

Тепловые двигатели и нагнетатели

Центробежные компрессоры

Лекция № 23

1. Устройство и рабочий процесс центробежных компрессоров

- У центробежных компрессоров **разгон**, последующее **сжатие** и **проталкивание газа** осуществляется *под действием центробежных сил*, возникающих в результате вращения рабочего колеса с радиальными лопатками.

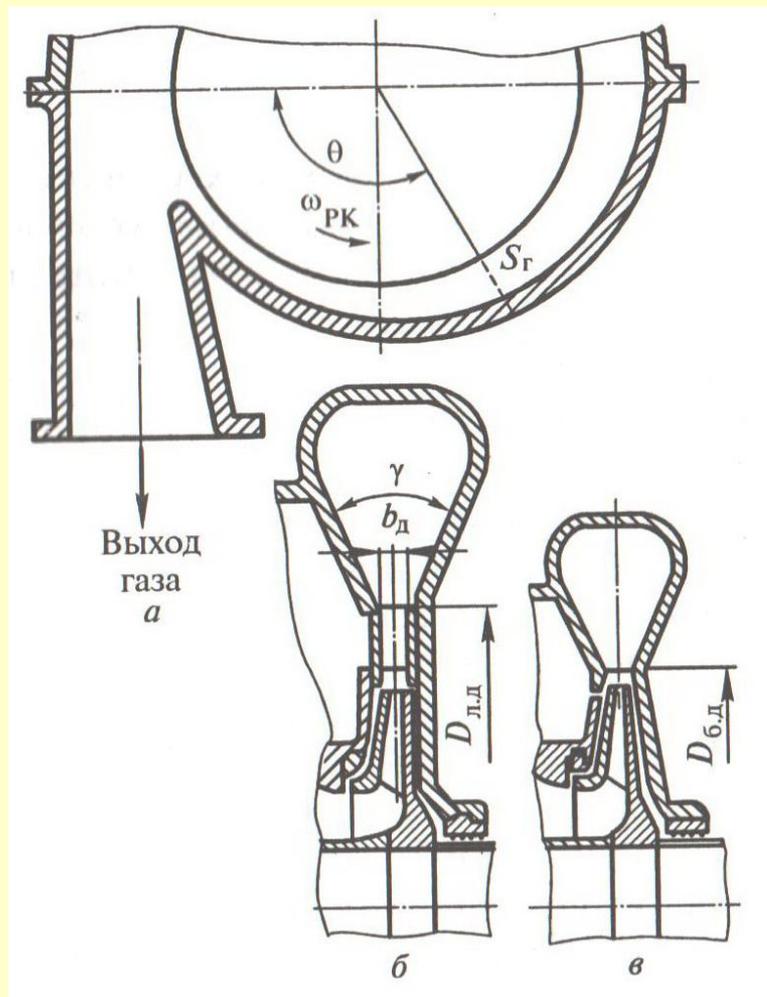
- Газ из расположенной вблизи от оси вращения камеры всасывания засасывается в рабочее колесо, попадает в его межлопаточные каналы и центробежными силами проталкивается через эти каналы на выход из колеса.
- При таком движении на газ действует постоянно увеличивающаяся центробежная сила:

$$F_{\text{цб}} = m_{\Gamma} r \omega^2$$

- где m_{Γ} – масса некоторого объёма газа, перемещающегося в канале; r – текущее значение радиуса вращения; ω – угловая скорость вращения.

- Под действием центробежной силы происходит разгон газа (линия 0–С–2 на графике $p = f(r)$).
- Из термодинамики потока известно, что *при разгоне потока давление газа уменьшается.*
- Как видно из рисунка, *лопаточные каналы рабочего колеса имеют расширяющуюся форму, а это приводит к увеличению давления.*
- Суммарный эффект этих двух **влияний** приводит к **повышению давления**, так что **на выходе из рабочего колеса абсолютная скорость газа становится максимальной**, а давление его повышается (линия 1–р–3 графика).

