

Теория турбомашин

Курс лекций. 6 семестр.

Группы 33224/1,2

Доцент, кандидат технических наук

Юрий Владимирович Кожухов

СПбГПУ, кафедра «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника»

Доц. Ю.В. Кожухов

Теория турбомашин. Лекция 3.

СОДЕРЖАНИЕ

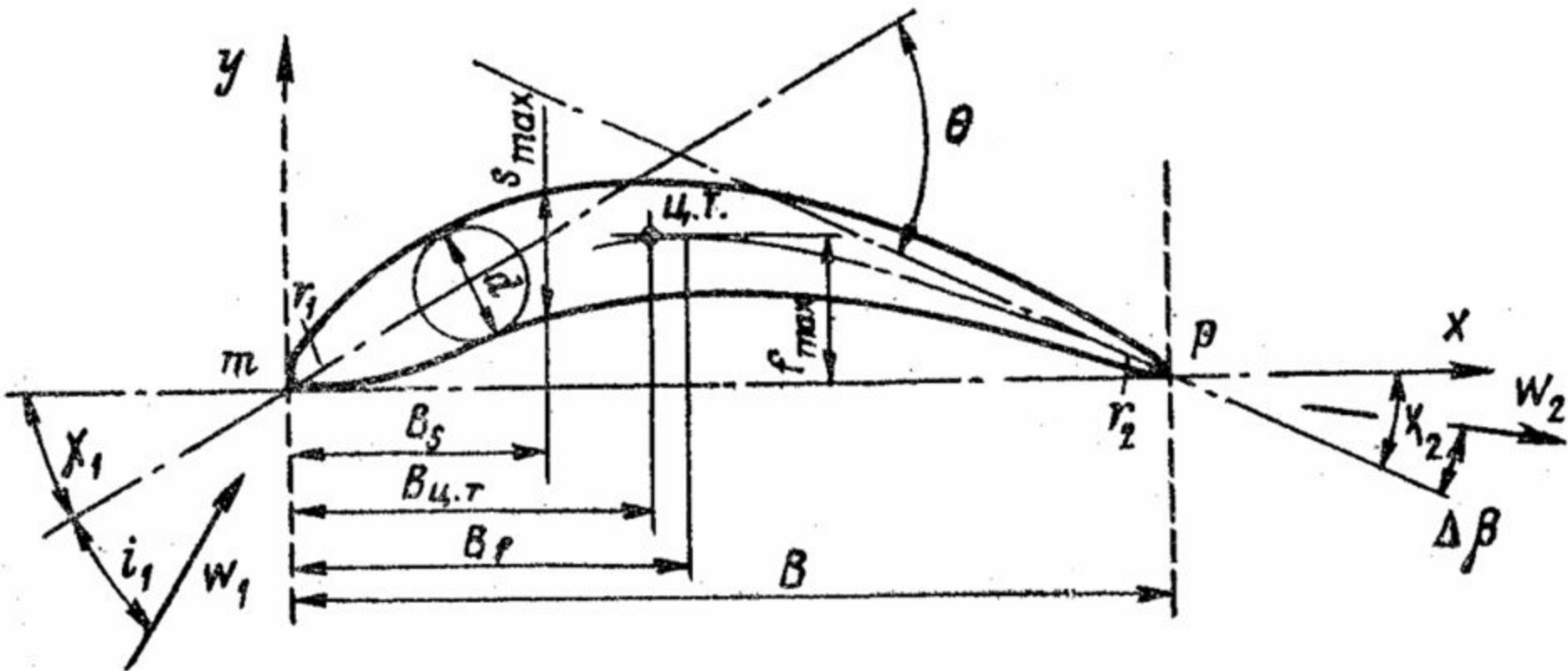
Термодинамические и газодинамические основы теории турбомашин

- Основные геометрические параметры лопаточной решётки и профиля.
- Действительные и условные поверхности тока.
- Пространственные лопаточные решётки.
- Неподвижная и вращающаяся системы координат.
- Компоненты скорости.
- Входной и выходной треугольники скоростей. Угол отставания.
- Треугольники скоростей при изменении режима работы ТК. Угол атаки.

Основные геометрические параметры
лопаточной решётки и профиля

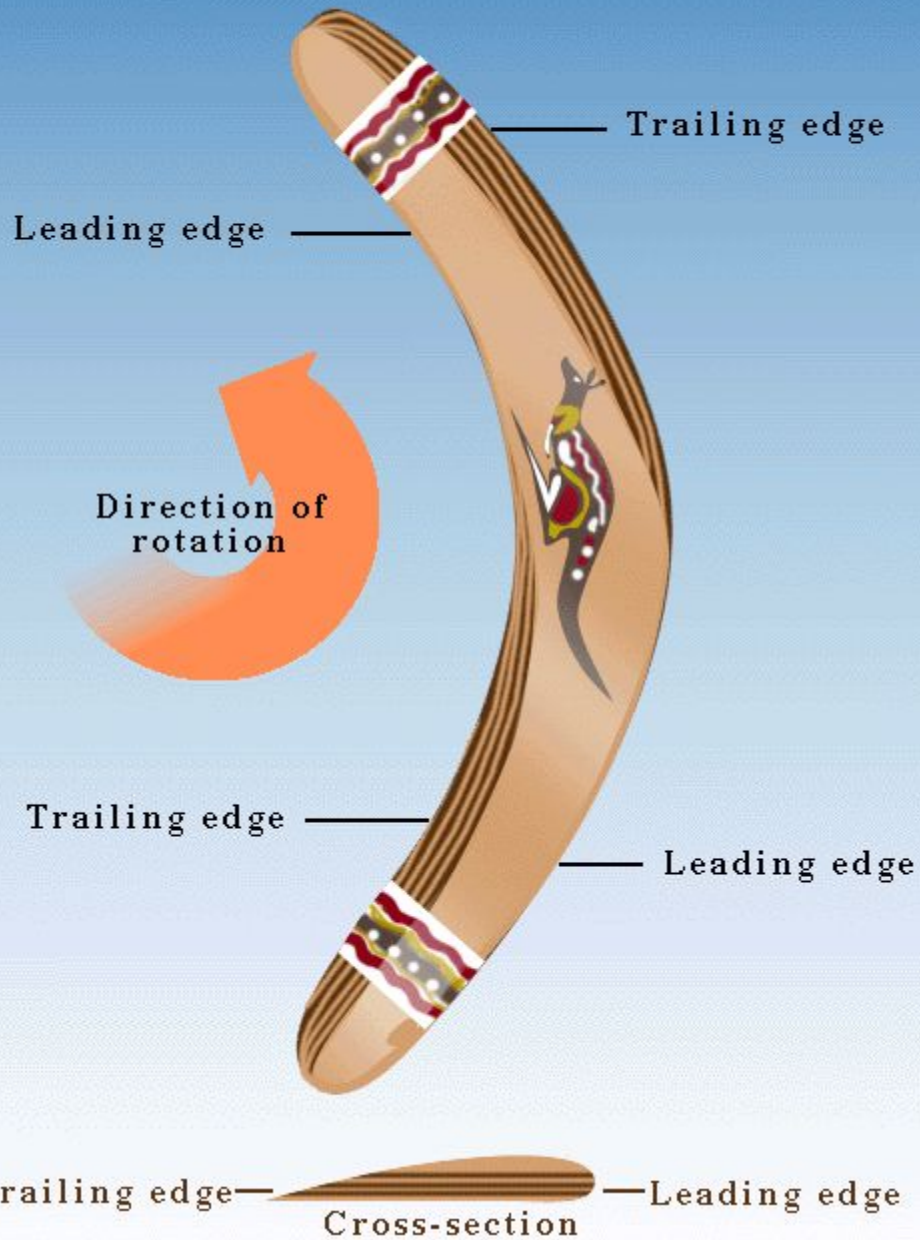
Элементарная лопаточная решётка представляет собой совокупность лопаточных профилей.

