

План лекции:

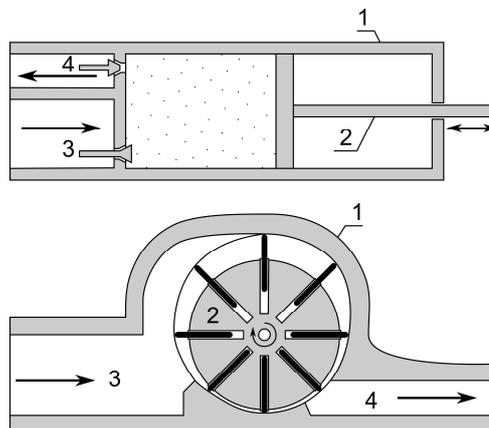
1. Компрессоры. Индикаторная диаграмма
2. Многоступенчатое сжатие в компрессоре
3. Эжектор
4. Вопросы для дистанционного освоения лекции

1. КОМПРЕССОРЫ. ИНДИКАТОРНАЯ ДИАГРАММА

Компрессором называют машину для сжатия газов. Различные типы компрессоров широко применяются в самых разнообразных областях техники.

По конструкционным признакам компрессоры подразделяют на две группы - **объемные** (или, как их иногда называют, компрессоры статического сжатия) и **лопаточные** (или компрессоры динамического сжатия).

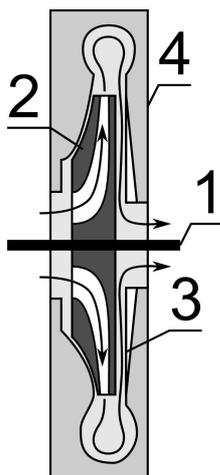
В свою очередь объемные компрессоры делятся на два типа - **поршневые и ротационные**, а лопаточные компрессоры на **центробежные и осевые** (или аксиальные).



Рассмотрим принцип действия **поршневого компрессора**. В цилиндре 1 движется поршень 2, совершающий возвратно-поступательное движение. При движении поршня слева направо происходит всасывание рабочего тела (при этом клапан 3 открыт) при практически постоянном давлении. После того как поршень дойдет до правого крайнего положения, процесс всасывания закончится, клапан 3 закроется и поршень начнет двигаться в обратном направлении - справа налево. Давление газа в цилиндре повышается. Когда давление газа достигнет значения, несколько превышающего давление в резервуаре, куда подается газ, откроется клапан 4 и сжатый газ поступит в этот резервуар. Дойдя до левого крайнего положения, поршень вновь начинает двигаться слева направо, и процесс повторится. Поршню сообщается движение от внешнего источника работы (электромотора, двигателя внутреннего сгорания и т. п.).

В **ротационном компрессоре** роль поршня выполняет ротор. В корпусе компрессора 1 вращается ротор 2, расположенный эксцентрично относительно корпуса. В теле ротора имеются пазы, в них скользят пластинки, которые под действием центробежной силы всегда прижаты к стенке корпуса. По входному патрубку 3 в корпус компрессора засасывается газ из резервуара низкого давления. Порция газа, находящегося между двумя соседними пластинками, сжимается, поскольку, объем этого газа уменьшается при вращении ротора за счет эксцентricности ротора относительно корпуса.

Сжатый газ выбрасывается в выходной патрубок 4. Как видно из этой схемы, принцип действия ротационного компрессора аналогичен принципу действия поршневого.

