Теория турбомашин

Курс лекций. 6 лекция

Доцент, кандидат технических наук

Юрий Владимирович Кожухов

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Доц. Ю.В. Кожухов

Теория турбомашин. *Лекция 6.*

СОДЕРЖАНИЕ

Основы теории ступени турбокомпрессора

- **Схематизация потерь напора при различных режимах работы ступени по расходу на примере рабочего колеса: потери в канале и на входе в канал (ударные потери).**
- **Применение формулы потерь внезапного расширения (формула Борда – Карно) для оценки ударных потерь.**
- **Характеристика полезного напора. Характеристика КПД. Понятие о границе помпажа. Максимальный, критический, оптимальный и расчетный расходы.**
- **Степень реактивности. Зависимость коэффициента теоретического напора от коэффициента расхода при разном угле лопаток на выходе. Зависимость степени реактивности от коэффициента расхода при различном выходном угле лопаток. Влияние конечности числа лопаток.**
- **Диффузорный характер течения. Сопоставление с турбинной ступенью.**
- **Сопоставление осевых и центробежных компрессорных ступеней по напорности, уровню скоростей в основных элементах, по коэффициентам потерь и КПД**

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Зависимость коэффициента теоретического напора от коэффициента расхода при разных углах лопаток на выходе

Из выходного треугольника скоростей у гипотетического рабочего колеса с бесконечным числом лопаток:

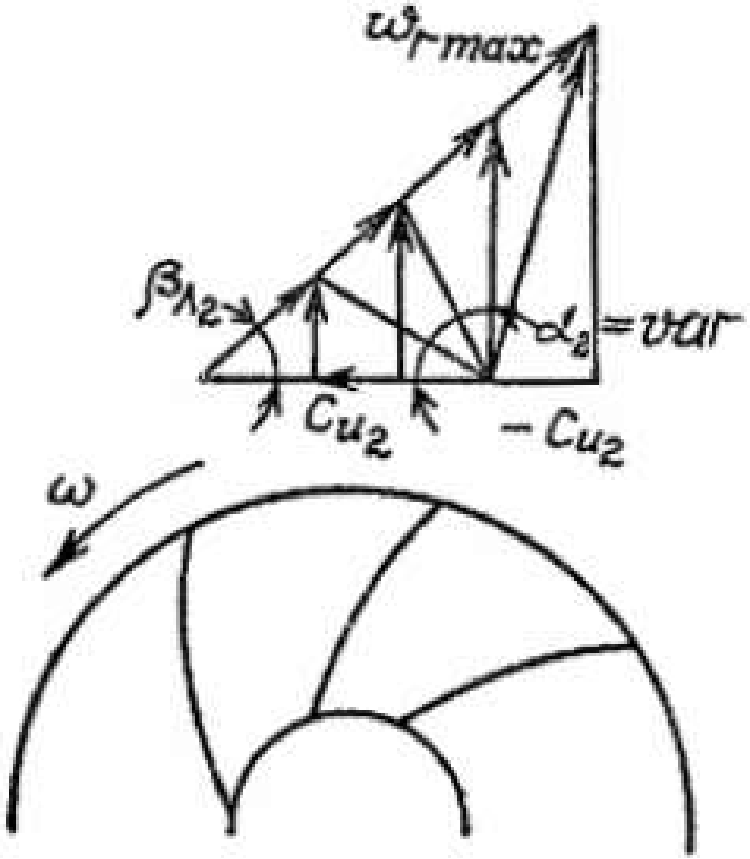
$$c_{u2} = u_2 - w_{u2}$$

$$w_{u2}/w_{r2} = \mathrm{ctg}\beta_{л2}$$

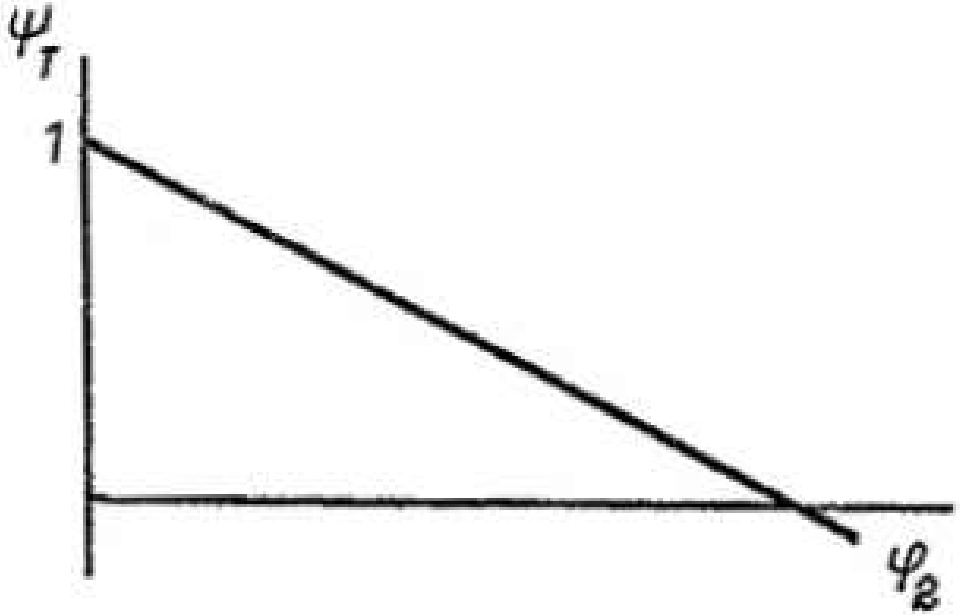
$$\psi_т = c_{u2}/u_2 = 1 - \varphi_2 \mathrm{ctg}\beta_{л2}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