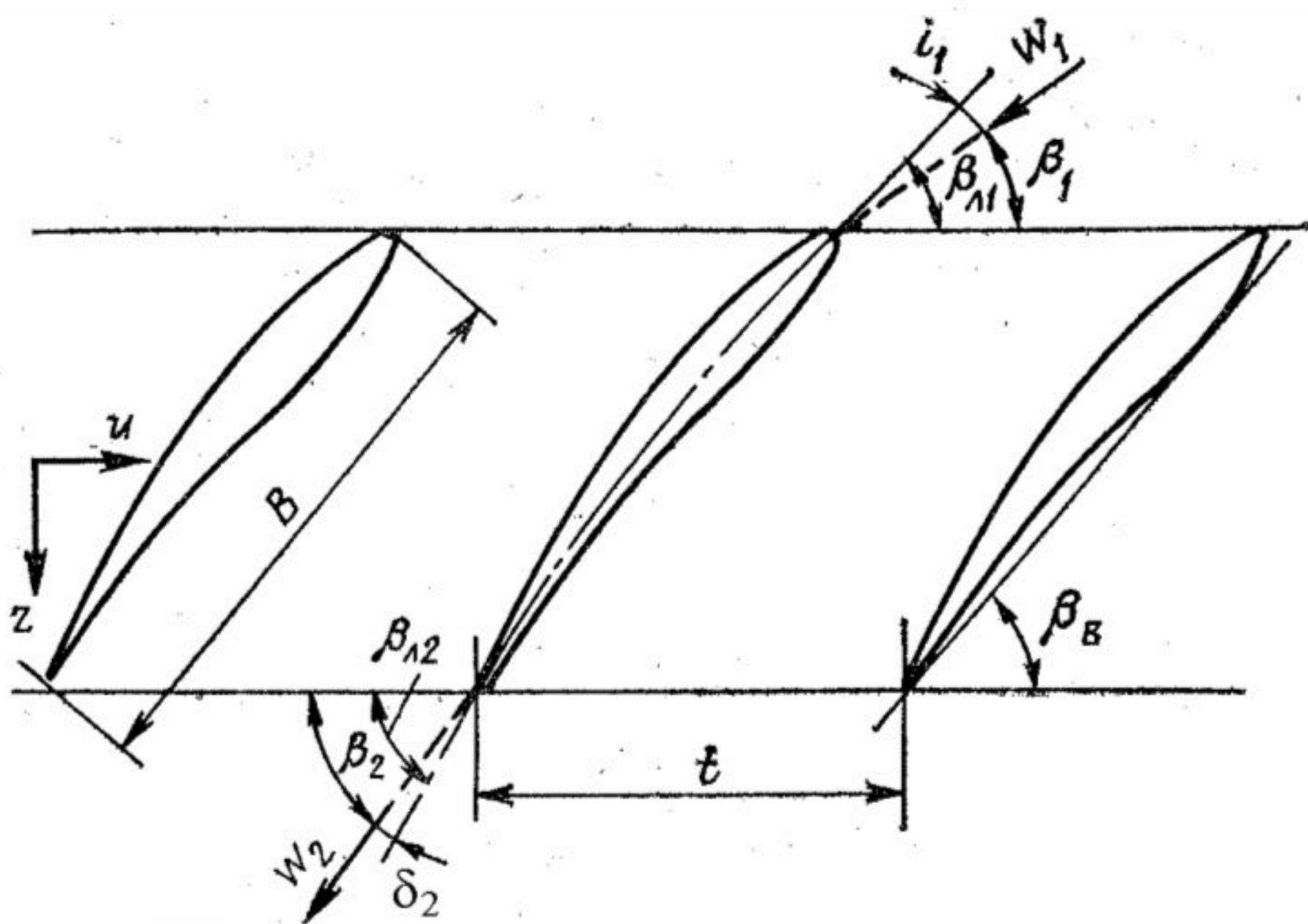
Основные геометрические параметры лопаточной решётки и профиля



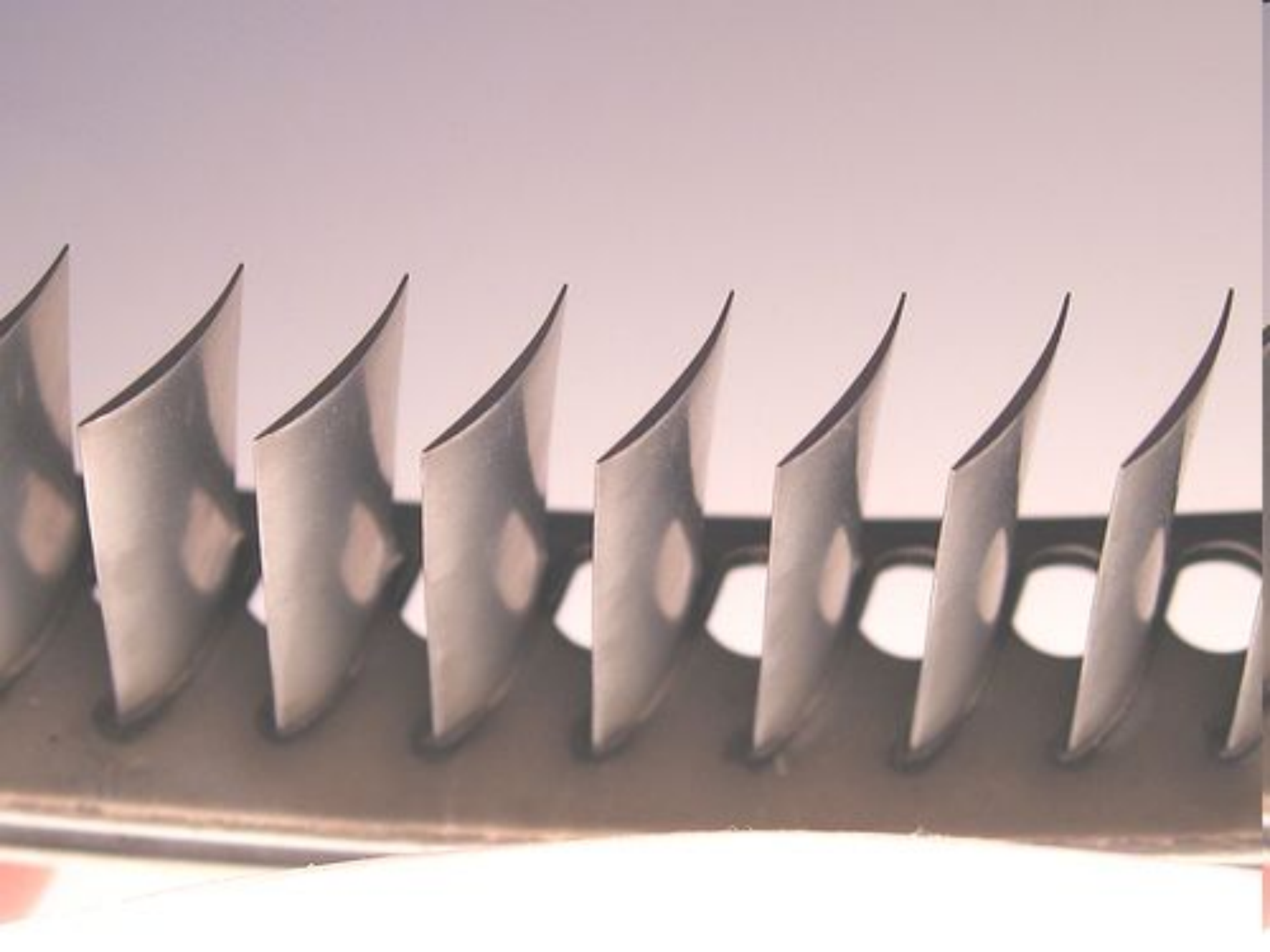
Основные параметры профиля лопатки ОК

Right-handed Boomerang





Плоская прямолинейная лопаточная решётка ОК



Действительные и условные поверхности тока

Газовые частицы движутся по осесимметричным поверхностям тока (ОПТ), соосным с ротором.

Течение на каждой из поверхностей, пересекающих лопатку, является двухмерным.

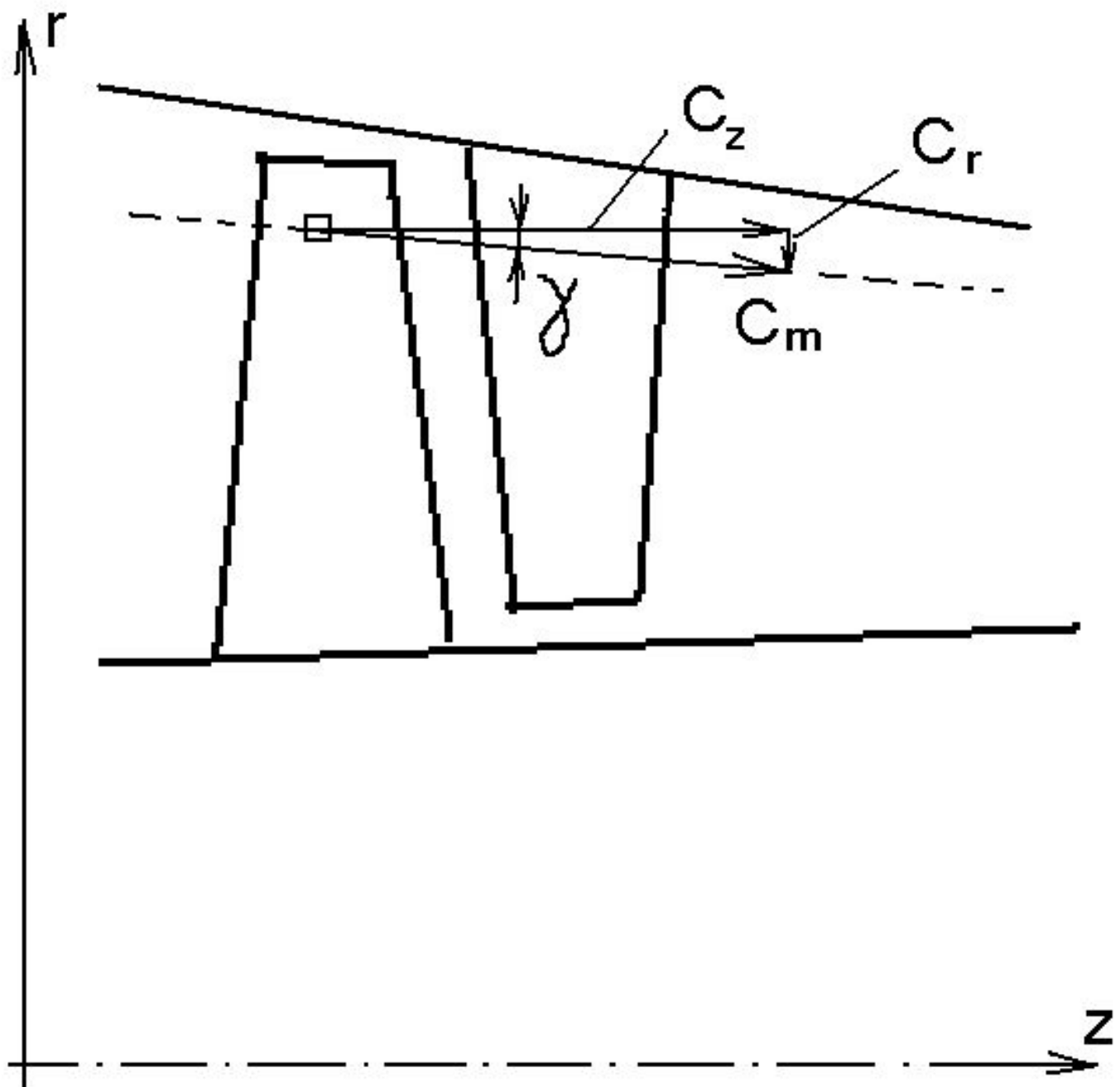
При этом часто рассматриваются не действительные поверхности тока, а условные.

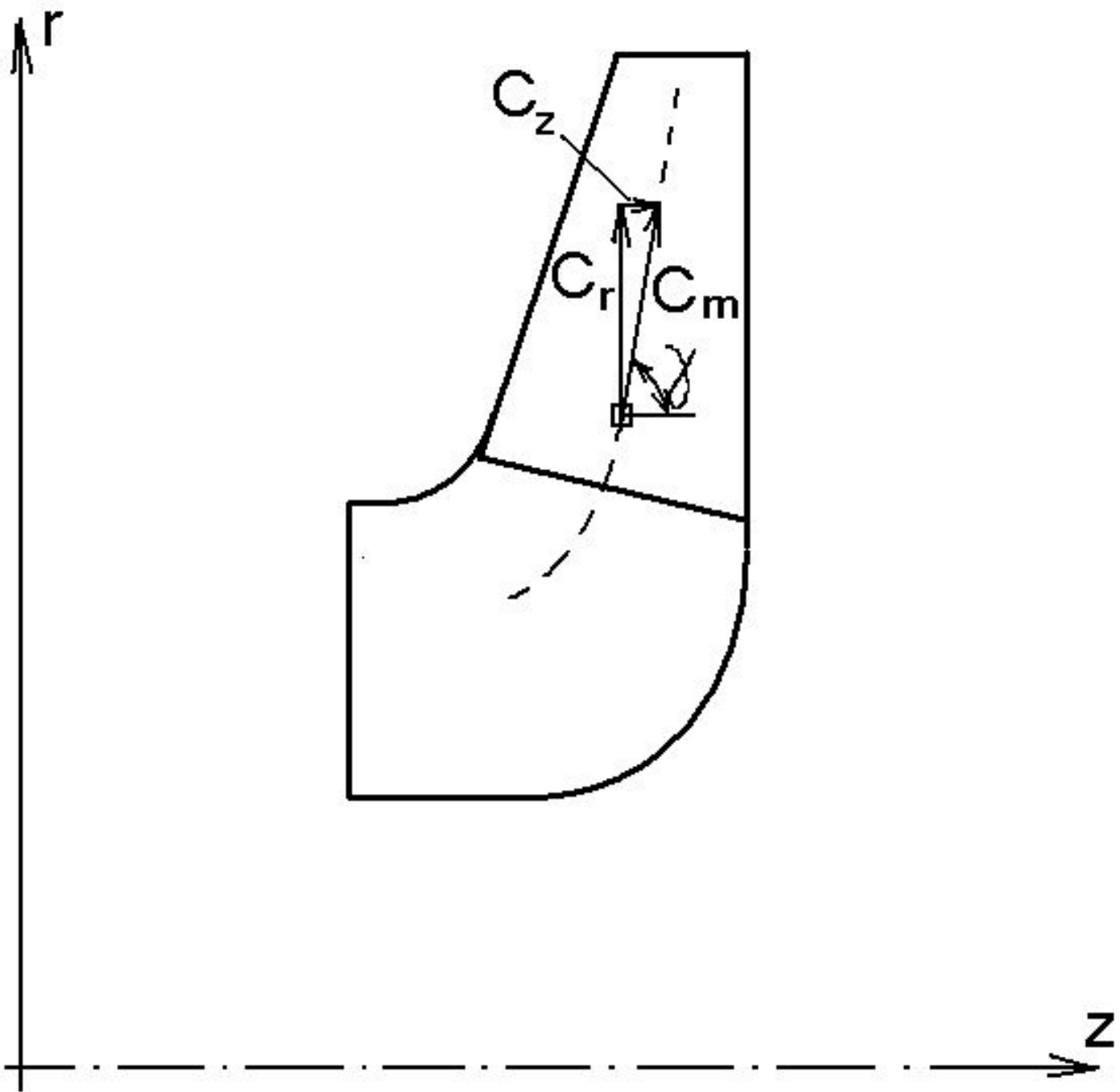
Действительные и условные поверхности тока

Условная ОПТ - ОПТ при допущении, что поверхность тока является цилиндрической (для ОК) или круговой (для ЦК).

$$c_r = c_m \sin \gamma \approx c_m$$

$$c_z = c_m \cos \gamma \ll c_r$$





Действительные и условные поверхности тока

Сумма течений на ряде ОПТ рассматривается как некое квазитрехмерное течение, в значительной степени соответствующее действительному трехмерному характеру течения.