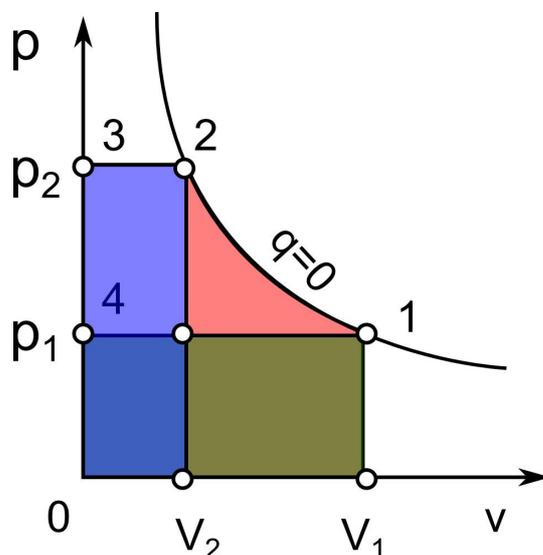


Принцип действия **лопаточных компрессоров** ясен из схемы центробежного компрессора. На валу 1 укреплен диск 2, снабженный рабочими лопатками. Вал с диском вращается, и газ, всасываемый через входной патрубок и поступающий в зазор между лопатками, захватывается этими лопатками и приобретает высокую скорость - вращение диска сообщает газу большую кинетическую энергию. Далее этот газ, имеющий высокую скорость, поступает в диффузор 3, лопатки которого укреплены в неподвижном корпусе 4 компрессора. В диффузоре скорость газа уменьшается, и за счет торможения его кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию давления. Газ высокого давления отводится через выходной патрубок.

В **осевом компрессоре** газ перемещается вдоль оси и сжимается в нескольких ступенях, состоящих из рабочих колес и направляющих аппаратов.

Несмотря на большие конструкционные различия компрессоров разных типов, термодинамические принципы их действия аналогичны.

Рассмотрим процесс сжатия в поршневом компрессоре. Анализ этого процесса удобно проводить с помощью так называемой **индикаторной диаграммы компрессора**. Эта диаграмма показывает зависимость давления в цилиндре компрессора от переменного объема газа в цилиндре. Индикаторная диаграмма записывается специальным прибором - **динамометрическим индикатором**, присоединенным к компрессору.



Точка 1 соответствует такому положению поршня в цилиндре компрессора, когда весь компрессор заполнен газом низкого давления (поршень находится в крайнем правом

положении). Объем газа при этом равен V_1 . Кривая 1-2 соответствует процессу сжатия газа в компрессоре от давления p_1 до давления p_2 при закрытых всасывающем и нагнетательном клапанах. В точке 2 процесс сжатия заканчивается - газ достигает нужного давления p_2 . Объем газа в конце процесса сжатия - V_2 . Поскольку в течение процесса сжатия оба клапана (всасывающий и нагнетательный) остаются закрытыми, количество газа в процессе сжатия неизменно. Точка 2 соответствует моменту открытия нагнетательного клапана, а линия 2-3 - процессу выталкивания газа из цилиндра в резервуар высокого давления. В процессе 2-3 количество газа, находящегося в цилиндре, уменьшается. Точка 4 соответствует открытию всасывающего клапана, а линия 4-1 изображает процесс всасывания в цилиндр газа из резервуара низкого давления p_1 . В процессе 4-1 количество газа в цилиндре увеличивается от нуля до значения, соответствующего заполнению цилиндра в точке 1.

Не следует смешивать индикаторную диаграмму с p, V - диаграммой: p, V - диаграмма строится для постоянного количества вещества, а индикаторная диаграмма, как мы видим, изображает процессы в цилиндре, количество газа в котором переменное. Свойствами p, V - диаграммы обладает лишь та часть индикаторной диаграммы, которая соответствует процессу с постоянным количеством вещества, т.е. кривая 1-2.

Определим работу, которая затрачивается на сжатие газа. Работа, затрачиваемая на сжатие газа в процессе 1-2, определяется соотношением:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p dV < 0. \quad (1)$$

Очевидно, что работа сжатия всегда отрицательна и представляет собой площадь под кривой 1-2. Работу, совершаемую над сжатым газом, в процессе его выталкивания в резервуар высокого давления и работу, совершаемую газом низкого давления, при всасывании в цилиндр можно определить так:

$$\begin{aligned} L_{2-3} &= -p_2 Fx = -p_2 V_2 < 0 \\ L_{4-1} &= p_1 Fx = p_1 V_1 > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Переключение клапанов со всасывания к выталкиванию газа из цилиндра происходит при постоянном объёме, а значит работа в этом процессе равна 0:

$$L_{3-4} = 0. \quad (3)$$

Суммируя выражения для работы в процессах сжатия газа (1)-(3), получим, формулу для **технической работы компрессора**:

$$L = L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-1} = \int_{V_1}^{V_2} p dV - p_2 V_2 + p_1 V_1 = \int_{V_1}^{V_2} d(pV) - \int_{p_1}^{p_2} V dp - p_2 V_2 + p_1 V_1 \quad (4)$$

$$L = - \int_{p_1}^{p_2} V dp$$

Как видно, техническая работа компрессора существенно больше непосредственно работы сжатия в процессе 1-2.