1. $\beta_{л2} < 90°$ («лопатки, загнутые назад»)



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Выходные треугольники скоростей и напорная характеристика идеального РК при бесконечном числе лопаток, $c_{u1} = 0$, $\beta_{л2} < 90°$ («лопатки, загнутые назад»)

Зависимость коэффициента теоретического напора от коэффициента расхода при разных углах лопаток на выходе

Случаи течения с $\varphi_2 > \varphi_{2max}$ также возможны. Если характеристика переходит из первого в четвертый квадрант, напор отрицателен. Центробежный компрессор превращается в центробежную турбину, газ как бы «догоняет» колесо, «упирается» в заднюю поверхность лопатки и «отталкиваясь» от нее приобретает отрицательную закрутку.

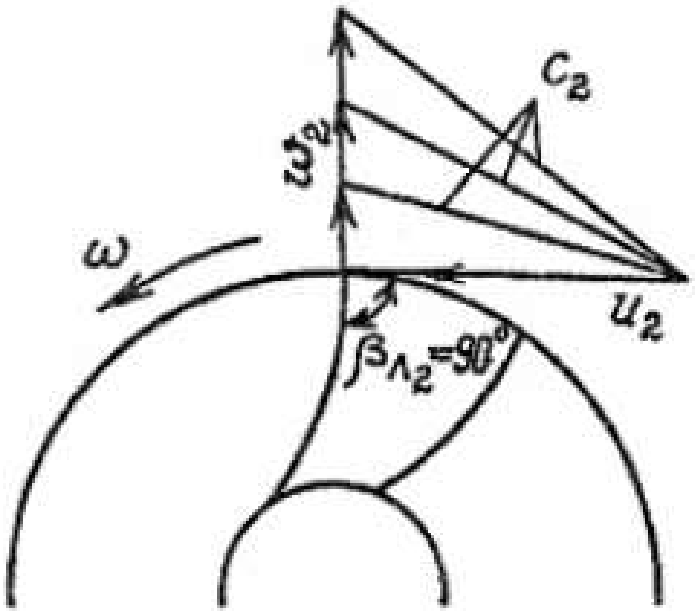
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

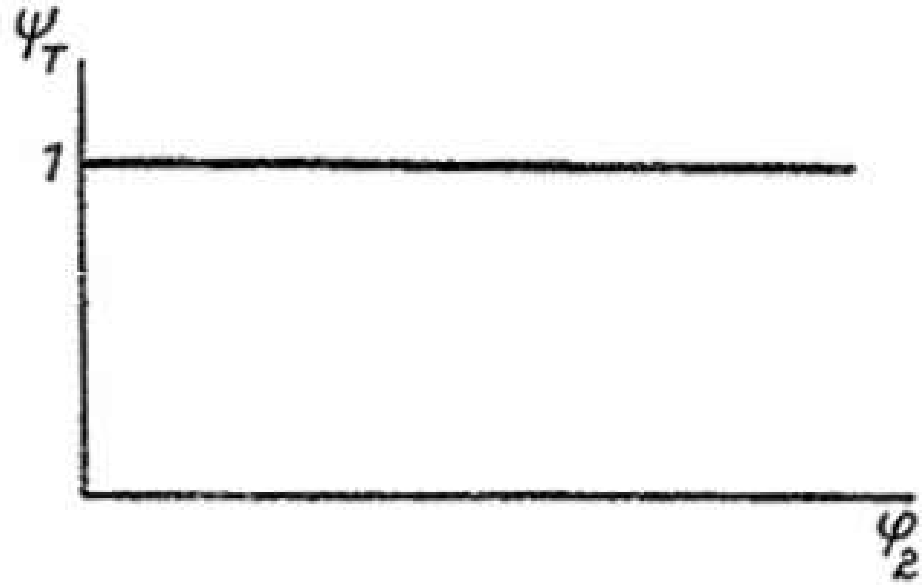
2. $\beta_{л2} = 90°$ («радиально оканчивающиеся лопатки»)

В этом случае котангенс угла выхода лопаток равен нулю и коэффициент напора не зависит от производительности

$$\psi_T = f(\varphi_2) = \text{const} = 1$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