Пространственные лопаточные решётки

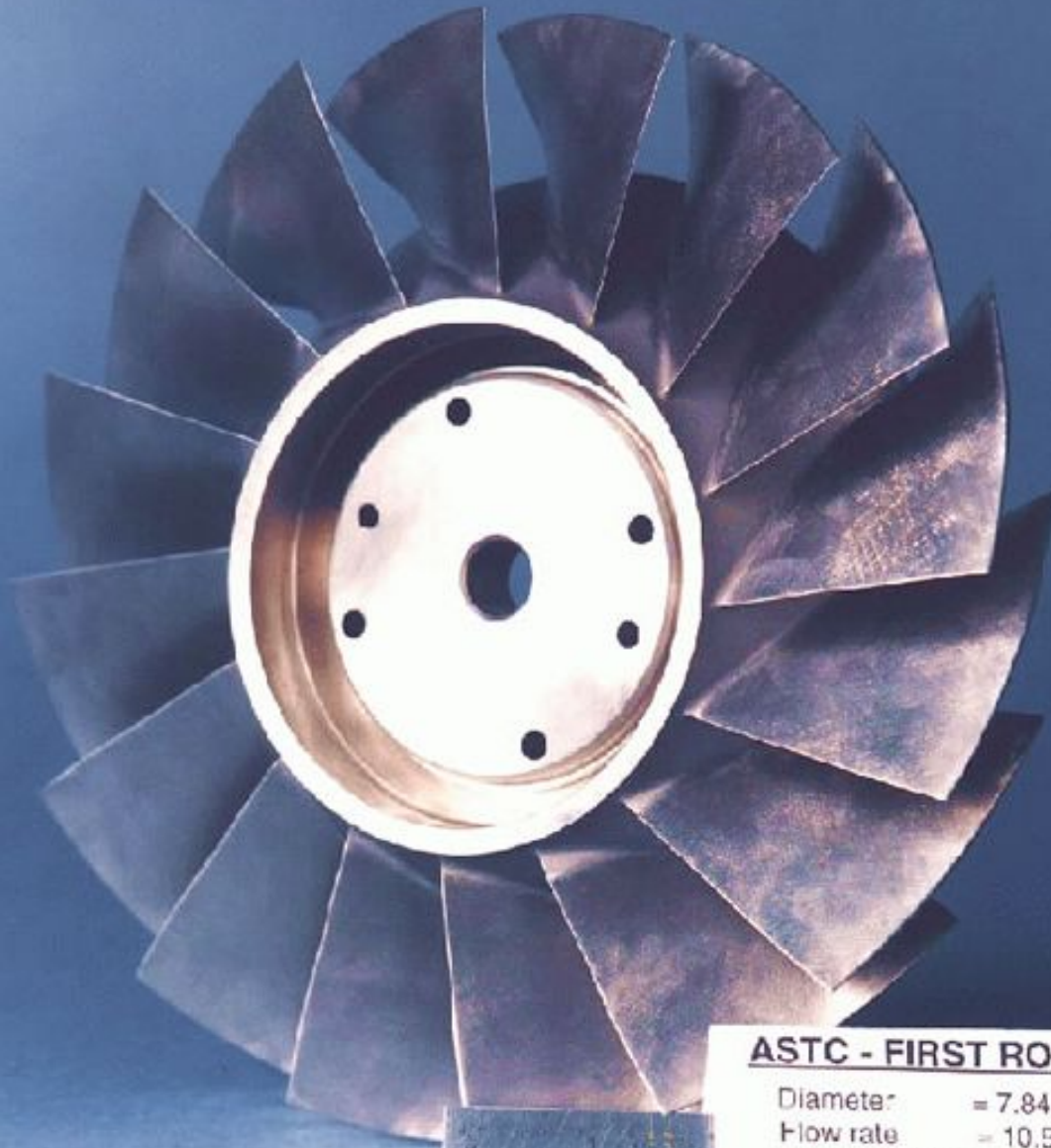
Поток, проходящий через решётки реальной ступени как осевого, так и центробежного компрессоров, является трёхмерным.

Пространственные лопаточные решётки характеризуются лопатками конечной длины.

Типы пространственных лопаточных решёток в ТК:

- Круговая решётка (ЦК)
- Кольцевая решётка (ОК)





ASTC - FIRST ROTOR

Diameter = 7.84 inches
Flow rate = 10.5 lbm/sec
Pressure Ratio = 2.63

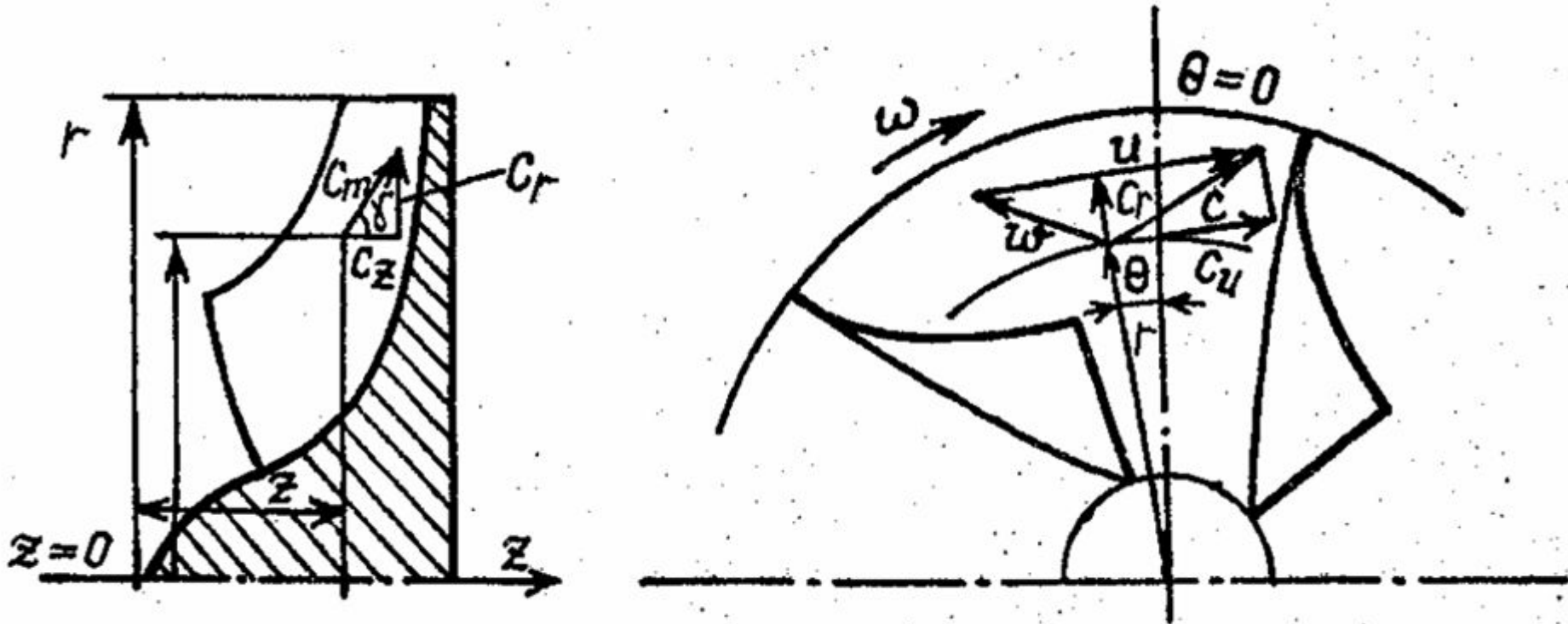
Неподвижная и вращающаяся системы координат

Для задания положения рассматриваемой точки в проточной части ТК применяется цилиндрическая система координат.

Координаты точки заданы:

- расстоянием z вдоль оси
- расстоянием точки от оси ТК – радиусом r
- центральным углом θ между произвольно выбранным радиальным направлением и радиусом r , идущим в данную точку

Неподвижная и вращающаяся системы координат



Задание положения точек и векторов скорости в ТК

Неподвижная и вращающаяся системы координат

В зависимости от решаемой задачи, скорости газового потока необходимо рассматривать либо в **абсолютной** (неподвижной, связанной с корпусом компрессора), либо в **относительной** (вращающейся вместе с ротором) системе координат.