- Из рабочего колеса газ попадает в **неподвижный лопаточный диффузор**, где происходит его торможение при соответствующем увеличении давления (верхняя часть графика).
- Далее поток в **обратном направляющем аппарате** (ОНА) поворачивается снова к оси вала и там проходит по межлопаточным каналам с увеличивающимся сечением.
- Ширина каналов уменьшается по конструктивным ограничениям, но одновременно увеличивается поперечное сечение канала, и поэтому давление газа продолжает увеличиваться.
- После сжатия в предыдущей ступени газ направляется в камеру всасывания следующей ступени компрессора.

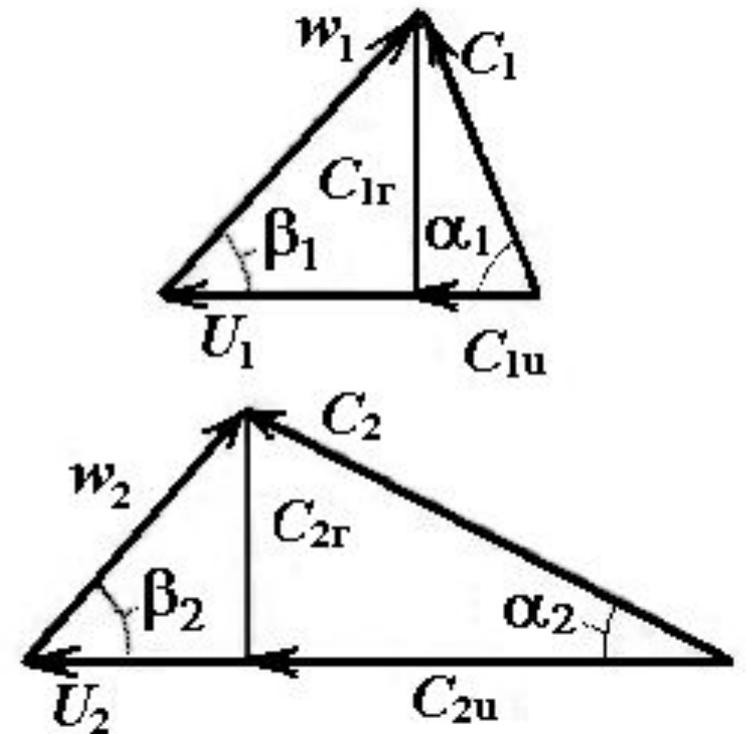
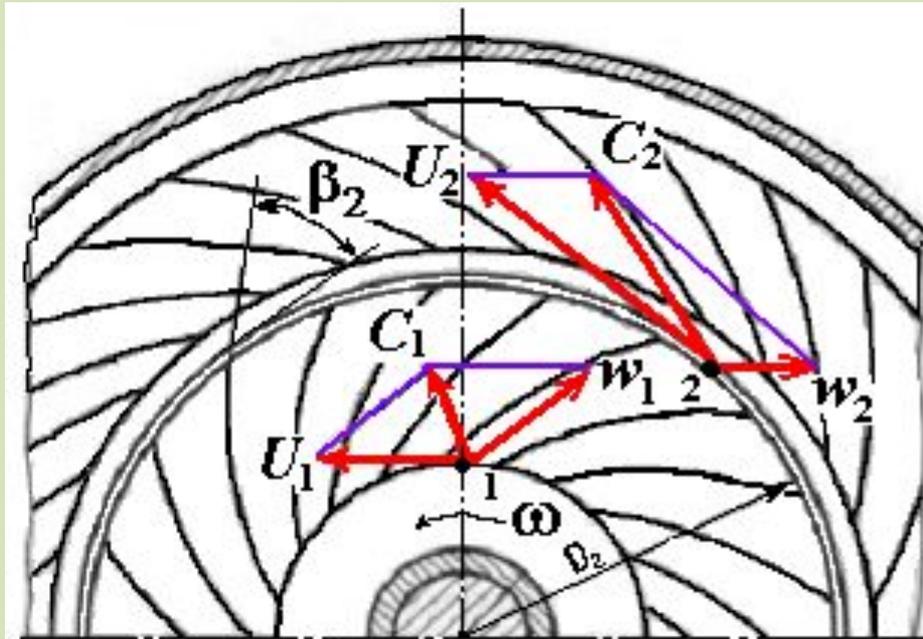


a – продольное сечение; **б** – поперечное сечение при наличии лопаточного диффузора; **в** – оконечная ступень с безлопаточным диффузором.

- На последней ступени сразу за лопаточным диффузором (или без него) устанавливается спиральная камера (сборная улитка), откуда газ подаётся в окончательный охладитель и далее – потребителю (рисунок).

Проходное сечение улитки S_r задается в зависимости от угла θ так, чтобы обеспечивалось постоянство средней скорости газа в этом сечении при любом θ . Угол раскрытия камеры γ принимается достаточно большим: **50...60°**.

- *Разберемся, почему направления рабочих и лопаток диффузора имеют противоположную изогнутость.*
- *Рассмотрим треугольники скоростей на входе и выходе рабочего колеса.*



- Из камеры всасывания газ попадает в лопаточный канал рабочего колеса со сравнительно **небольшой относительной скоростью** $w_1 = 20 \dots 50$ м/с, направленной перпендикулярно входному сечению.
- При вращении колеса газ **приобретает переносную (окружную) скорость** U_1 , направленную перпендикулярно радиусу, проведённому через точку 1:

$$U_1 = R_1 \cdot \omega = \frac{R_1 \pi n}{30}$$

- Векторная сумма двух относительной и **окружной** скоростей позволяет **найти абсолютную скорость газа во входном сечении C_1** .
- Величина угла β_1 из конструктивных соображений обычно принимается порядка **$50...70^\circ$** .
- Величина угла зависит от числа рабочих лопаток z ; обычно **$z = 18...32$** .
- По теореме косинусов легко найти величину вектора C_1 , а после этого из равенства **$w_1 \sin \beta_1 = C_1 \sin \alpha_1$** найти и угол α_1 .

- При установившемся режиме массовый расход газа при течении в лопаточном канале остаётся неизменным.
- Запишем уравнение неразрывности: $S_1 w_1 \rho_1 = S_2 w_2 \rho_2$.
- Учитывая, что с достаточной точностью $\rho_1 \approx \rho_2$, найдем величину w_2 .
- Переносная скорость на выходе из колеса U_2 будет во столько раз больше, во сколько раз $R_2 > R_1$.
- Описанным способом легко рассчитывают величины векторов U_2 и C_2 и угол α_2 , поскольку, $\beta_2 \approx \beta_1 + 5^\circ$.

- **Работа на привод** *адиабатного компрессора* равна:

$$l_{\text{пр.ад}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT_1 \left(\lambda^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right).$$

- **Действительная работа**, учитывающая потери подводимой энергии, больше **работы на привод** *адиабатного компрессора*:

$$l_{\text{д}} = \frac{l_{\text{пр.ад}}}{\eta_{\text{иад}} \cdot \eta_{\text{м}}},$$

- где $\eta_{\text{иад}}$ и $\eta_{\text{м}}$ – **внутренний адиабатный** и **механический КПД**, соответственно.

- Мощность на привод компрессора:

$$N_{\text{пр}} = M \cdot l_{\text{д}}$$

- где M – массовый расход газа в **кг/с**.
- **Число оборотов вала n** определяют, **ориентируясь на число оборотов приводного двигателя** или задавая **переносную (окружную) скорость** в пределах $U_2 = 150 \dots 250$ м/с.
- Наружный диаметр колеса

$$D_2 = \frac{60 \cdot U_2}{\pi \cdot n}.$$

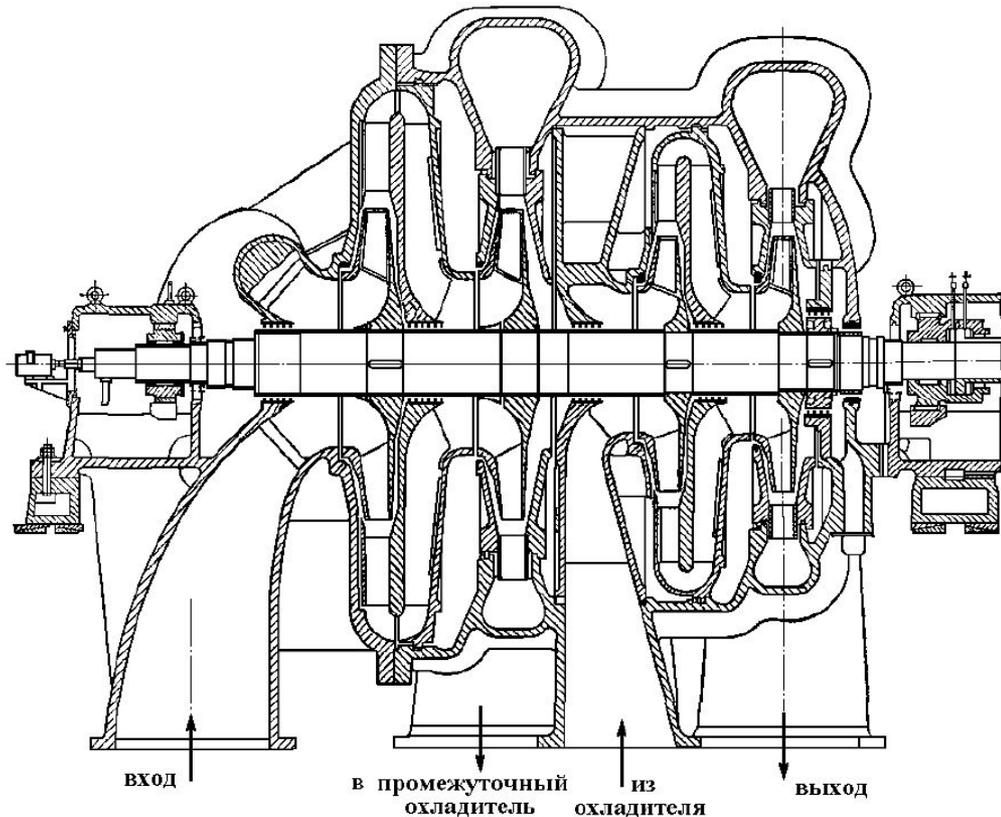
- Количество лопастей $z_{\text{лр}}$ рабочего колеса обычно принимается в пределах **16...32**.
- Число лопаток диффузора $z_{\text{лд}}$ несколько меньше: $z_{\text{лд}} = 18...28$.
- **Как правило, форма лопатки имеет вид дуги окружности.**

2. Конструктивные особенности центробежных компрессоров

- Конструктивные особенности центробежных компрессоров рассмотрим на примере доменного компрессора **K-3250-41-2** с характеристиками:

- максимальная подача $Q = 3250 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- давление на выходе $p_2 = 0,41 \text{ МПа}$;
- число оборотов $n = 2500 \dots 3400 \text{ об/мин.}$

Устройство четырёхступенчатого центробежного компрессора



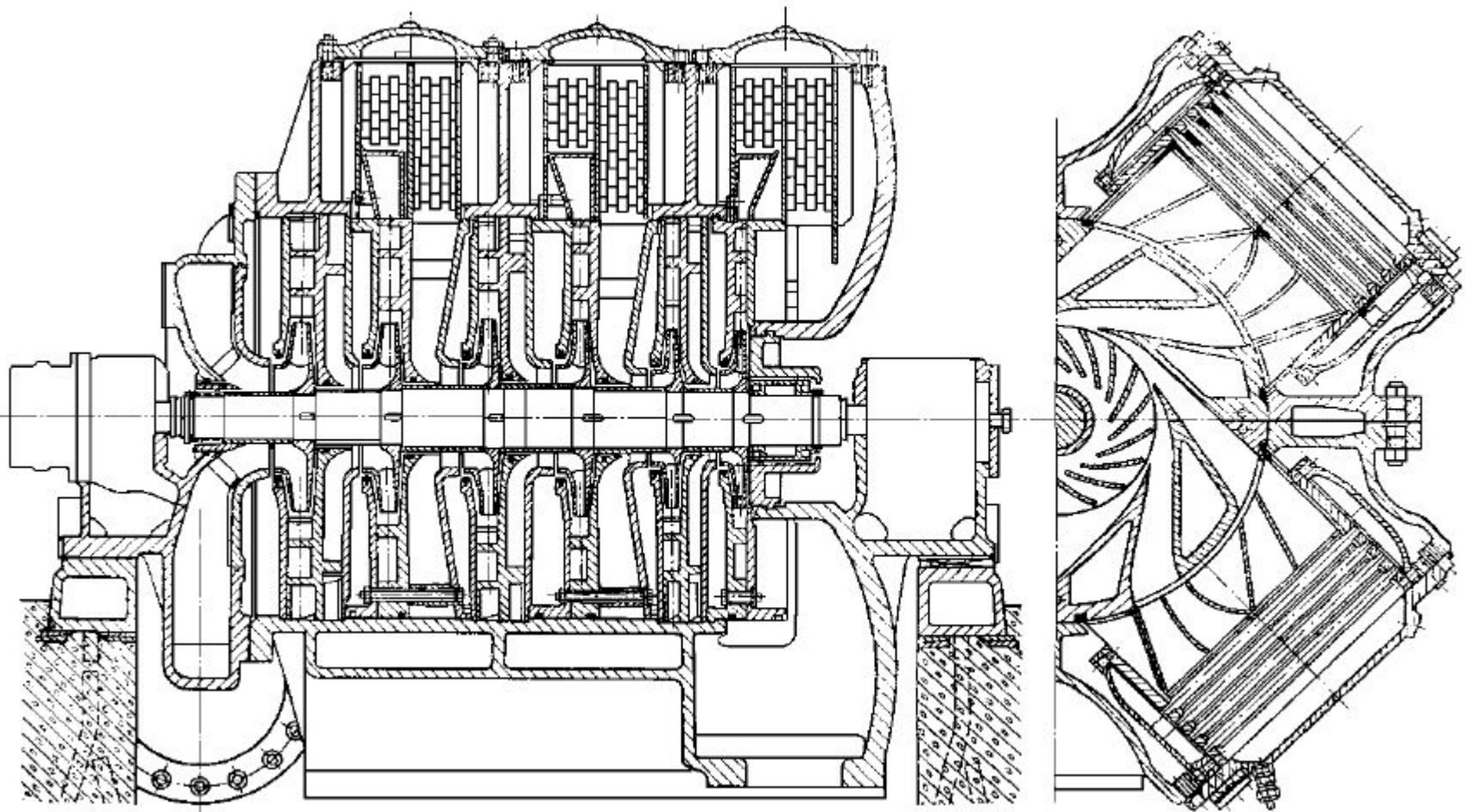
- Четыре рабочих колеса, диаметр которых уменьшается по мере повышения давления.
- Колёса жёстко посажены на ведущий вал и вращаются вместе с ним. Из рабочих колёс газ выталкивается в неподвижные лопаточные диффузоры.

- Воздух всасывается через входное устройство и **последовательно сжимается в двух ступенях с рабочими колесами одинакового диаметра** и собирается в первой сборной улитке.
- Из первой сборной улитки через выходной патрубок газ направляется в межступенчатый промежуточный охладитель (на рисунке не показан).
- После охлаждения воздух поступает во входное устройство второй секции. **Там воздух сжимается в третьей и четвёртой ступенях компрессора с рабочими колесами меньшего диаметра.**

- *За рабочими колесами установлены лопаточные диффузоры.*
- На выходе из последней ступени установлена вторая сборная улитка и соответствующий выходной патрубок с фланцем для присоединения выходного трубопровода, подающего воздух потребителю.
- Вал компрессора сплошной, цельный, покоится на двух подшипниках качения (из них правый – опорно-упорный).
- Для уменьшения утечек между валом и литым разъёмным корпусом устроены лабиринтные уплотнения.

- Установленный на валу слева масляный насос подаёт масло в подшипники, устанавливаемые на мощных фундаментных опорах.
- На правом конце вала установлена шестерня, которая соединяется с шестерней приводного редуктора.

Центробежный компрессор со встроенными промежуточными охладителями



- Отличительной особенностью данного компрессора являются встроенные промежуточные охладители (по четыре охладителя на каждой ступени).
- Это трубчатые охладители с наштампованным оребрением (как автомобильные радиаторы).
- Внутри трубок циркулирует охлаждающая вода, а сжатый в рабочем колесе и неподвижном диффузоре газ проходит между трубками, меняя своё направление с центробежного на центростремительное и попадая во входное устройство следующей ступени.
- В отличие от **доменного компрессора К-3250-41-2** здесь используются рабочие колёса одинакового диаметра, что упрощает и удешевляет машину.