

## Процессы компрессоров

### Лекция 13

**Процессы компрессоров.** Классификация компрессоров и принцип действия. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие. Затрата работы на привод компрессора. Многоступенчатый компрессор. Оптимальное распределение давления по ступеням. Расчет мощности привода и отводимого при охлаждении тепла. Работа компрессора в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ - диаграммах. Необратимое сжатие. Относительный внутренний КПД компрессора. Расчет потерь эксергии и эксергетический КПД компрессора.

Компрессором называют машину для повышения давления в жидкостях или сжатия газов и паров.

По конструкционным признакам - на две группы:

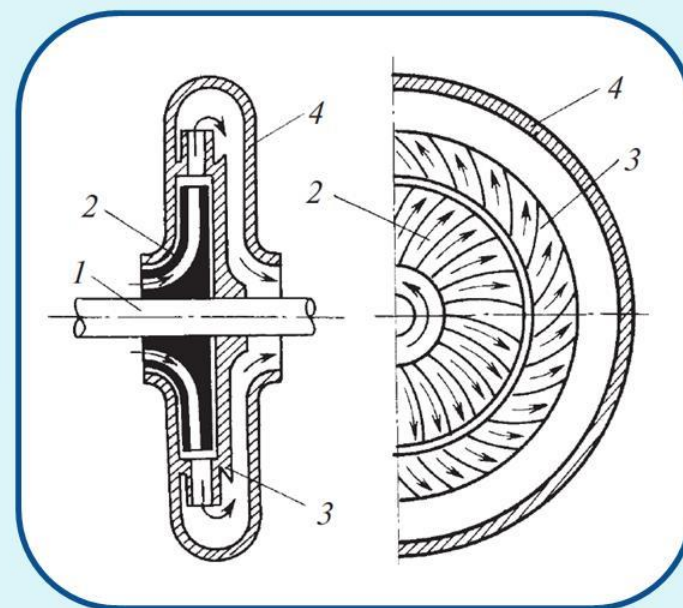
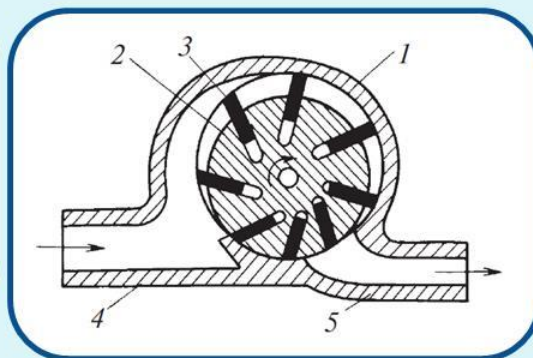
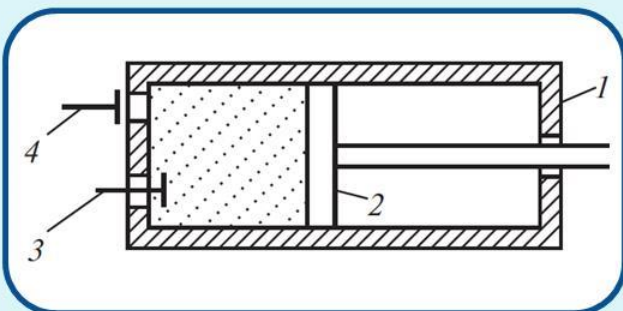
- ❑ объемные (компрессоры статического сжатия)
- ❑ лопаточные (или компрессоры динамического сжатия).

Объемные

Лопаточные

Поршневые

Ротационные



Отдельно в заключении про эжекторы

## Процесс сжатия в поршневом компрессоре

Процессы в различных компрессорах аналогичны. Анализ этого процесса удобно проводить с помощью так называемой **индикаторной диаграммы** компрессора - зависимости давления в цилиндре компрессора от переменного объема газа в цилиндре или, что то же самое, от хода поршня .

Индикаторная диаграмма записывается специальным прибором - **динамометрическим индикатором**, присоединенным к компрессору.

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p dV < 0 - \text{сжатие}$$

$$L_{2-3} = -p_2 Fx = -p_2 V_2 < 0 - \text{выталкивание}$$

$$L_{3-4} = 0 - \text{подготовка к всасыванию}$$

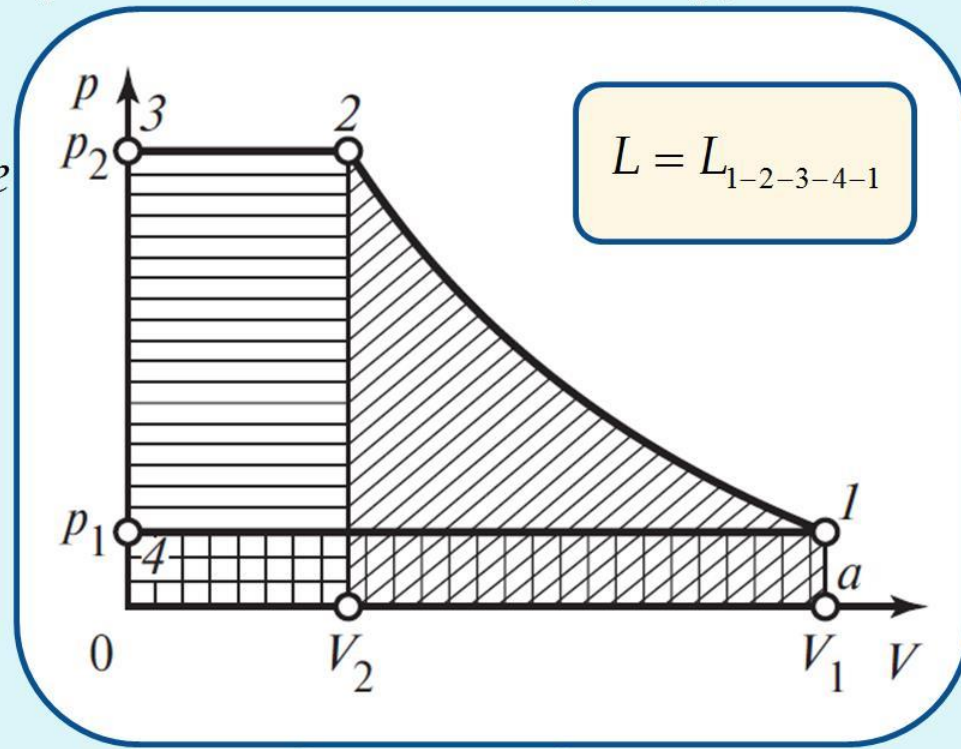
$$L_{4-1} = p_1 V_1 > 0 - \text{всасывание}$$

$$L = p_1 V_1 - p_2 V_2 + \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$p dV = d(pV) - V dp$$