Компоненты скорости

Скорость потока в абсолютной системе координат (связанной со статором) называется **абсолютной скоростью** и обозначается строчной латинской буквой c .

Скорость потока во вращающейся относительной системе координат (связанной с лопаткой или ротором) называется **относительной скоростью** и обозначается строчной латинской буквой w .

Компоненты скорости

Проекции скоростей на координатные оси обозначаются соответствующими буквами с подстрочными индексами z (ось компрессора), r (радиус положения точки), $u = \omega r$ (окружная скорость ротора - переносная скорость).

Компоненты скорости

$$\vec{c} = \vec{c}_u + \vec{c}_z + \vec{c}_r$$

$$\vec{c} = \vec{c}_u + \vec{c}_m$$

$$\vec{c}_m = \vec{c}_z + \vec{c}_r$$

$$\bar{m} = \rho c_m f$$

Компоненты скорости

c_u – **закрутка потока**

Угол α – между c и направлением u

Угол γ – между c_m и направлением z

Угол β – между w и направлением,

противоположным u

Компоненты скорости

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u}$$

$$c_z = w_z \quad c_r = w_r \quad w_u = c_u - u$$

Так как использована прямоугольная система координат, то

$$c = \sqrt{c_u^2 + c_z^2 + c_r^2},$$

$$w = \sqrt{w_u^2 + w_z^2 + w_r^2} = \sqrt{(c_u - u)^2 + c_z^2 + c_r^2}$$

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 3.

Входной и выходной треугольники скоростей.

Угол отставания

**Треугольники скоростей -
векторные соотношения между
скоростями c , w и u .**

Входной и выходной треугольники скоростей. Угол отставания

Общее правило построения треугольников скоростей:

1. Направление потока, движущегося в канале, или выходящего из канала, определяется направлением поверхностей межлопаточного канала за вычетом угла отставания $\Delta\beta = \beta_{n2} - \beta_2$ (рабочее колесо), $\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha$ (неподвижные лопаточные аппараты).

2. Величина расходной составляющей рассчитывается по заданному массовому расходу $c_m = w_m = \bar{m} / \rho f$, где f – площадь сечения, перпендикулярная расходной скорости.

3. Отсюда $c = c_m / \sin \alpha$ или $w = w_m / \sin \beta$.

4. По определенной таким образом скорости по правилу сложения ($\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}$) или вычитания ($\vec{w} = \vec{c} - \vec{u}$) векторов находится искомая (c или w) скорость, так как величина $u = \omega^* r$ известна по условию задачи.

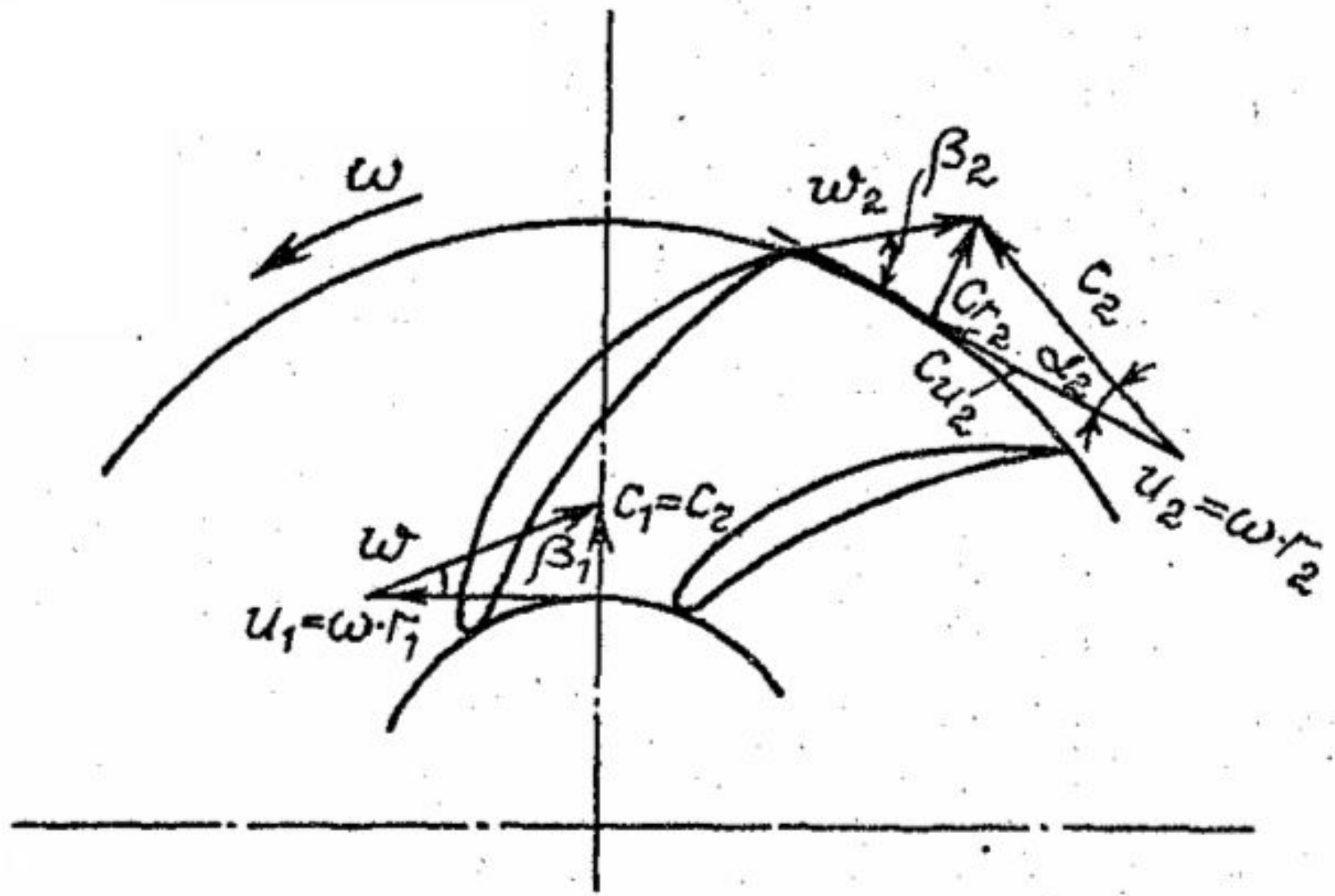


Схема лопаточной решётки РК ПЦД
и треугольники скоростей

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 3.
Входной и выходной треугольники скоростей.
Угол отставания

Входной треугольник обычно не имеет закрутки, т.е.:

$c_{u1} = 0$ и $c_1 = c_{u1} + c_{z1} + c_{r1} = c_{r1}$ с учетом принятого допущения $c_{z1} = 0$.

Величину c_1 находим по заданному массовому расходу:

$$c_1 = c_{r1} = \frac{\bar{m}}{\rho_1 f_1} = \frac{\bar{m}}{\rho_1 2\pi r_1 b_1},$$

где плотность $\rho_1 = p_1/RT_1$

Выходной треугольник. $\beta_2 < \beta_{л2}$. Здесь $\beta_{л2}$ – выходной угол лопаток, для типичных колес ПЦК угол отставания $\delta_2 = \beta_{л2} - \beta_2 \approx 10 \dots 20^\circ$. Итак, полагаем направление скорости w_2 известным:

$$\beta_2 = \beta_{л2} - \delta_2.$$

Величину w_2 определим из уравнения расхода:

$$w_2 = \bar{m} / (\rho_2 \cdot 2\pi r_2 b_2 \cdot \sin\beta_2).$$

Здесь $2\pi r_2 b_2 \cdot \sin\beta_2$ – площадь проходного сечения, перпендикулярного w_2 . Это уравнение можно представить и в виде зависимости для расходной составляющей w_{r2} , т.е. аналогично c_{r1} :

$$w_{r2} = w \cdot \sin\beta_2 = \bar{m} / \rho_2 \cdot 2\pi r_2 b_2.$$

Итак, известны величина и направление скорости w_2 , а также вектор $u_2 = \omega r_2$. По правилу сложения вектор w_2 откладываем из начала вектора u_2 . Соединяя конец вектора u_2 и начало w_2 , получаем вектор c_2 .

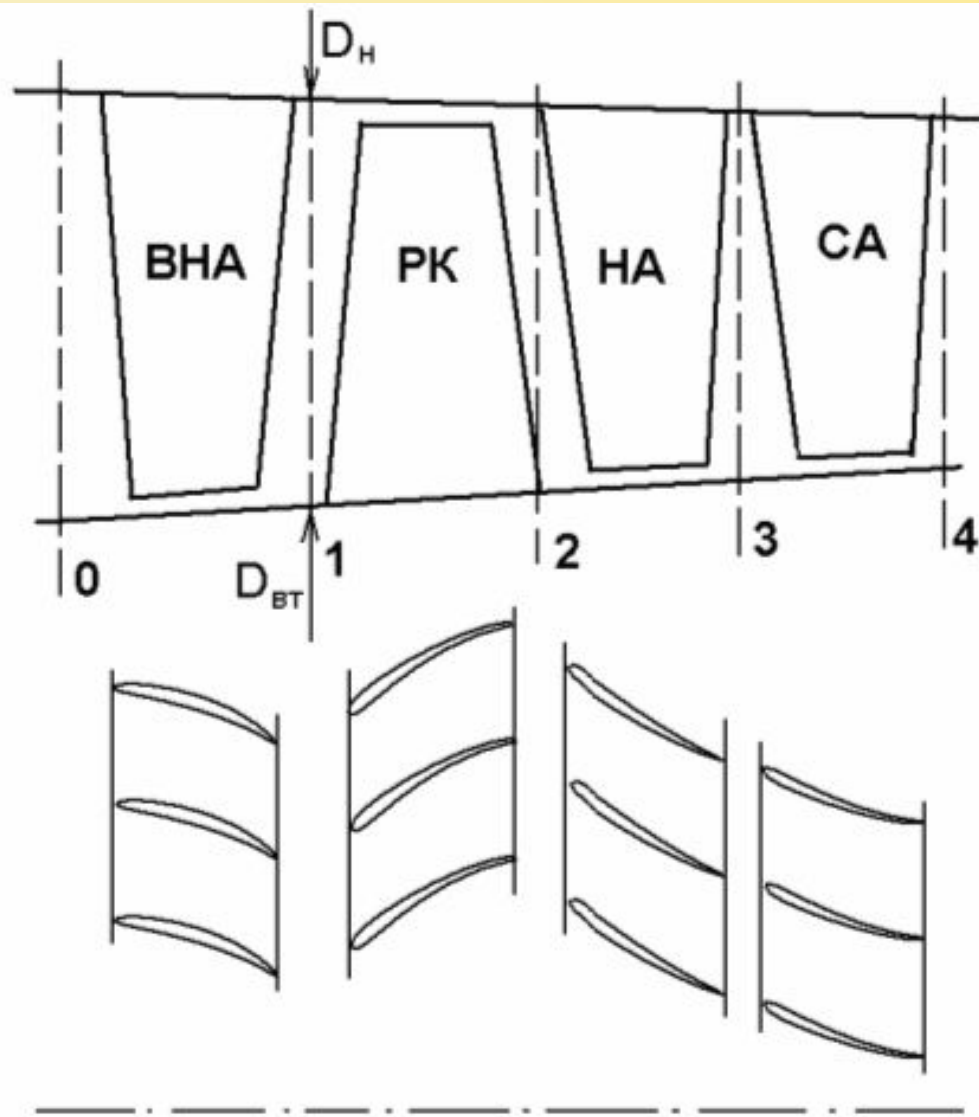
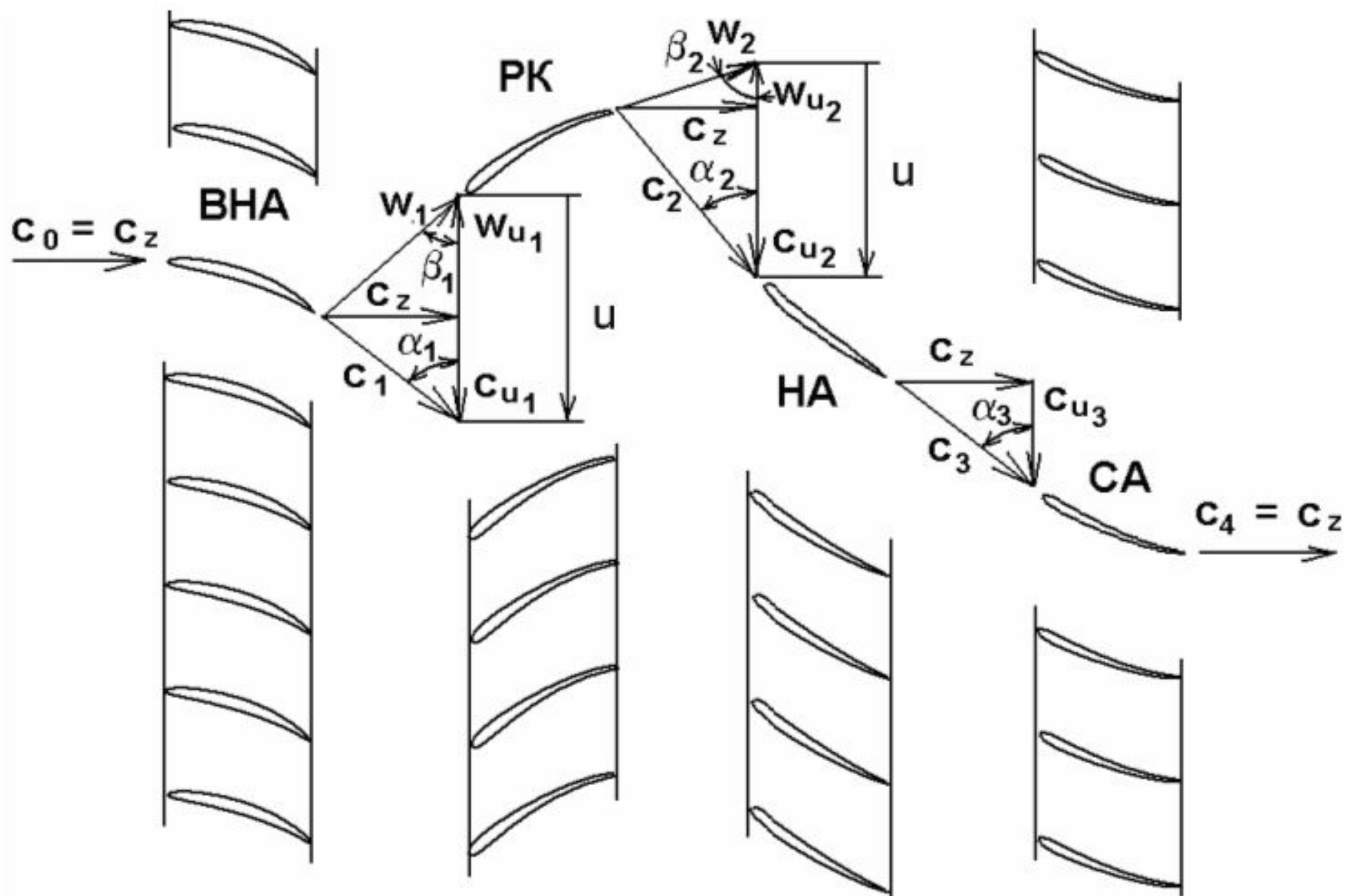


Схема проточной части одноступенчатого осевого компрессора

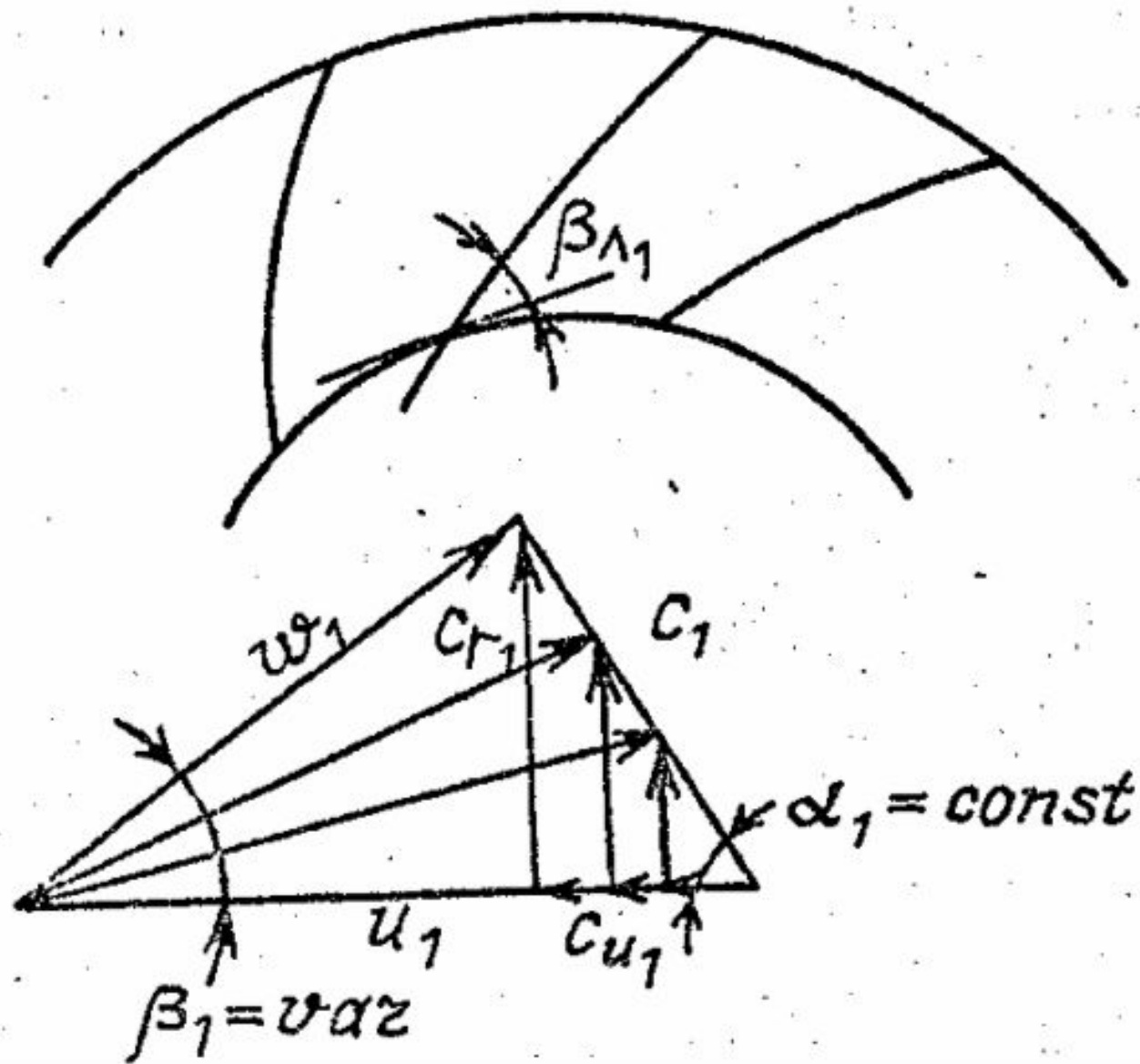


Треугольники скоростей в контрольных сечениях проточной части осевого компрессора

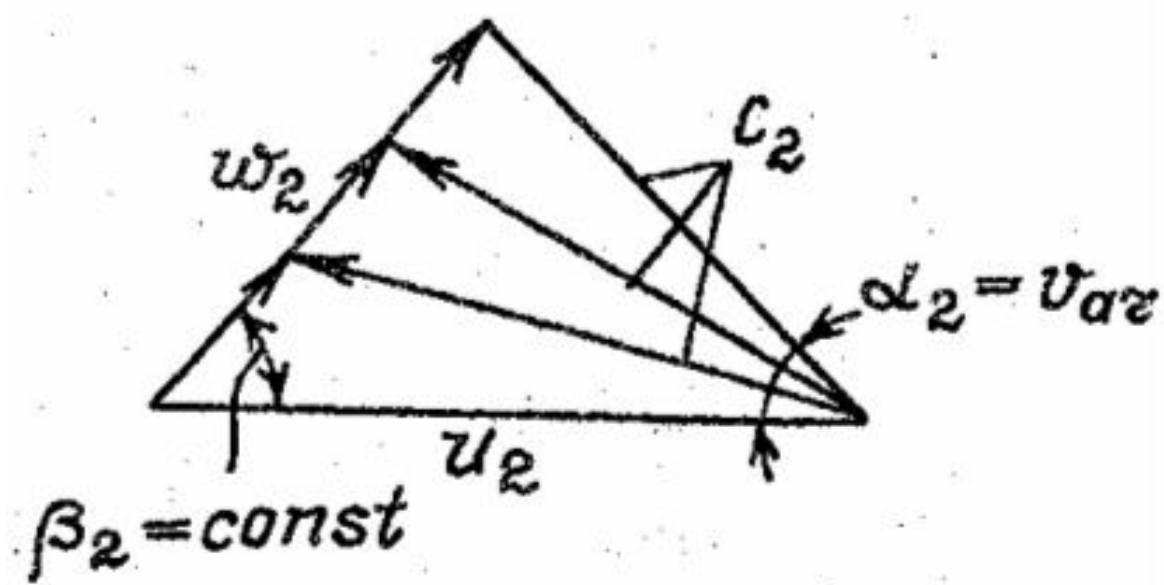
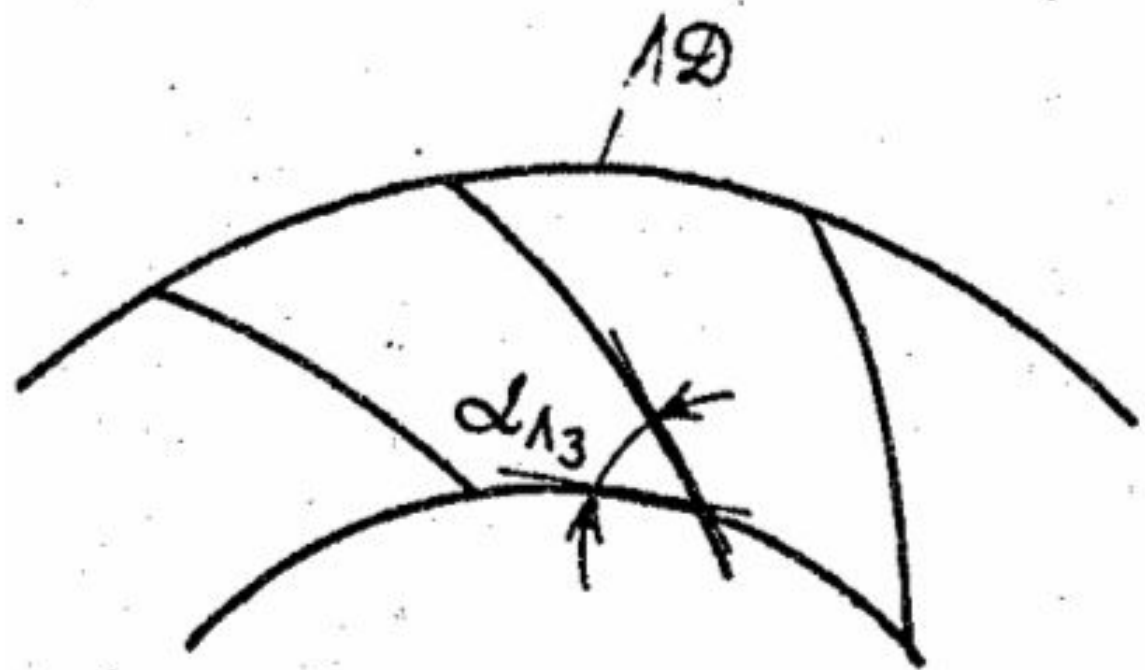
Треугольники скоростей при изменении режима работы ТК. Угол атаки

При эксплуатации ТК условия его работы могут меняться, а именно:

1. Из-за изменения сопротивления сети может меняться производительность компрессора.
2. Возможно изменение числа оборотов ротора (при некоторых видах привода это можно делать специально в соответствии с изменением других условий работы).
3. Могут меняться начальные параметры газа, например, T и p (атмосферные условия) для воздушных компрессоров.



Входной треугольник скоростей РК ПЦК при $\bar{V}_1 = \text{var}$ ($\alpha_1 < 90^\circ$)



Выходной треугольник скоростей РК ПЦК при $\bar{V}_1 = var$

$$\alpha_1 = \text{arctg}(c_{m1}/c_{u1}).$$

Скорость w_1 , меняет и величину, и направление – из-за изменения расходной составляющей скорости c_{m1} :

$$w_1 = \sqrt{(u_1 - c_{u1})^2 + c_{m1}^2} = \sqrt{(u_1 - c_{m1} \text{ctg} \alpha_1)^2 + c_{m1}^2},$$

$$\beta_1 = \text{arctg}(c_{m1}/w_{u1}) = \text{arctg}\left(\frac{c_{m1}}{u_1 - c_{m1} \text{ctg} \alpha_1}\right).$$

$$c_{m1} = c_1 \sin \alpha = \bar{V}_1 / f_1.$$

$$\beta_2 = \text{arctg} \frac{w_{m2}}{w_{u2}} = \text{arctg} \frac{c_{m2}}{u_2 - c_{u2}}.$$

$$w_{m2} = \frac{\bar{V}_2}{f_2} = \frac{\bar{m}}{\rho_2 f_2} = \frac{\bar{V}_1 \rho_1 f_1}{\rho_2 f_2},$$

$$w_2 = w_{m2} / \sin \beta_2,$$

$$w_{u2} = w_{m2} * \text{ctg} \beta_2.$$

Треугольники скоростей при изменении режима работы ТК. Угол атаки

Тогда:

$$c_2 = \sqrt{(u_2 - c_{u1})^2 + w_{m2}^2} = \sqrt{(u_2 - c_{m2} \operatorname{ctg} \beta_2)^2 + c_{m2}^2},$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{c_{m2}}{u_2 - c_{m2} \operatorname{ctg} \beta_2}.$$

Из графического изображения треугольника скоростей, и приведённых формул видно, что чем больше расходная составляющая скорости, тем больше углы потока и в абсолютном, и в относительном движении.

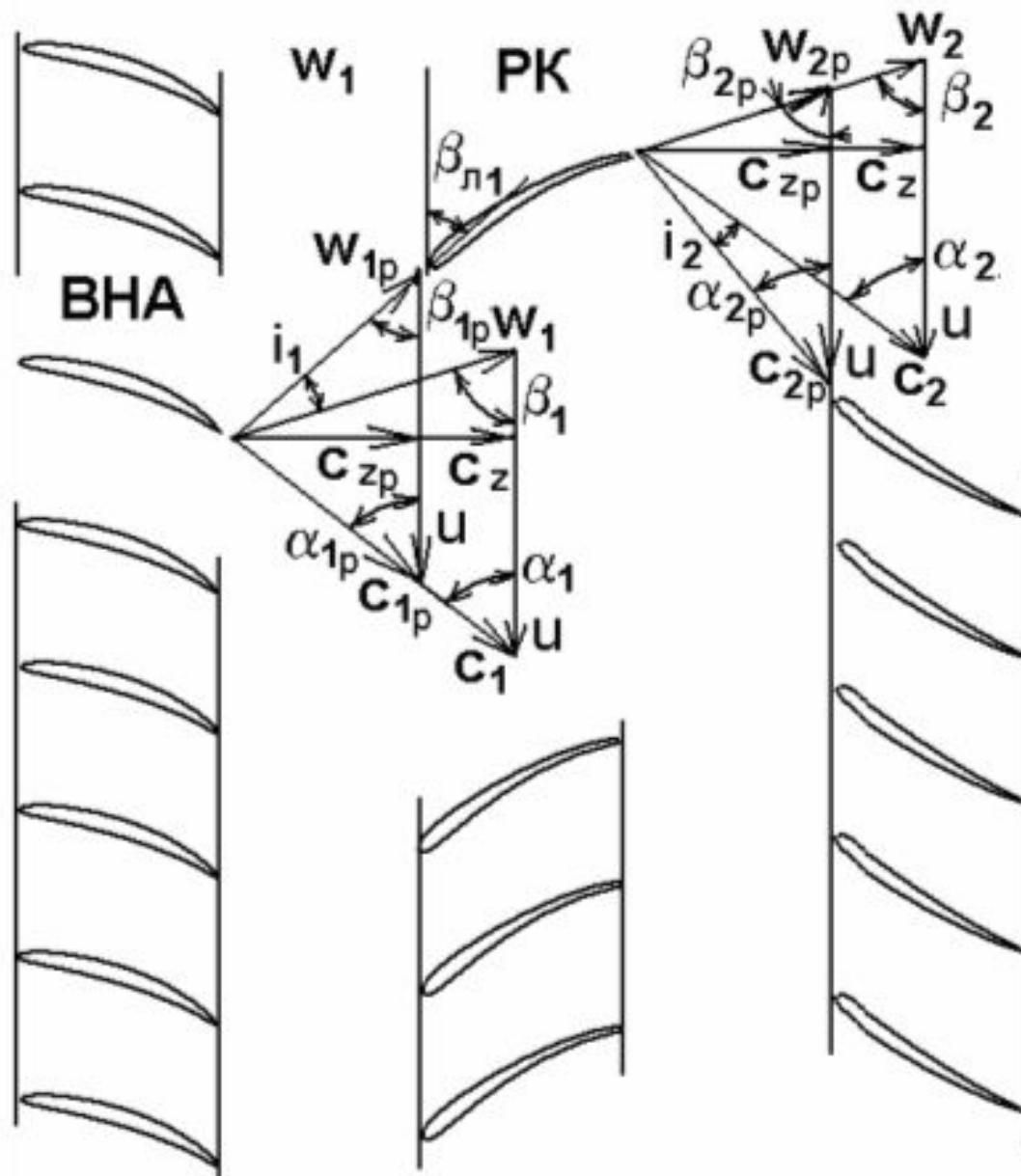
Угол атаки.

Известно, что лопаточные аппараты турбомашин являются удобообтекаемыми и имеют минимально возможные коэффициенты потерь ζ только при некоторых направлениях натекающего потока, характеризуемого так называемым углом атаки:

$$i_1 = \beta_{л1} - \beta_1 \quad \text{и} \quad i_3 = \alpha_{л3} - \alpha_3,$$

где i_1 – угол атаки на входе в РК, i_3 – угол атаки на входе в ЛД.

Из полученных соотношений следует, что большим расходам соответствуют отрицательные ($i < 0$) углы атаки, а меньшим расходам – положительные ($i > 0$).



Треугольники скоростей на входе и выходе РК осевого компрессора при изменении режима работы (индекс «р» - расчётный режим)

Рассматривается два режима: расчётный (параметры расчётного режима обозначены индексом «р») и с расходом больше расчётного значения.

$$\beta_{п1} = \beta_{1p}, \alpha_{п2} = \alpha_{2p}.$$

$$c_z = \frac{\bar{m}}{\rho F}.$$

$$c_1 = c_z / \sin \alpha_1,$$

$$c_{u1} = c_1 * \cos \alpha_1,$$

$$w_{u1} = u - c_{u1}$$

$$\beta_1 = \arctg \frac{c_z}{w_{u1}} = \arctg \frac{c_z}{u - c_z \operatorname{ctg} \alpha_1}.$$

$$i_1 = \beta_{п1} - \beta_1 = \beta_{п1} - \arctg \frac{c_z}{u - c_z \operatorname{ctg} \alpha_1}.$$

$$c_{u2} = u - w_{u2} = u - c_z \operatorname{ctg} \beta_2.$$

$$i_2 = \alpha_{п2} - \alpha_2 = \alpha_{п2} - \arctg \frac{c_z}{u - c_z \operatorname{ctg} \beta_2}.$$

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 3.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