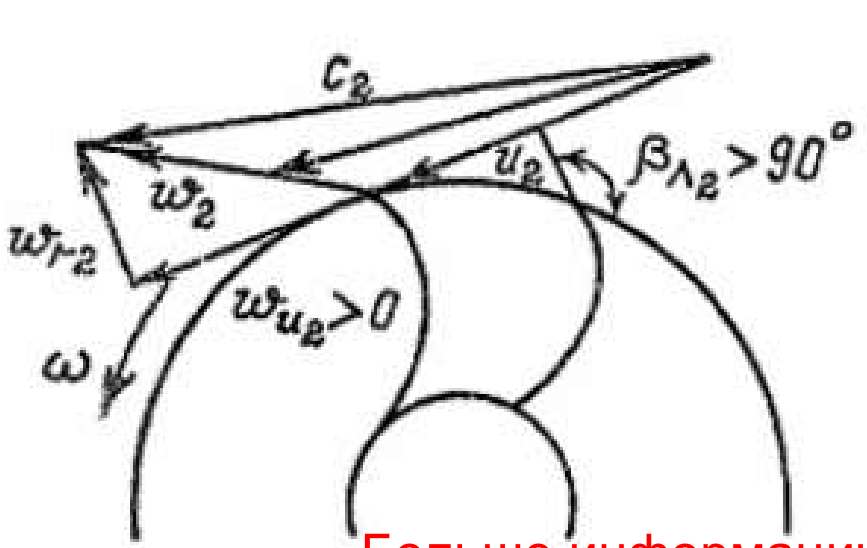


Выходные треугольники скоростей и напорная характеристика идеального РК при бесконечном числе лопаток, $c_{u1} = 0$, $\beta_{л2} = 90°$ («радиально оканчивающиеся лопатки»)

3. $\beta_{л2} > 90°$ («загнутые вперед лопатки).

В этом случае котангенс выходного угла лопаток меняет знак на противоположный:

$$\psi_т = 1 + \varphi_2|\mathrm{ctg}\beta_{л2}| \quad \text{при } \beta_{л2} > 90°$$



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Выходные треугольники скоростей и напорная характеристика идеального РК при бесконечном числе лопаток, $c_{u1} = 0$, $\beta_{л2} > 90°$ («лопатки, загнутые вперёд»).

Степень реактивности и статический напор РК в зависимости от коэффициента расхода при разных углах выхода лопатки при бесконечном числе лопаток

Степень реактивности Ω – это соотношением между всей подведенной в колесе работой и той ее долей, которая использовалась на сжатие газа в самом колесе. Степень реактивности Ω определяет долю кинетической энергии на выходе из РК

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Степень реактивности и статический напор РК в зависимости от коэффициента расхода при разных углах выхода лопатки при бесконечном числе лопаток

Итак, для идеального РК с $h_r = 0$, $z = \infty$ (т.е. при $\beta_2 = \beta_{л2}$), $c_{u1} = 0$ и при дополнительном упрощающем условии $c_{r1} = c_{r2}$:

$$\Omega_т = \frac{h_п}{h_т} = \frac{h_т - h_д}{h_т} = 1 - \frac{h_д}{h_т} =$$

$$= 1 - 0{,}5\frac{c_2^2 - c_1^2}{c_{u2}u_2} = 1 - 0{,}5\frac{c_{u2}^2 + c_{r2}^2 - c_{r1}^2}{c_{u2}u_2}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Степень реактивности и статический напор РК в зависимости от коэффициента расхода при разных углах выхода лопатки при бесконечном числе лопаток

При $\Omega_т = 1 - 0{,}5\psi_т$ и при $\psi_т = 1 - \varphi_2 ctg\beta_{л2}$:

$$\Omega_т = 0{,}5(1 + \varphi_2 ctg\beta_{л2})$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Зависимость $\Omega = f(\varphi_2)$ для РК с $\beta_{л2} \gtrless 90°$ $(z = \infty)$

Степень реактивности и статический напор РК в зависимости от коэффициента расхода при разных углах выхода лопатки при бесконечном числе лопаток

Еще раз обратим внимание на тот факт, что при условии $c_1 = c_{r1} = c_{r2}$ получено соотношение

$$\Omega_T = 1 - 0{,}5\psi_T,$$

т.е. **повышение коэффициента напора может быть достигнуто только путем снижения реактивности.**

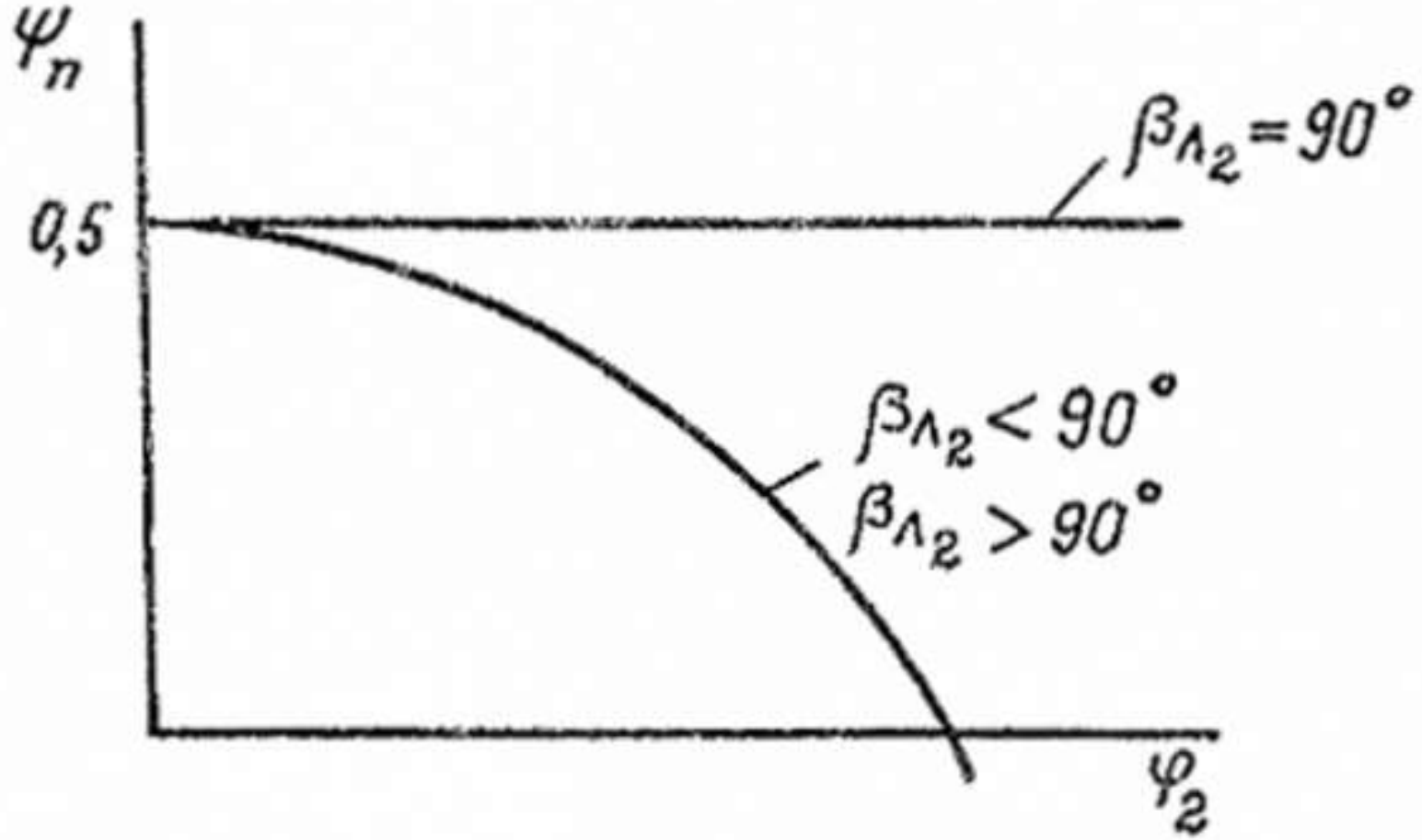
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Степень реактивности и статический напор РК в зависимости от коэффициента расхода при разных углах выхода лопатки при бесконечном числе лопаток

$$h_{\text{п}} = \Omega_{\text{т}} h_{\text{т}} \qquad \psi_{\text{п}} = \Omega_{\text{т}} \psi_{\text{т}}$$

$$\psi_{\text{п}} = 0{,}5\left[1 - \left(\varphi_2 \operatorname{ctg}\beta_{\text{л}2}\right)^2\right]$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Зависимость коэффициента статического напора РК от коэффициента расхода при различных $\beta_{л2} >< 90°$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние конечного числа лопаток на напорную характеристику РК

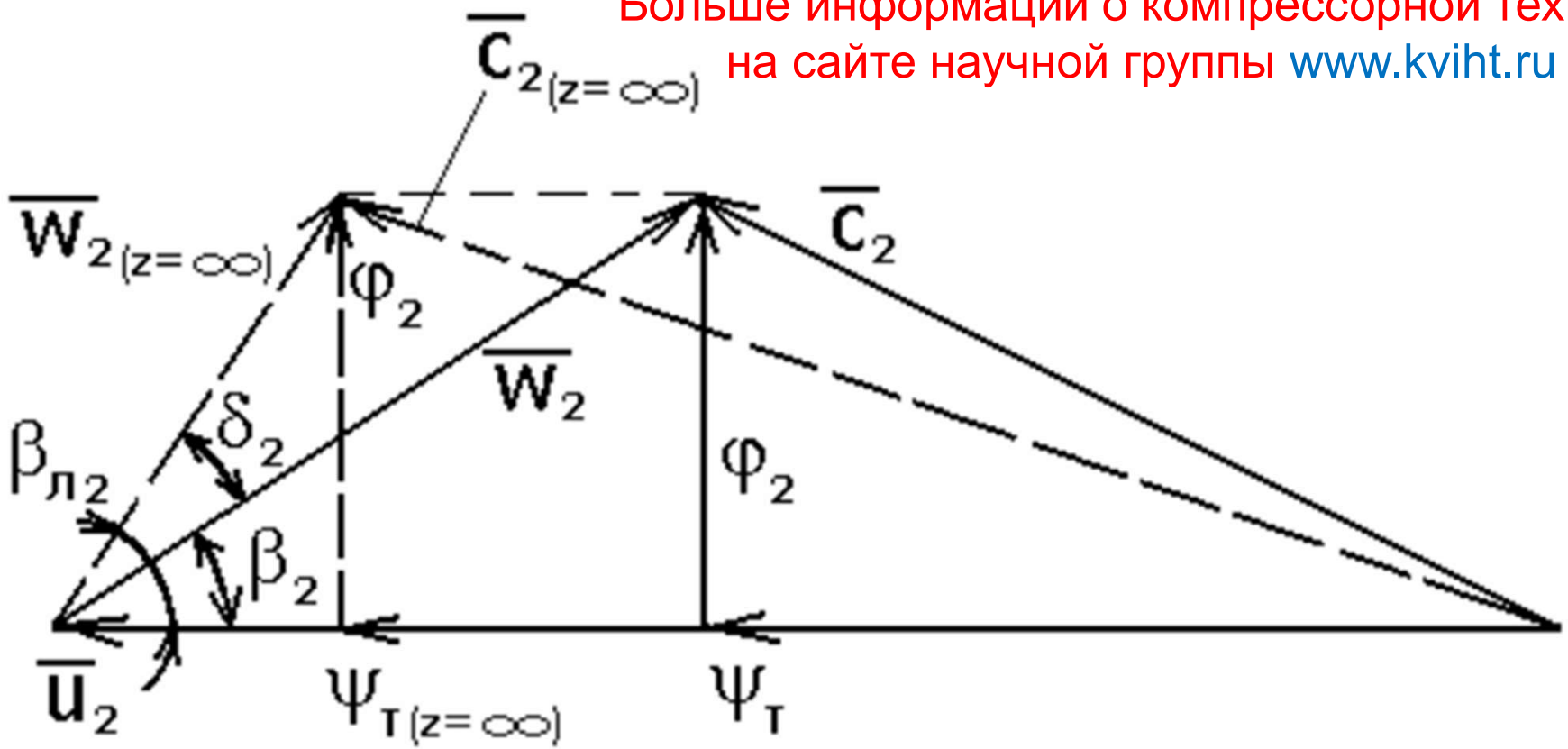
$$\psi_{т\,(z=\infty)} = 1 - \varphi_2 \mathrm{ctg}\beta_{л2}$$