$$\int_{V_1}^{V_2} p dV = p_2 V_2 - p_1 V_1 - \int_{p_1}^{p_2} V dp$$

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



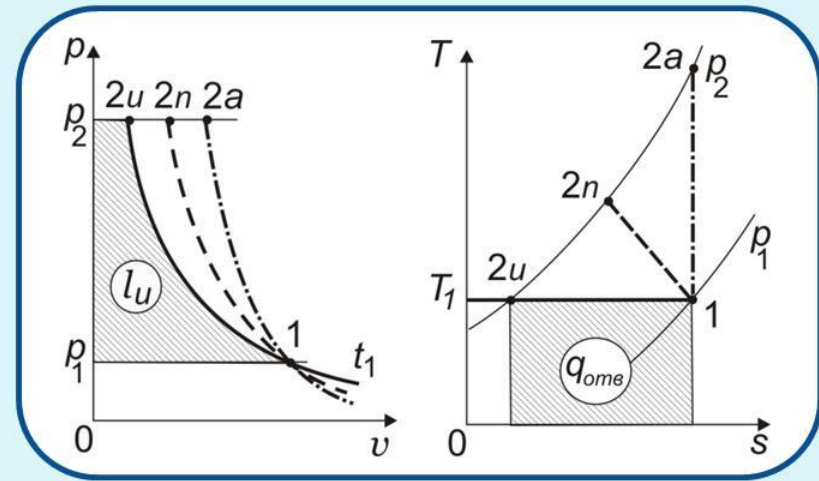
$$L = L_{1-2-3-4-1}$$

$$l = - \int_{p_1}^{p_2} v dp$$

$$l_{\text{и}} = q_{\text{отв}} = RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$l_a = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R(T_1 - T_2), \quad q_{\text{отв}} = 0, \quad T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$$

$$l_n = \frac{n}{n - 1} R(T_1 - T_2), \quad q_{\text{отв}} = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1), \quad T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}}$$



$$dq = dh - vdp$$

$$l = -(h_2 - h_1 - q_{\text{отв}})$$

$$l_{\text{реальная}} = -(h_2 - h_1 - q_{\text{отв}} + q_{\text{тр}}) = l + l_{\text{тр}}$$



Процесс – направо вверх!!!

$$\eta_{\kappa} = \frac{l_{\kappa}}{l_{\text{реальная}}}$$

$$\eta_{\text{и}} = \frac{l_{\text{и}}}{l_{\text{реальная}}}$$

$$\eta_a = \frac{l_a}{l_{\text{реальная}}}$$



$$\varepsilon = \frac{p_2}{p_1}; \quad \varepsilon_1 = \frac{p'}{p_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{p_2}{p'}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2$$

$$l_n = \frac{n}{n-1} R(T_1 - T_2), \quad T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

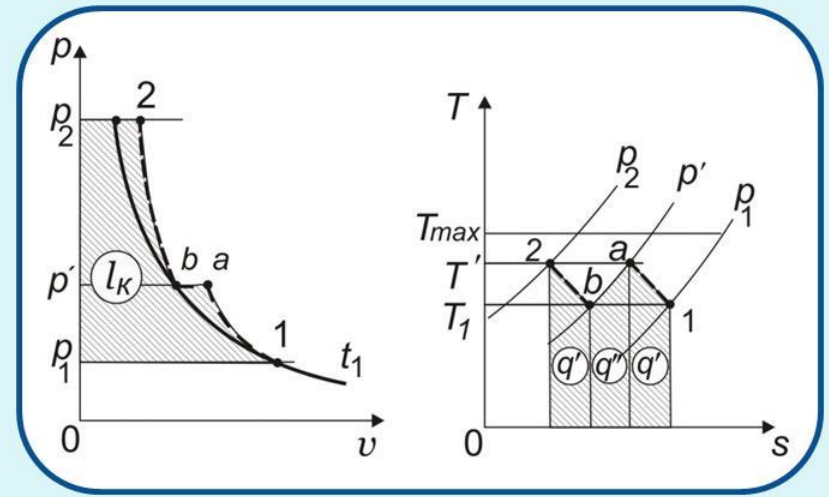
$$l_n = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$l = l_1 + l_2 = |RT_1 = p_1 v_1 = \text{const}| = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}} + 1 - \varepsilon_2^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 2 - \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$\frac{\partial l}{\partial (\varepsilon_1)} = 0 = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ -\frac{n-1}{n} \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}-1} + \frac{n-1}{n} \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \varepsilon_1^{-\frac{n-1}{n}-1} \right] = 0$$

$$\left[ \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}-1} - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \varepsilon_1^{-\frac{n-1}{n}-1} \right] = \varepsilon_1^{-\frac{n-1}{n}-1} \left[ \varepsilon_1^{\frac{2n-1}{n}} - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right] = 0$$

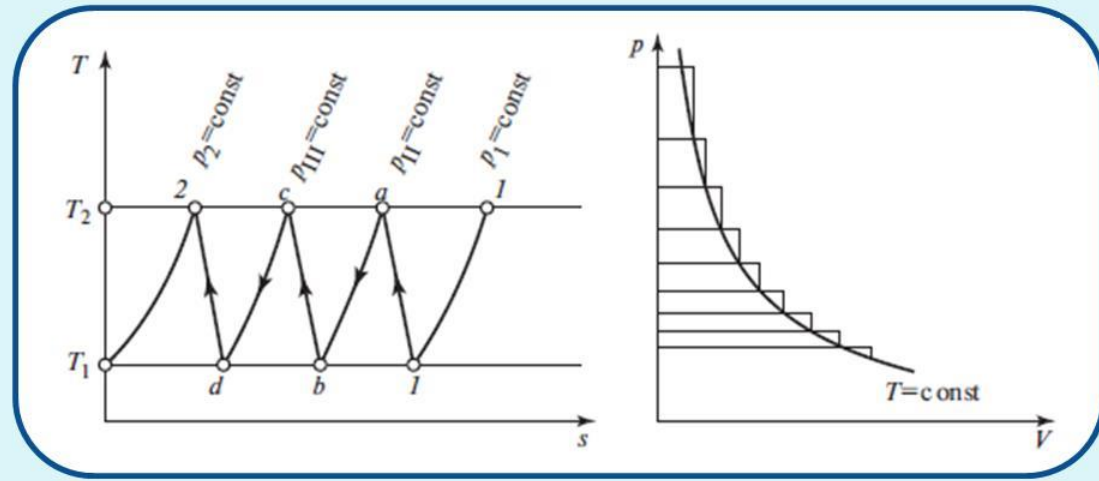
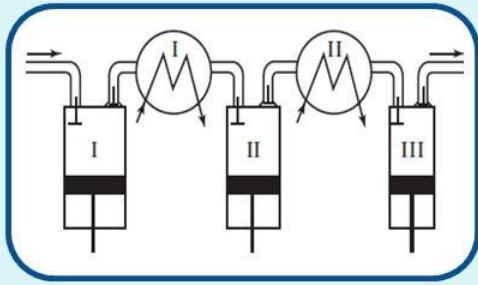
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon}$$



$$\varepsilon = \frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{\delta}{p_1} \approx 1.03 \div 1.1$$

$$l_k = -(p_2 - p_1) v_{cp}$$

$$v_{cp} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_Z = \sqrt[Z]{\varepsilon} = \sqrt[Z]{\frac{p_2}{p_1}}$$

1. на выходе из каждой ступени газ имеет одинаковую температуру;
2. в каждой ступени на сжатие затрачивается одинаковая работа;
3. в каждой ступени отводится одинаковая теплота;
4. в каждом охладителе отводится одинаковая теплота.

$$T' < T_{\max} \Rightarrow \varepsilon_{\max} = \left( \frac{T_{\max}}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \Rightarrow Z_{\min} \geq \frac{\ln(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon_{\max})} \Rightarrow Z \Rightarrow \varepsilon_Z = \sqrt[Z]{\varepsilon} \Rightarrow T' = T_1 \cdot (\varepsilon_Z)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$l_K = Z \cdot l_{\text{ступени}}$$

$$q_{\text{ступени}} = Z \cdot q_{\text{отв}}$$

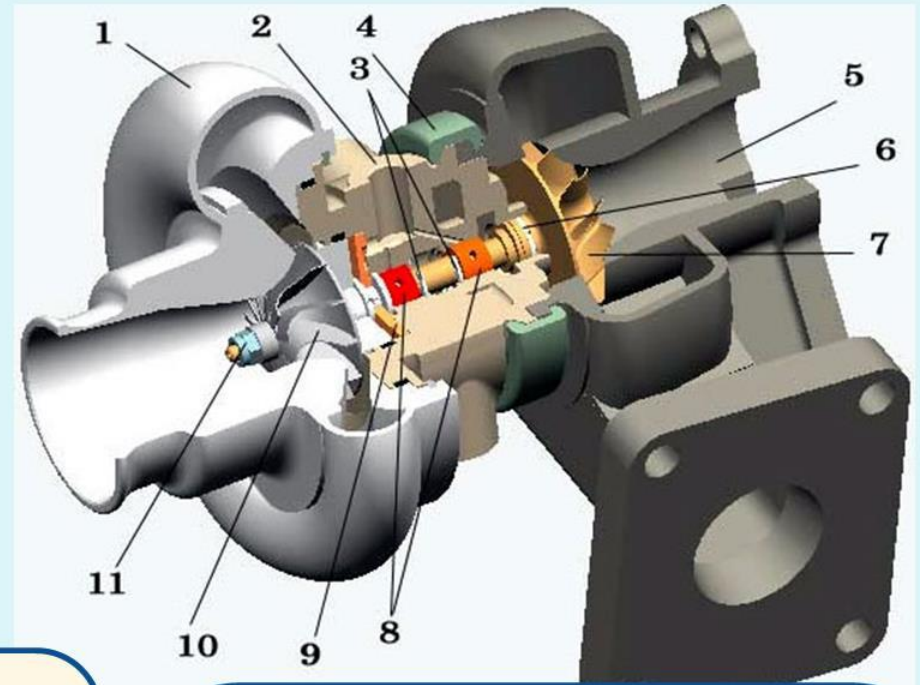
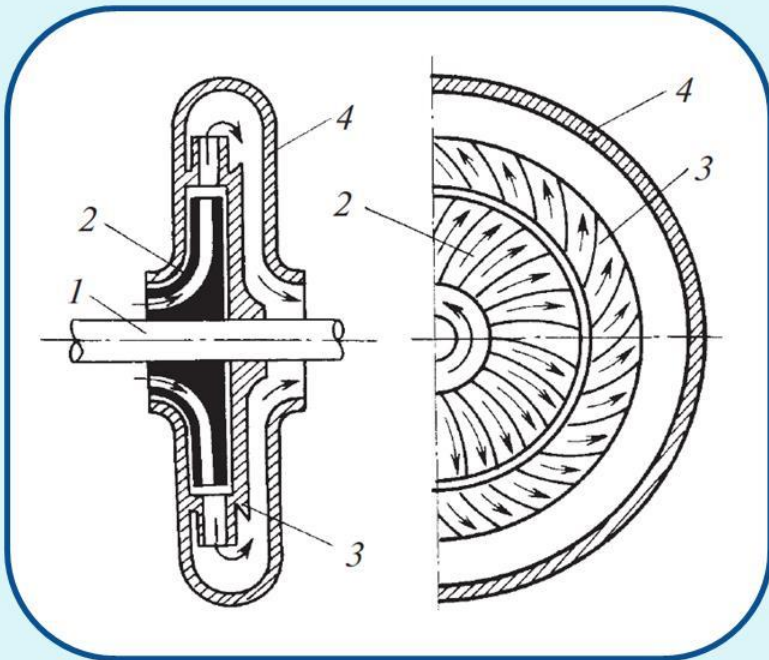
$$q_{\text{меж.ступеней}} = (Z - 1) \cdot c_p \cdot (T_1 - T')$$

$$q_{\text{отв}} = q_{\text{ступени}} + q_{\text{меж.ступеней}}$$

$$N_K = l_K \cdot G$$

$$Q_{\text{отв}} = q_{\text{отв}} \cdot G$$

## Турбокомпрессор



$$l_{\kappa} = -(h_2 - h_1) - \left[ \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \right] - g(z_2 - z_1) + q_{\text{отв}} - l_{\text{тр}}$$

$$\text{при } w_2^2 \approx w_1^2 \quad z_2 \approx z_1 \quad l_{\text{тр}} \approx 0$$

$$l_{\kappa} = -(h_2 - h_1) + q_{\text{отв}}$$

**Выражение совпадает с соответствующим для поршневого**

- 1 - улитка компрессора;
- 2 - корпус;
- 3 - стопорные кольца;
- 4 - стяжной хомут;
- 5 - улитка турбины;
- 6 - уплотнительное кольцо со стороны турбины (аналогичное есть со стороны компрессора, на рис. его не видно);
- 7 - колесо турбины;
- 8 - промежуточные втулки подшипников скольжения;
- 9 - упорный подшипник скольжения;
- 10 - колесо компрессора;
- 11 - гайка.



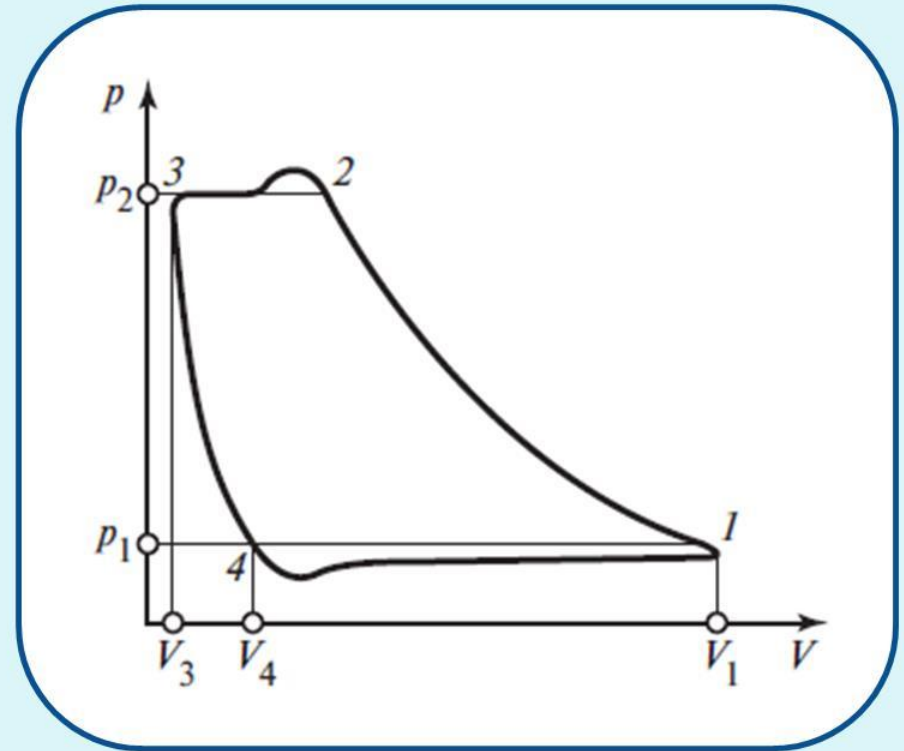
## Работа реального компрессора $L^*$

$$L^* = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right] - \frac{n}{n-1} p_1 V_4 \left[ 1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$L^* = \frac{n}{n-1} p_1 (V_1 - V_4) \left[ 1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$G^* = \frac{p_1 (V_1 - V_4)}{RT_1}$$

$$L^* = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ 1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right] G^*$$



$(V_1 - V_4)$  - реальный рабочий объем

$G^*$  - выталкиваемая масса (расход)

## Эжектор (струйном компрессор)

$$G = G_1 + G_2$$

$$Gh = G_1h_1 + G_2h_2$$

$$h = \frac{G_1h_1}{G} + \frac{G_2h_2}{G}$$

Коэффициент эжекции  $k_э = \frac{G_2}{G_1}$

$$h = \frac{h_1 + k_э h_2}{1 + k_э}$$

Если потерь нет, то  $Gs = G_1s_1 + G_2s_2$

$$k_э = \frac{h_1 - h}{h - h_2} = \frac{s - s_1}{s_2 - s}$$

$k_э^m$  - коэффициент эжекции при существовании потерь

Иногда  $\frac{k_э^m}{k_э}$  называют КПД эжектора.