Следует стремиться организовать цикл компрессора таким образом, чтобы работа L , затрачиваемая в цикле на сжатие газа от давления p_1 до давления p_2 , была возможно меньшей, а также чтобы температура газа после сжатия была не слишком высокой, во

всяком случае заведомо ниже температуры воспламенения масла, применяемого для смазки внутренних стенок цилиндра.

Целесообразно рассмотреть три варианта процесса сжатия: **по адиабате, по изотерме и по политропе, расположенной между адиабатой и изотермой.**

Если процесс сжатия в компрессоре осуществляется достаточно быстро, а цилиндр компрессора снабжен теплоизоляцией, то такой процесс сжатия с хорошим приближением можно считать адиабатным.

Если же предположить, что цилиндр компрессора помещен в термостат, в котором поддерживается температура T_1 (температура газа в начале процесса сжатия - точка 1), и обеспечен идеальный теплообмен между газом в цилиндре и термостатом, то теплота, выделяющаяся при сжатии газа, будет отводиться в термостат, и процесс сжатия будет идти по изотерме $T_1 = \text{const}$. Как известно, зависимость для изотермы на p, V - диаграмме имеет более пологий характер, чем для адиабаты. Отсюда следует, применение изотермического сжатия в компрессоре является энергетически более выгодным. Кроме того, изотермическое сжатие наилучшим образом удовлетворяет и второму упомянутому нами условию - возможно более низкой температуре газа в конце процесса сжатия.

На практике устройство, эквивалентное упомянутому нами термостату для обеспечения изотермичности, реализуется в виде водяной рубашки, окружающей стенки цилиндра компрессора. Охлаждающая вода, омывающая стенки компрессора, снижает температуру сжимаемого в компрессоре газа. Вследствие того, что скорость теплообмена конечна, а процесс сжатия в компрессоре осуществляется быстро, реальный процесс сжатия в охлаждаемом цилиндре компрессора никогда не бывает изотермическим, а представляет собой политропу, располагающуюся между изотермой и адиабатой.

Используя основное свойство политропного процесса $pv^n = \text{const}$ легко определить **техническую работу компрессора и теплоту**, которую необходимо отвести в процессе сжатия:

$$L = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right);$$
$$Q = -C_v T_1 \frac{k-n}{n-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$
(5)

Интересно отметить, что к вопросу об определении **технической работы цикла компрессора** L можно подойти несколько иным путем.

Поскольку в соответствии с первым законом термодинамики $dQ = dH - Vdp$, то для адиабатного процесса $Vdp = dH$, а это означает, что техническая работа неохлаждаемого компрессора может быть вычислена по формуле:

$$L = -(H_2 - H_1).$$
(6)

Для компрессора с охлаждением цилиндра:

$$L = -(H_2 - H_1 - Q).$$
(7)

Нетрудно понять, что описание процессов в ротационных компрессорах по существу ничем не отличается от описания процессов в поршневых компрессорах. Несмотря на

кажущиеся большие отличия принципа действия компрессоров динамического сжатия (центробежных и осевых) от принципа действия поршневых компрессоров, соответствующий анализ показывает, что процессы в компрессорах динамического сжатия характеризуются теми же термодинамическими соотношениями, что и процессы в поршневом компрессоре.

Чтобы убедиться в этом, запишем уравнение первого закона термодинамики для потока газа в центробежном компрессоре. Работой сил трения и тяжести пренебрегаем. Скорость потока на входе в лопатки компрессора и на выходе из диффузора весьма малы.

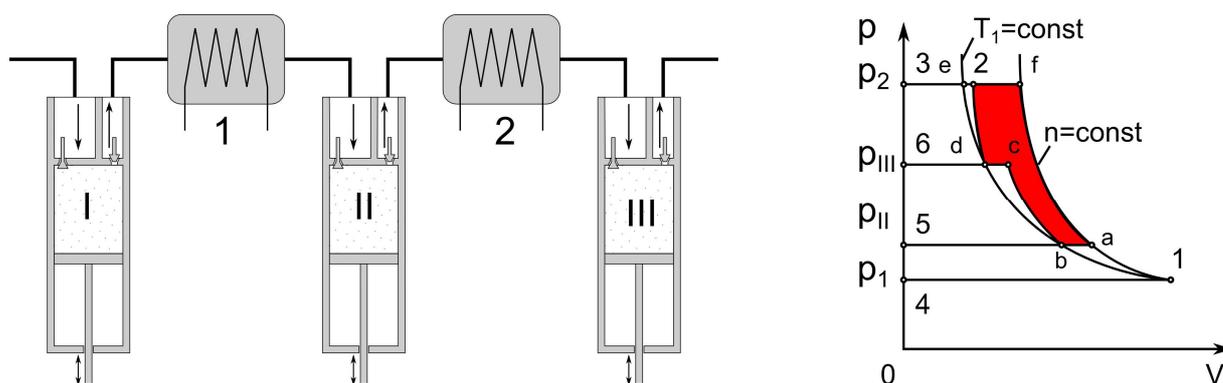
$$Q = (H_2 - H_1) + \left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) + L + L_{тр} \quad (8)$$

$$L = -(H_2 - H_1 - Q)$$

Получили выражение эквивалентное формуле (7).

2. МНОГОСТУПЕНЧАТОЕ СЖАТИЕ В КОМПРЕССОРЕ

Иногда требуется получить в компрессоре высокое значение давления сжатого газа p_2 при сравнительно небольшом p_1 , т.е. создать компрессор с большим значением отношения давлений p_2/p_1 . Если величина p_2/p_1 достаточно велика, то даже при достаточно совершенном охлаждении стенок цилиндра температура газа в конце процесса сжатия, T_2 зачастую получается недопустимо большой. Для того чтобы преодолеть эту трудность, используют так называемые **многоступенчатые компрессоры**, в которых процесс сжатия осуществляется последовательно в нескольких охлаждаемых цилиндрах, причем важной особенностью этой схемы компрессора является то, что газ, выходящий из одного цилиндра, охлаждается в специальном теплообменнике (холодильнике) и только после этого поступает в следующий цилиндр. Теплообменник с развитыми поверхностями охлаждения обеспечивает несравненно более эффективный отвод теплоты, чем водяная рубашка цилиндра компрессора. Эти теплообменники-холодильники позволяют снизить температуру газа после ступени компрессора практически до температуры на входе в компрессор T_1 .



Индикаторная диаграмма трехступенчатого компрессора изображена на рисунке. В первой ступени компрессора газ сжимается от давления p_1 до давления p_{II} (сжатие идет по политропе 1–а). Затем, выйдя из цилиндра первой ступени, газ по изобаре $p_{II} = \text{const}$ охлаждается в холодильнике 1 до исходной температуры T_1 (точка b, так же как и точка 1, лежит на изотерме, соответствующей температуре $T_1 = \text{const}$). После этого газ

поступает в цилиндр второй ступени, где по политропе $b-c$ сжимается до давления p_{III} . Далее следует охлаждение по изобаре $p_{III} = \text{const}$ в холодильнике 2 до температуры T_1 . Затем газ поступает в цилиндр третьей ступени, где по политропе $d-2$ сжимается до нужного давления p_2 .

Из индикаторной диаграммы видно, что использование многоступенчатого компрессора вместо одноступенчатого для одной и той же величины p_2/p_1 обеспечивает помимо меньшей температуры сжатого газа существенный выигрыш в технической работе цикла. Этот выигрыш в величине L равен заштрихованной площади $a-b-c-d-2-f-a$.