$$\psi_т = 1 - \varphi_2 \mathrm{ctg}\beta_2 = 1 - \varphi_2 \mathrm{ctg}(\beta_{л2} - \delta_2)$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

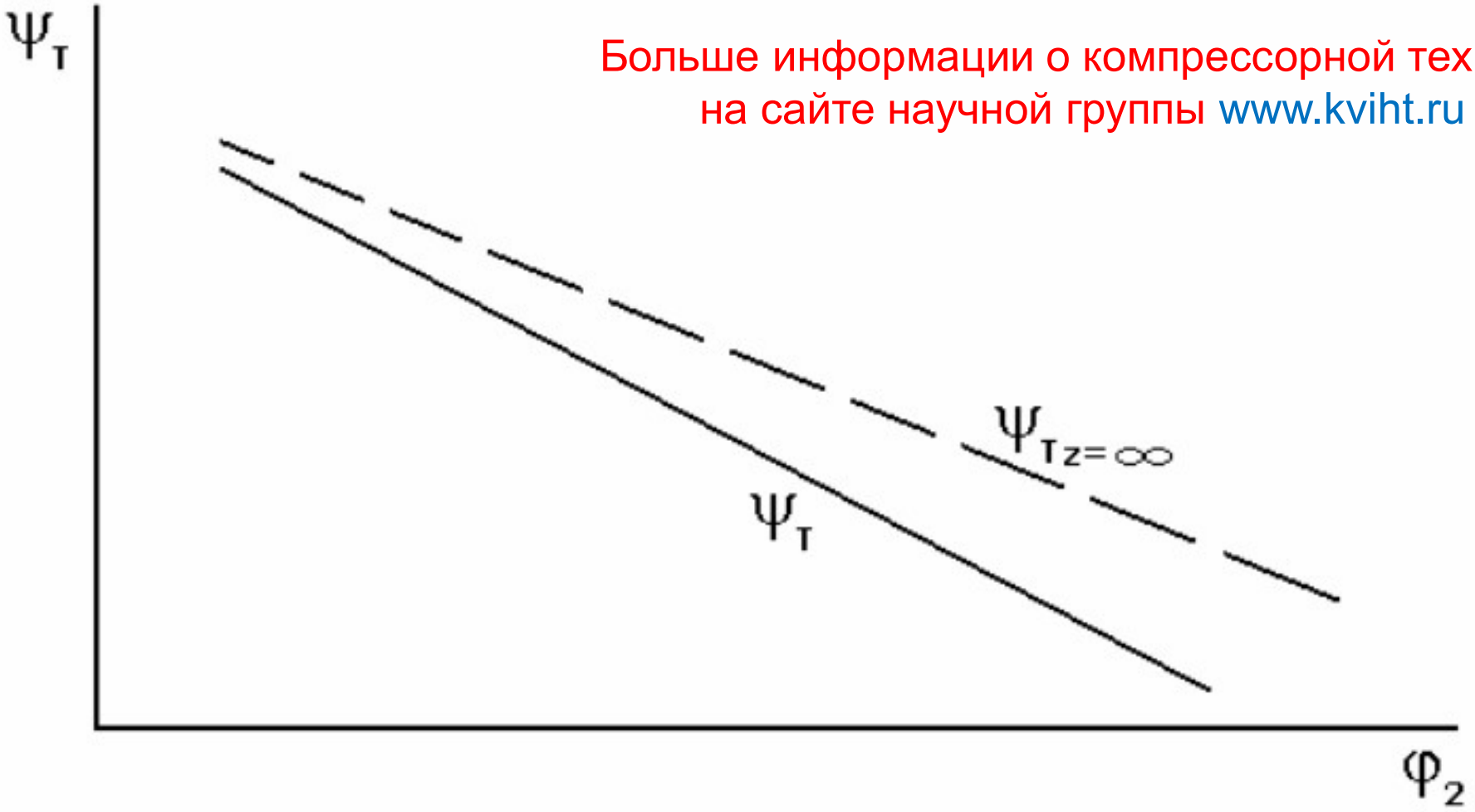
Влияние конечного числа лопаток на напорную характеристику РК

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Треугольники скоростей РК ЦК с бесконечным числом лопаток (пунктир) и реального РК (сплошная линия)

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Напорная характеристика РК ЦК с бесконечным числом лопаток (пунктир) и реального РК (сплошная линия)

Схематизация потерь напора. Формула Борда-Карно. Характеристика КПД и полезного напора

КПД центробежного РК:

$$\eta^* = \frac{h_п + h_д}{h_т} = \frac{h_т - h_г}{h_т}$$

В первом приближении все потери в проточной части колеса условно разбивают на две группы:

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

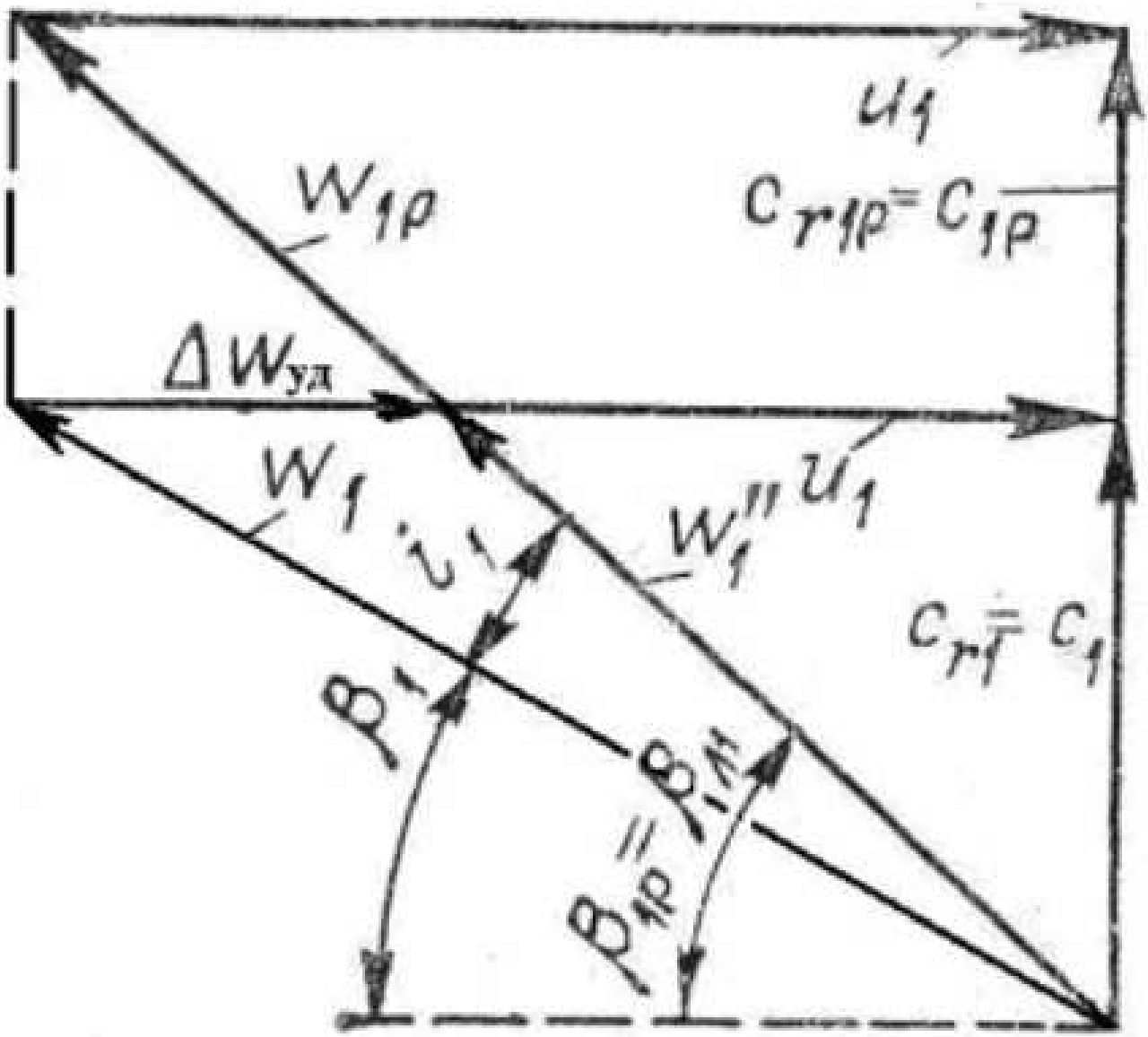
$$h_r = h_{r\,уд} + h_{r\,тр}$$

Схематизация потерь напора. Формула Борда-Карно. Характеристика КПД и полезного напора

Первая группа потерь – **ударные потери** $h_{r\,\text{уд}}$ – учитывает потери связанные с наличием угла атаки на входе в решётку на нерасчётных режимах работы.

Вторая группа потерь $h_{r\,\text{тр}}$ учитывает **потери трения** в межлопаточных каналах.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Треугольник скоростей на входе в рабочее колесо

Схематизация потерь напора. Формула Борда-Карно. Характеристика КПД и полезного напора

Потери трения в межлопаточном канале рассчитываются по формуле

$$h_{r\,\text{тр}} = \zeta_{\text{тр}} \frac{w_{1p}^2}{2}, \qquad h_{r\,\text{тр}} = \zeta_{\text{тр}} \frac{w''^2_1}{2}.$$

где $\zeta_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь трения.

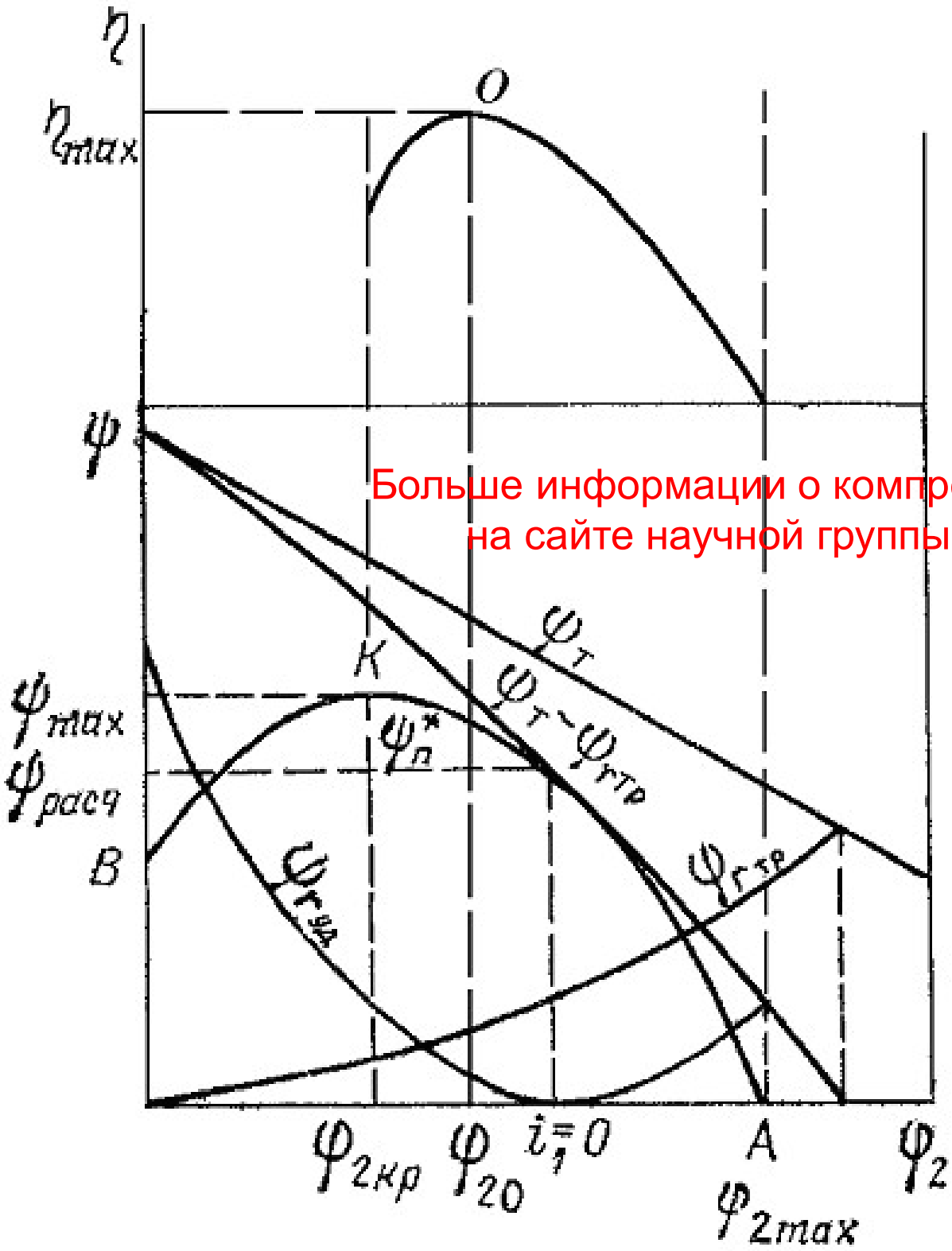
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Схематизация потерь напора. Формула Борда-Карно. Характеристика КПД и полезного напора

Ударные потери на нерасчётном режиме будут отличны от нуля. Для расчёта ударных потерь используется **формула Борда-Карно** (аналогично потерям внезапного расширения):

$$h_{r\,\text{уд}} = \frac{\Delta w^2_{\text{уд}}}{2}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Максимальный, оптимальный, критический и расчётный расходы

- **максимальный расход**, при котором компрессор не создает разности давлений - φ_{2max} (точка А).

- **оптимальный расход** φ_{2o} соответствует максимуму КПД (точка О).

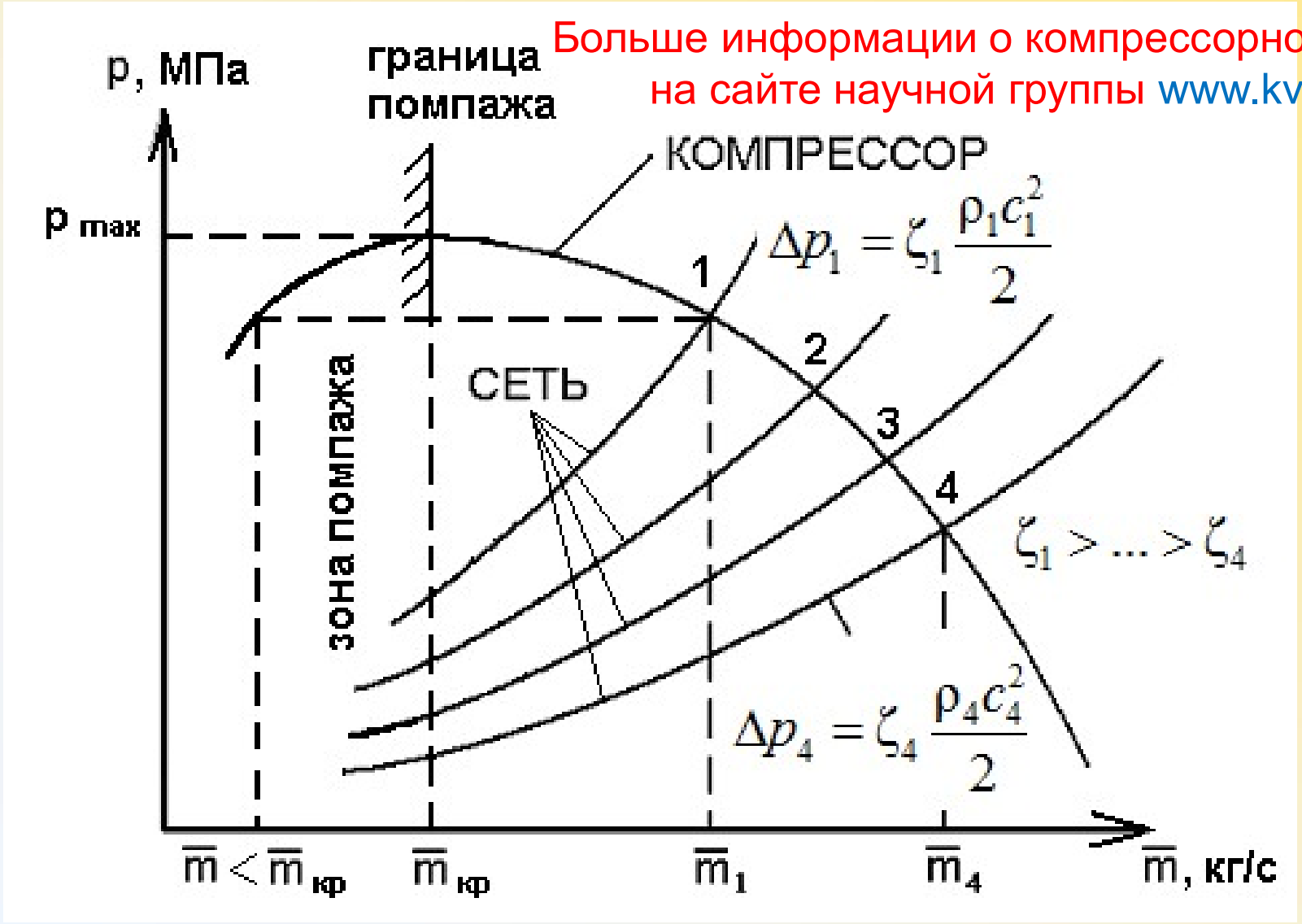
- **критический расход** соответствует максимуму полезного напора.

- **расчетный расход** определяется техническим заданием на проектирование ТК, как наиболее длительный режим эксплуатации.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Помпаж. Граница помпажа. Недопустимость работы на помпажном режиме

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Помпаж. Граница помпажа. Недопустимость работы на помпажном режиме

Помпаж – это нестационарный низкочастотный процесс (один период в несколько секунд), при котором сжимаемый газ, поступая в сеть, периодически прорывается из сети на всасывание.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Сопоставление осевых и центробежных компрессорных ступеней

Параметры	Обозначение	Осевой компрессор	Центробежный компрессор
Окружная скорость вращения	u, м/с	$u = u_1 = u_2$	$u_1 \approx 0{,}5u_2$
Коэффициент расхода на входе	φ_1	0,4 - 0,6	0,2 - 0,3
Коэффициент теоретического напора	$\psi_т$	0,25 - 0,35	0,5 - 0,7
КПД	η	92 - 95%	82 - 85%
Коэффициент потерь	ζ	$\zeta_{ок} << \zeta_{цк}$ из-за сложной формы проточной части ЦК	
Потери КПД при гипотетическом условии $\zeta_{ок} = \zeta_{цк}$	$\Delta\eta$	$\Delta\eta_{ок} >> \Delta\eta_{цк}$ из-за высоких скоростей в проточной части ОК	
Зона устойчивой работы и высокого КПД	-	у ОК меньше, чем у ЦК из-за особенностей обтекания лопаточного аппарата	
Вес компрессора	m, кг	у ОК в 2 - 2,5 раза меньше, чем у ЦК при равных рабочих параметрах	

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы www.kviht.ru

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru