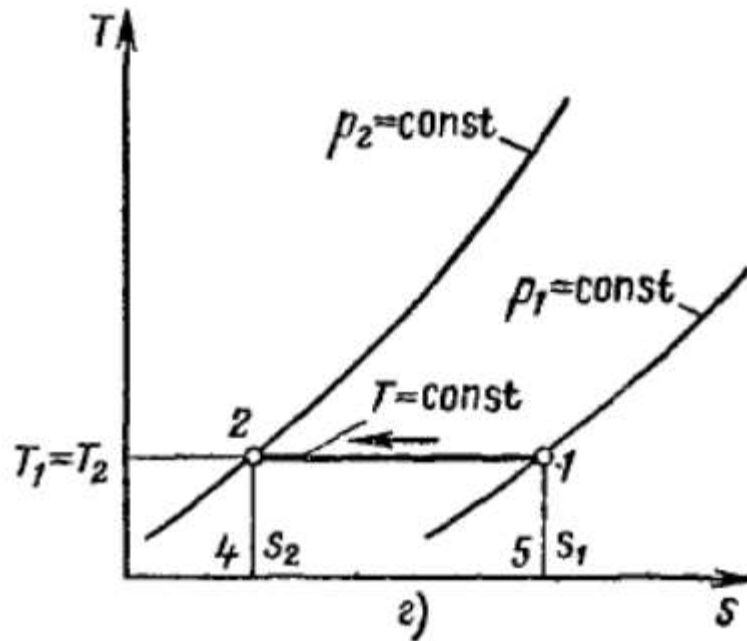
Изоэнтропийный процесс с $S=\text{const}$



*Неосуществим из-за
влияния внутреннего
газового трения*

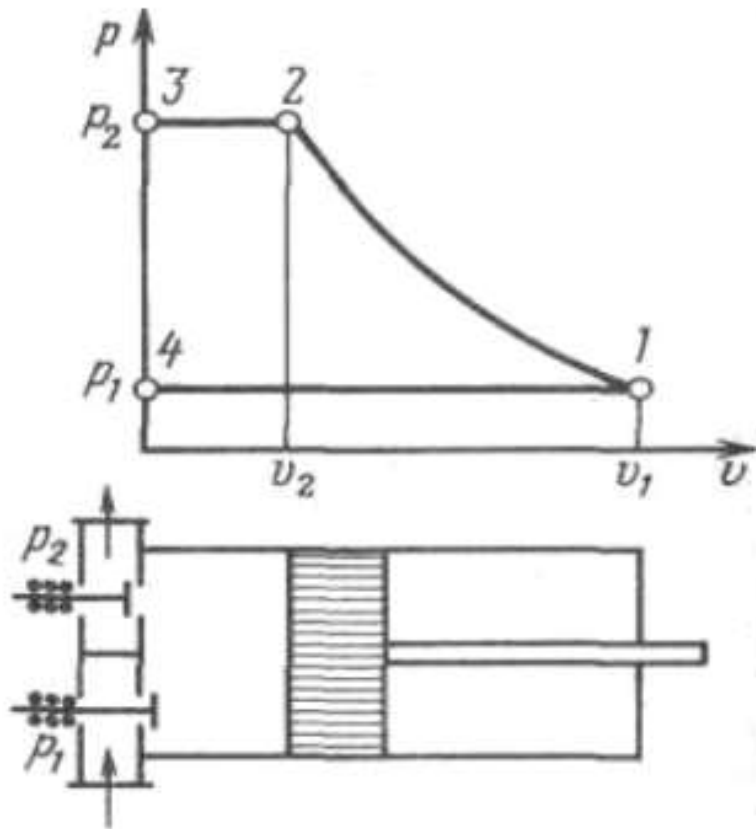
Графики процессов в ST -диаграмме

Изотермический процесс с $T = \text{const}$



Неосуществим, т.к. невозможно сжатие газа без повышения температуры

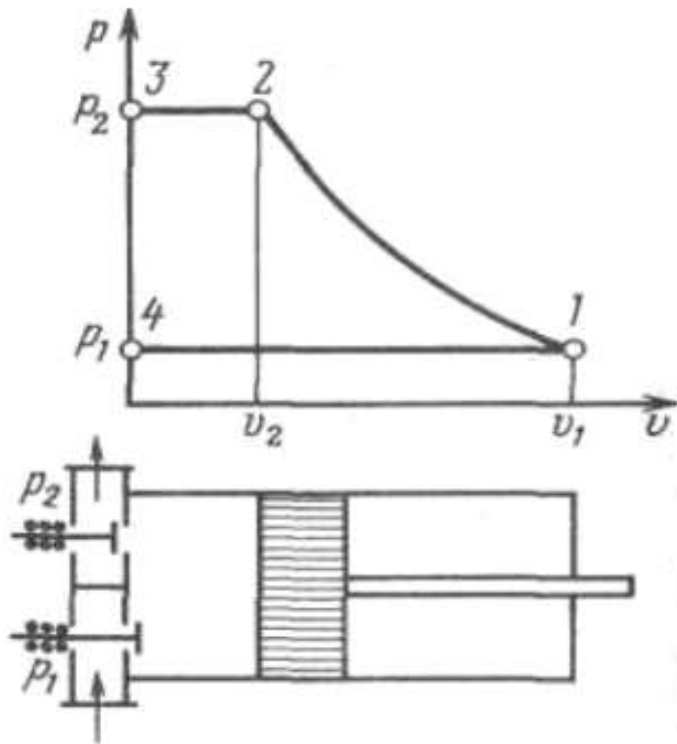
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная диаграмма
идеального поршневого
компрессора

Принцип действия поршневого компрессора: при движении поршня слева направо давление в цилиндре становится меньше давления p_1 открывается всасывающий клапан. Цилиндр заполняется газом

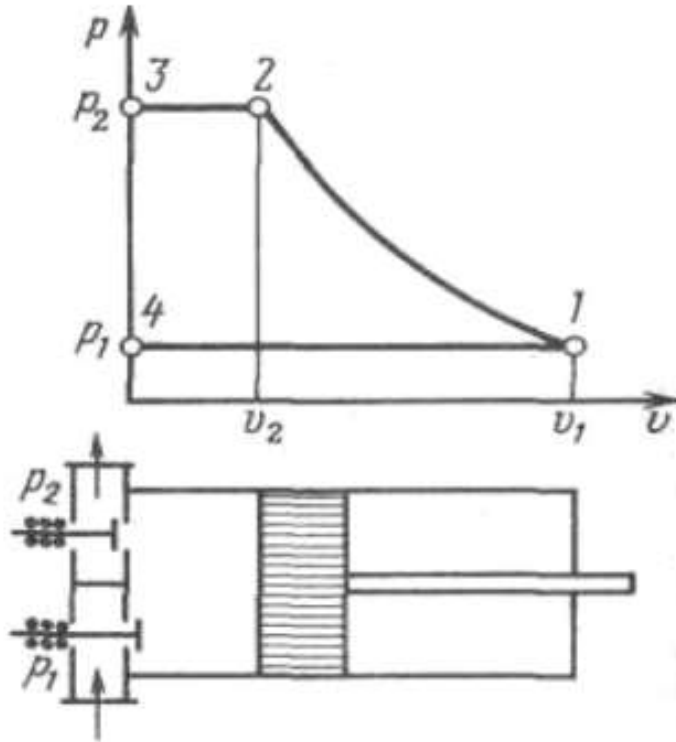
Индикаторная диаграмма компрессора



Всасывание изображается на индикаторной диаграмме линией 4-1. При обратном движении поршня всасывающий клапан закрывается, и газ сжимается по линии 1-2.

Индикаторная диаграмма
идеального поршневого
компрессора

Индикаторная диаграмма компрессора



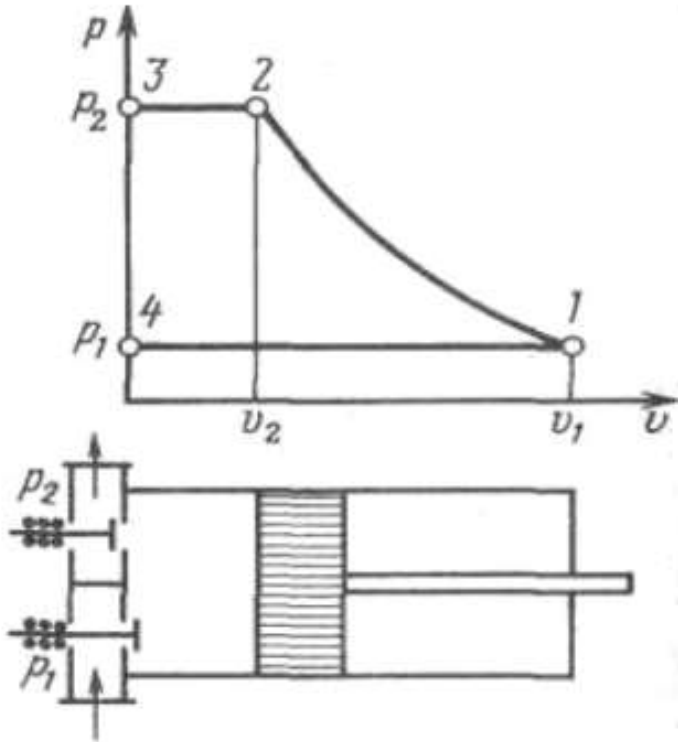
Индикаторная диаграмма
идеального поршневого
компрессора

Давление в цилиндре увеличивается до тех пор, пока не станет больше p_1 . Нагнетательный клапан открывается, и газ выталкивается поршнем в сеть (линия 2-3).

Затем нагнетательный клапан закрывается, и все процессы повторяются.

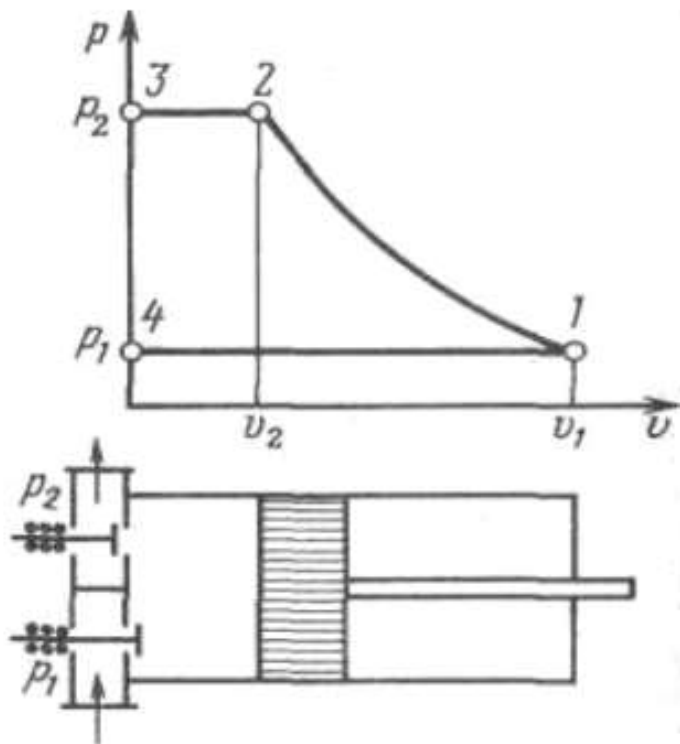
Индикаторная диаграмма компрессора

Индикаторную диаграмму не следует смешивать с p, v -диаграммой, которая строится для постоянного количества вещества.



Индикаторная диаграмма
идеального поршневого
компрессора

Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная диаграмма
идеального поршневого
компрессора

В индикаторной диаграмме линии всасывания 4-1 и нагнетания 2-3 не изображают термодинамические процессы, так как состояние рабочего тела в них остается постоянным — меняется только его количество.

Индикаторная диаграмма компрессора

Чтобы приблизить процесс сжатия к изотермическому, необходимо отводить от сжимаемого в компрессоре газа теплоту. Это достигается путем охлаждения наружной поверхности цилиндра водой, подаваемой в рубашку, образуемую полыми стенками цилиндра.

Однако практически сжатие газа осуществляется по политропе с показателем $n = 1,18 - 1,2$, поскольку достичь значения $n = 1$ не удастся.

Индикаторная диаграмма компрессора

Для получения газа высокого давления применяют многоступенчатые компрессоры, в которых процесс нескольких последовательно соединенных цилиндров с промежуточным охлаждением газа после каждого сжатия.

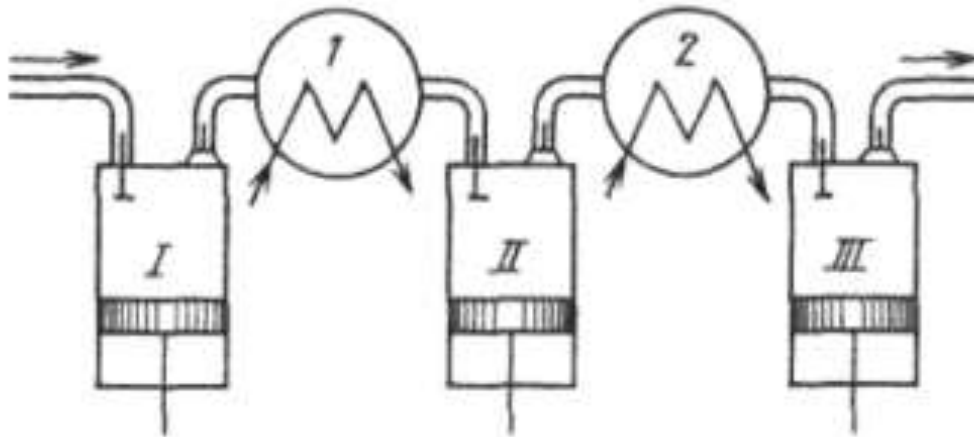
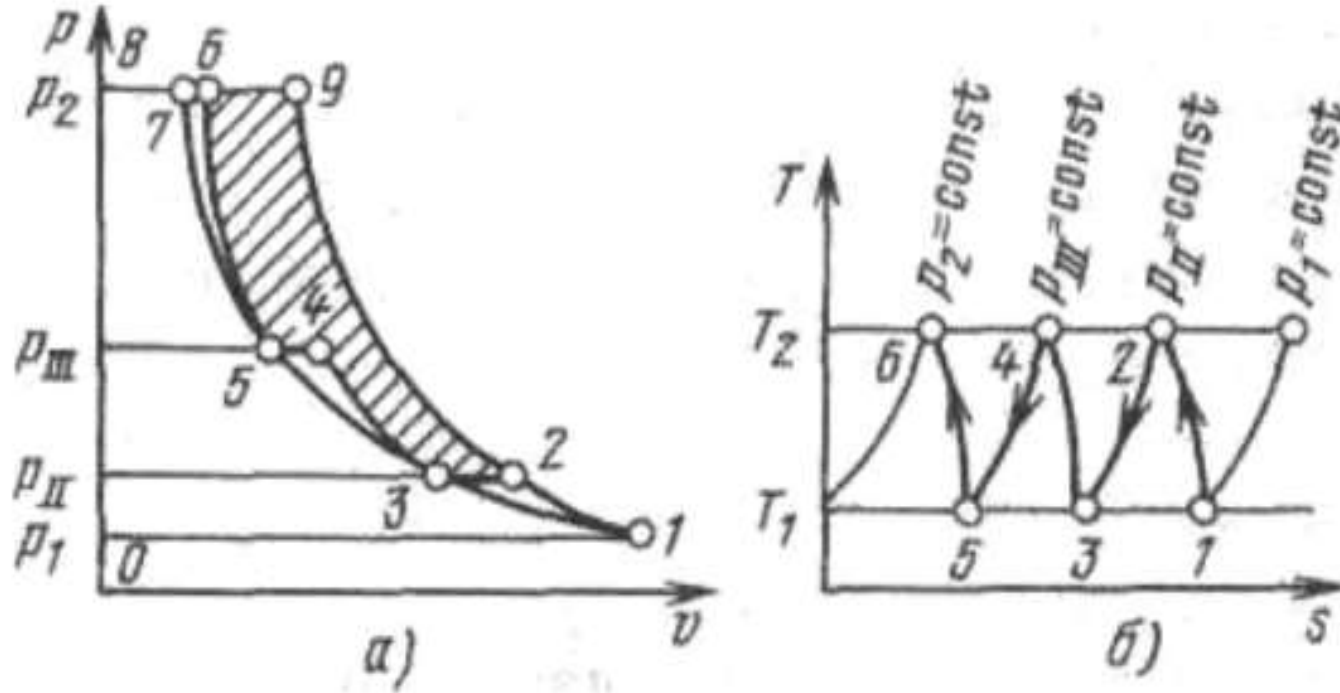


Схема многоступенчатого компрессора:
I – III - ступени сжатия; 1, 2 - промежуточные холодильники.

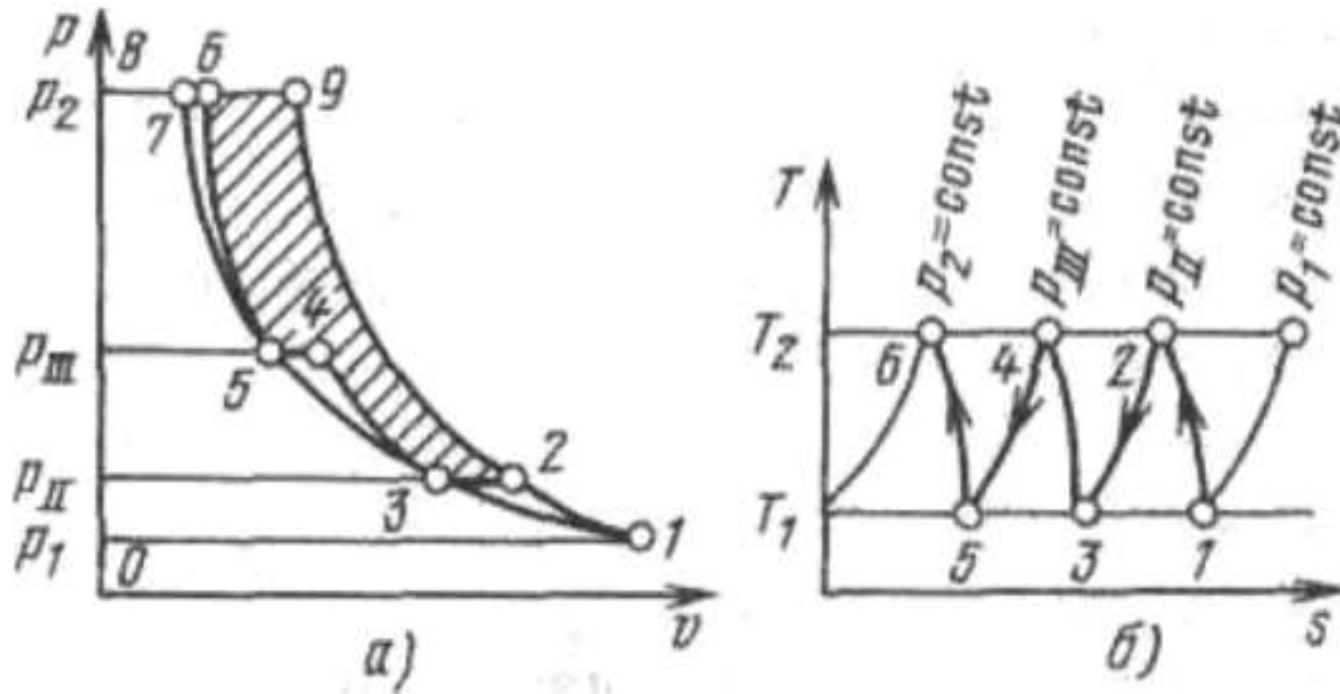
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная диаграмма
трехступенчатого компрессора

В первой ступени компрессора газ сжимается по политропе до давления p_{II} , затем он поступает в промежуточный холодильник 1, где охлаждается до начальной температуры T_1 .

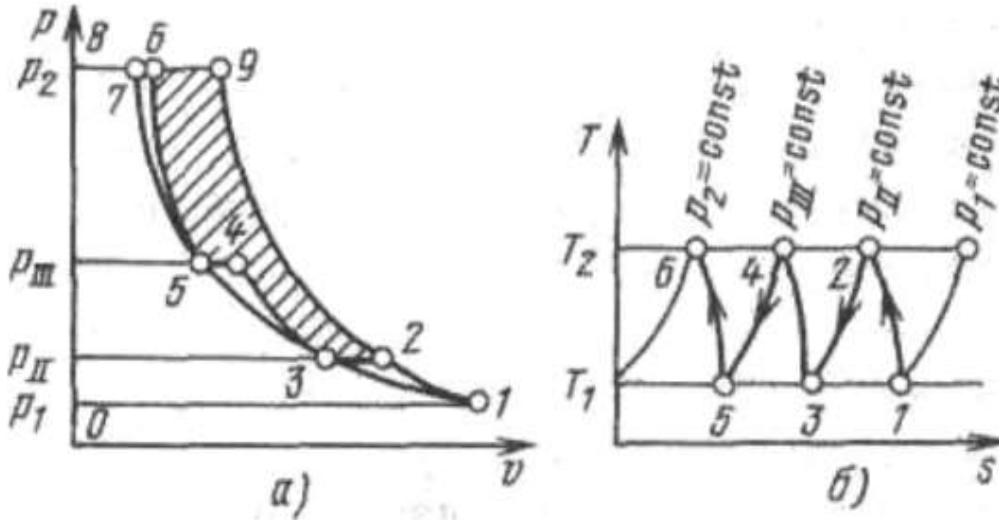
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная диаграмма
трехступенчатого компрессора

Сопротивление холодильника по воздушному тракту с целью экономии энергии, расходуемой на сжатие, делают небольшим.

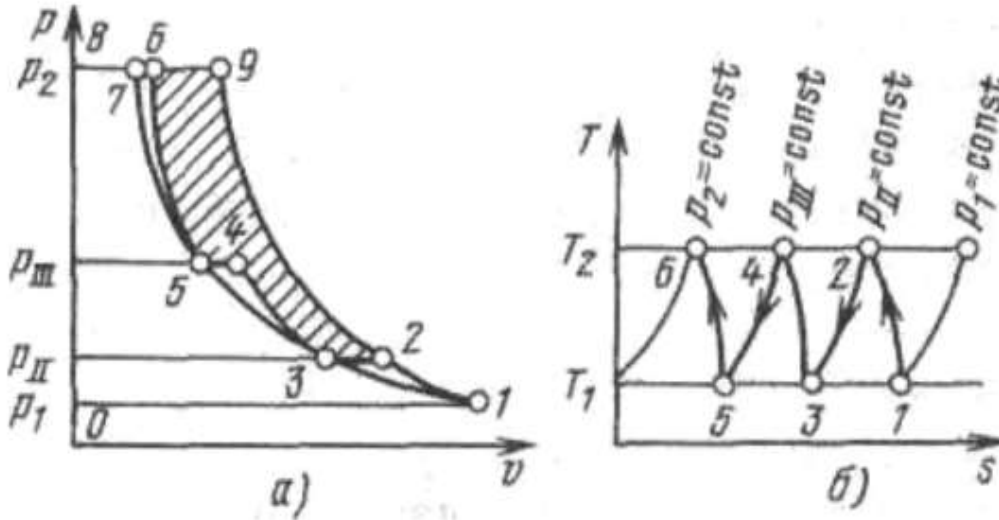
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная
диаграмма
трехступенчатого
компрессора

Это позволяет считать процесс охлаждения газа изобарным. После холодильника газ поступает во вторую ступень и сжимается по политропе до p_{III} , затем охлаждается до температуры T_1 в холодильнике 2 и поступает в цилиндр третьей ступени, где сжимается до давления p_2 .

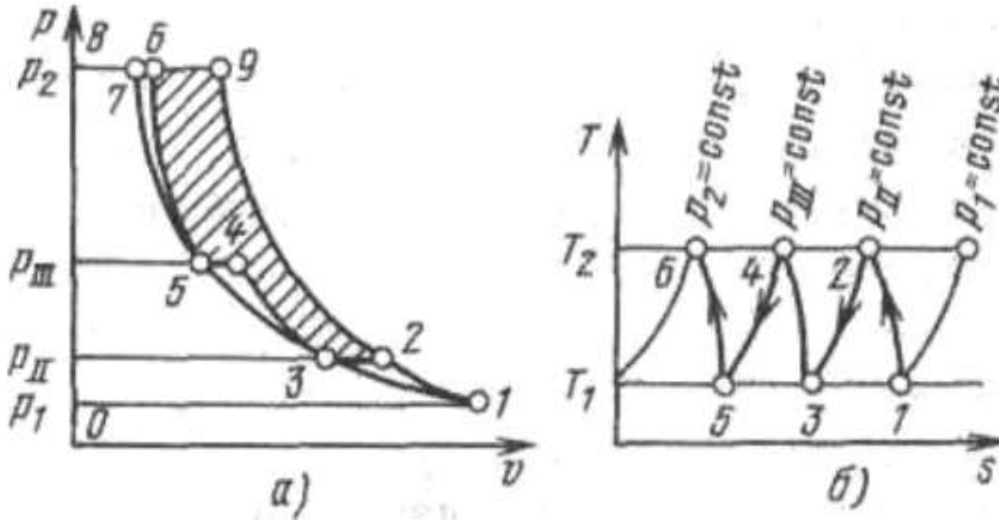
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная
диаграмма
трехступенчатого
компрессора

Если бы процесс сжатия осуществлялся по изотерме 1-3-5-7, то работа сжатия была бы минимальна. При сжатии в одноступенчатом компрессоре по линии 1-9 величина работы определялась бы площадью 0-1-9-8. Работа трехступенчатого компрессора определяется площадью 0-1-2-3-4-5-6-8.

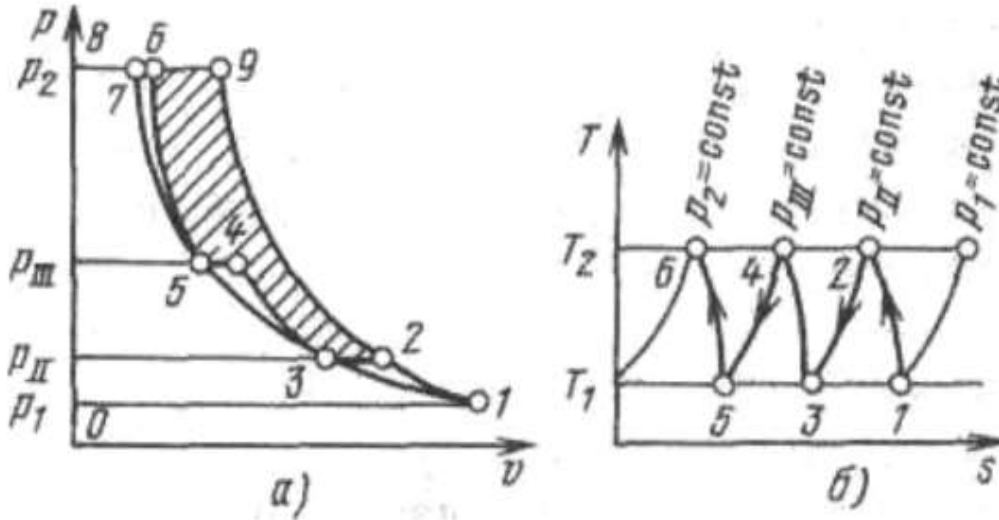
Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная
диаграмма
трехступенчатого
компрессора

Заштрихованная площадь показывает уменьшение затрат, работы от применения трехступенчатого сжатия. Чем больше число ступеней сжатия и промежуточных охладителей, тем ближе процесс к наиболее экономичному - изотермическому, но тем сложнее и дороже конструкция компрессора.

Индикаторная диаграмма компрессора



Индикаторная
диаграмма
трехступенчатого
компрессора

Поэтому вопрос о выборе числа ступеней, обеспечивающих требуемую величину p_2 , решается на основании технических и технико-экономических соображений.

Индикаторная диаграмма компрессора

Процессы сжатия в реальном компрессоре характеризуются наличием внутренних потерь на трение, поэтому работа, затрачиваемая на сжатие газа, оказывается больше.

Эффективность работы реального компрессора определяется относительным внутренним КПД, представляющим собой отношение работы, затраченной на привод идеального компрессора, к действительной.

Уравнение энергии компрессорного процесса

Энергия, затрачиваемая на сжатие и выталкивание 1 кг газа

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} + L = i_2 + \frac{c_2^2}{2} \pm q,$$

$$L = c_p (T_2 - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \pm q.$$

Параметры торможения

Если изознтропный газовый поток с температурой T и скоростью с полностью затормаживается, то его энергия превращается в теплоту, а температура газа повышается до T^* (давление до p^*)

$$T^* = T + \frac{c^2}{2c_p}.$$

$$p^* = p \left(\frac{T^*}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Мощность компрессора

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot L}{1000 \cdot \eta_0 \cdot \eta_M}$$

где ρ - плотность газа, поступающего в компрессор, кг/м³ ;

Q – объемная подача компрессора, м³/с;

L – удельная энергия компрессорного процесса, Дж/кг;

η_0 – объемный коэффициент, учитывающий потери объема газа через зазоры уплотнений;

η_M – механический КПД компрессора, учитывающий расход энергии на преодоление механического трения и привод вспомогательных механизмов (в случае привода от вала компрессора)

КПД компрессор

Совершенство компрессорного процесса оценивают при помощи двух относительных термодинамических КПД:

изотермического и изоэнтропного

$$\eta_{из} = \frac{L_{из}}{L}$$

$$\eta_a = \frac{L_a}{L}$$

В формулах для КПД $L_{из}$ и L_a – удельные энергии изотермического и изоэнтропного процессов

$$L_a = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_{2a} - T_1)$$

$$L_{из} = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

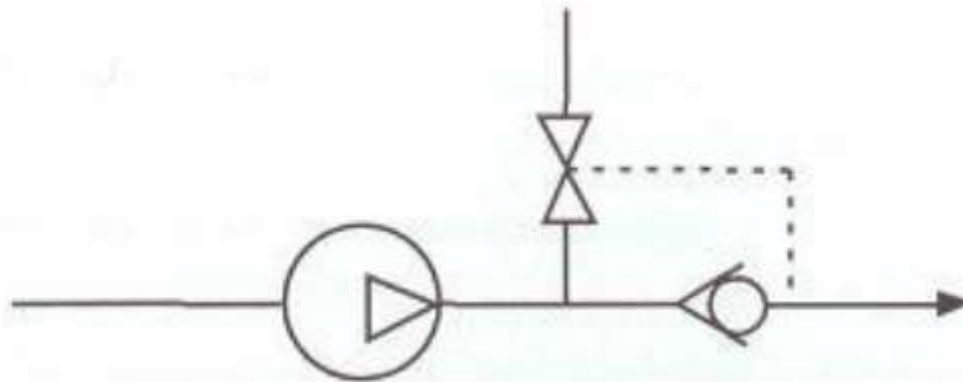
КПД компрессор

Изотермический КПД $\eta_{из}$ применяют для оценки компрессоров с интенсивно действующим водяным охлаждением (поршневых и роторных).
Для этих компрессоров изотермический процесс является эталонным.

Изоэнтропный КПД η_a применяют для оценки компрессоров с неинтенсивно действующим водяным охлаждением (центробежные и осевые).
Для этих компрессоров изоэнтропный процесс является эталонным.

Способы регулирования поршневых компрессоров

Сброс давления. Первоначально для регулирования компрессора использовался разгрузочный клапан, который стравливал превышающее норму давление в атмосферу.



Способы регулирования поршневых компрессоров

Сброс давления с дросселированием входа.

Часто используемый способ регулирования, который сочетает максимальный диапазон регулирования (0-100%) с низким потреблением энергии — только 15-20% мощности полной нагрузки при разгруженном компрессоре (нулевой поток).

Способы регулирования поршневых компрессоров

Пуск/останов. Давление компрессоров мощностью менее 5—10 кВт часто регулируется следующим образом. При достижении давления верхнего предела, электродвигатель останавливается, а при снижении давления до нижнего предела электродвигатель запускается.

Этот способ требует воздушного ресивера большого объема или большой разницы между давлениями пуска и останова.

Это эффективный способ регулирования, однако следует иметь в виду, что количество пусков в единицу времени должно быть невелико.

Выбор компрессоров

Исходные данные для выбора компрессоров:

1) объёмный расход газа на входе в компрессор или, в общем случае, расход сжатия газа и вероятный режим его потребления;

2) давлению в воздухохоборнике, или задаваемое по назначенному режиму трубопровода, технологической установки и т. п.;

Выбор компрессоров

3) условия всасывания (температура, давление, относительная влажность газа на приёме или диапазон изменения этих величин);

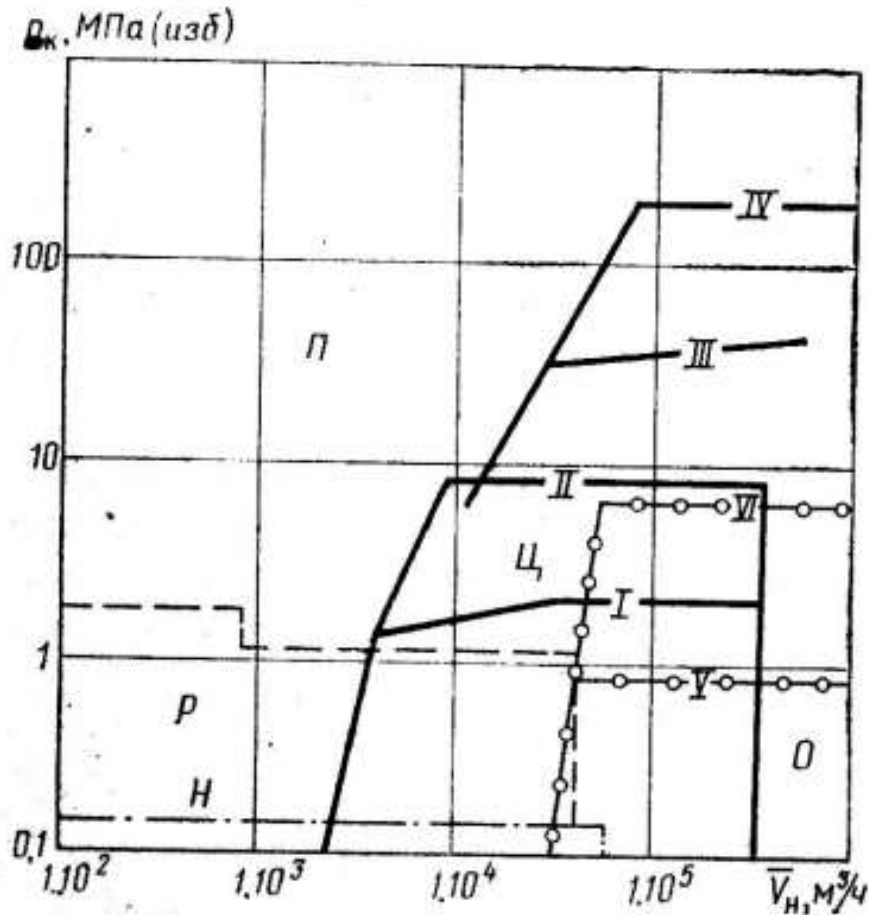
4) характеристика перекачиваемого газа (молярный состав, загрязнённость, токсичность, способность к полимеризации и др.);

Выбор компрессоров

5) вид привода или требования к нему;

6) особые требования (отсутствие смазки в газовом тракте; ограничение массы машин, её габаритов, вибрации, уровня шума; герметичность машины и др.).

Выбор компрессоров



П – поршневые;
Р – роторных;
Ц – центробежные;
О – осевых;
Н – коловратные;
I – центробежные компрессоры;
III, IV - двухкорпусные центробежные компрессоры;
V, VI - осевых компрессоры

Области применения компрессоров

Автоматизация компрессоров

Система автоматизации представлена следующими элементами.

- *Автоматический контроль и регистрация* показателей работы установки. Наиболее важная информация передаётся на центральный пульт.

Автоматизация компрессоров

- *Сигнализация контрольная и аварийно-предупредительная*

! Задача

контрольной сигнализации - информировать о состоянии регулирующих органов («включено», «выключено»);
аварийно – предупредительной сигнализации – предупреждать световыми или звуковым сигналом о недопустимом отклонении контролируемых величин от заданных

Автоматизация компрессоров

- *Блокировка защитная или защитно - разрешающая.*

Защитная блокировка автоматической остановкой компрессора предотвращает аварию при перегрузке двигателя, в случае недостатка смазки и охлаждающей воды, при значительных отклонениях давления и температуры газа по ступеням от номинальных их значений, при повышении температуры подшипников и т. д.

Автоматизация компрессоров

Защитно – разрешающая блокировка предотвращает ошибочные действия автоматического управления или обслуживающего персонала, например, пуск машины без охлаждения и др.

Автоматизация компрессоров

- **Автоматическое регулирование** поддерживает в определённом интервале давление в воздухохборнике или в трубопроводе, изменяя подачу компрессоров или осуществляя их автоматический запуск и остановку
- **Автоматическое управление** обеспечивает подготовку к пуску, управление работой и выключение основного и вспомогательного оборудования в определённой последовательности.

Автоматизация компрессоров

Системы автоматизации бывают электрические, механические и смешанные.

Автоматизация может быть частичной или полной.

Степень автоматизации зависит от назначения, условий работы и конструкции агрегата

Контроль знаний

1. Какие машины предназначены для подачи газовых сред?

- а) насос
- б) вентилятор
- в) газодувка
- г) компрессор
- д) гидropередача

2. Какое отношение давления на выходе к давлению на входе ϵ принято для компрессоров?

- а) $\epsilon=1,15$
- б) $\epsilon>1,15$
- в) $\epsilon<1,15$

3. К какому классу относится центробежный насос?

- а) объёмный
- б) динамический
- в) вихревой
- г) струйный

Контроль знаний

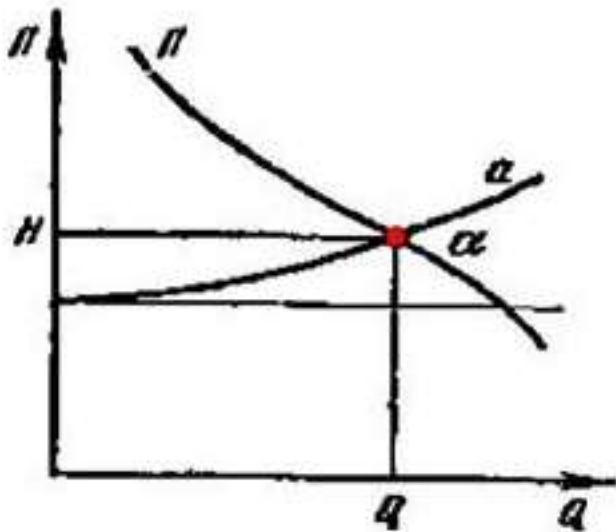
4. Какой насос изображён на рисунке?



- а) центробежный
- б) лопастной
- в) осевой
- г) шнековый

Контроль знаний

5. Как называется точка пересечения характеристики насоса Q-H и характеристики трубопровода (а)?



- а) точка совместного функционирования
- б) точка максимального КПД
- в) рабочая точка

6. К какому классу относятся поршневые насосы?

- а) объёмному
- б) динамическому
- в) центробежному

7. К какому классу относятся плунжерные насосы?

- а) динамическому
- б) объёмному
- в) центробежному

8. Что называется индикаторной диаграммой поршневого насоса?

- а) график изменения КПД за один полный оборот кривошипа
- б) график изменения мощности за один полный оборот кривошипа
- в) график изменения давления в цилиндре за один полный оборот кривошипа

Контроль знаний

9. В какой машине применяется охлаждение?

- а) центробежном насосе
- б) поршневом насосе
- в) осевом насосе
- г) поршневом компрессоре

10. Элемент какого компрессора показан на рисунке?



- а) поршневого
- б) осевого
- в) пластинчатого
- г) жидкостнокольцевого