При рассмотрении принципа работы многоступенчатого компрессора, естественно, возникает вопрос: **каким образом распределить между отдельными ступенями компрессора общее отношение давлений p_2/p_1** ? При решении этой задачи исходят из следующего условия: распределение перепада давления между ступенями должно быть таким, чтобы суммарная техническая работа цикла всего компрессора была минимальной. Как показывает анализ, для компрессора с числом ступеней m этому условию отвечает отношение давлений на i -ой ступени:

$$\frac{p_{2i}}{p_{1i}} = \sqrt[m]{\frac{p_2}{p_1}} \quad (9)$$

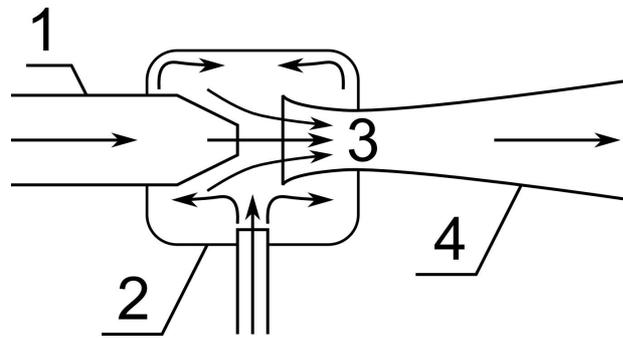
одинаковое для всех ступеней компрессора.

Отсюда следует, что если температуры газа на входе в каждую ступень компрессора одинаковы, то теплоты, отводимые в каждой ступени компрессора, одинаковы; следовательно, одинаковы и теплоты, отводимые в холодильниках между ступенями. Наконец, очевидно, что перепады температур в этом случае будут одинаковы для всех ступеней компрессора.

Если число ступеней компрессора сделать весьма большим, то в индикаторной диаграмме процесс сжатия будет близок к изотермическому. Вопрос о выборе числа ступеней, обеспечивающих заданное сжатие газа, решается на основе не столько термодинамических, сколько общих технических и технико-экономических соображений.

3. ЭЖЕКТОР

Эжектором (струйным компрессором) называют устройство для сжатия и перемещения газов, паров, а также жидкостей. Принцип действия эжектора основан на передаче энергии одной среды, движущейся с высокой скоростью (рабочая среда), другой (подсасываемая среда). Сжатие и перемещение подсасываемой среды достигаются посредством передачи ей части кинетической энергии рабочей среды в процессе их смешения. Рабочая среда (газ или пар высокого давления) расширяется в сопле 1 и поступает в камеру смешения 2. Сюда же поступает из всасывающей камеры 3 подлежащая сжатию подсасываемая среда (газ или пар низкого давления). Из камеры смешения смесь этих двух сред поступает в диффузор 4, в котором кинетическая энергия струи переходит в потенциальную энергию с повышением давления.



Следует отметить, что процесс смешения в эжекторе носит необратимый характер - часть кинетической энергии рабочей струи расходуется на гидродинамические потери. Эта особенность работы эжектора определяет его низкую экономичность, которая иногда окупается чрезвычайной простотой устройства.

Принципиальное различие процессов в эжекторе и в компрессоре состоит в том, что сжатие газа или пара в эжекторе осуществляется не внешним источником механической работы, а рабочей средой, которая смешивается с подсосываемой средой.

По виду рабочей и подсосываемой сред эжекторы подразделяют на различные типы: **газо-газовые, парогазовые, жидкостно-газовые, жидкостно-жидкостные, парожидкостные (парожидкостный эжектор обычно называют инжектором)**. Рабочая и подсосываемая среды могут быть как одним и тем же веществом, так и разными веществами.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. На какие типы делятся компрессоры по конструкционным признакам.
Ответ:
2. Запишите формулу для определения технической работы компрессора.
Ответ:
3. С какой целью применяют многоступенчатое сжатие в компрессоре.
Ответ:
4. Запишите формулу, определяющую оптимальное отношение давлений на каждой ступени многоступенчатого компрессора.
Ответ:
5. На чём основан принцип действия эжектора (струйного компрессора).
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: