

# КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ: «ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТА ГАЗА»

---

«Определение оптимального распределения нагрузки между двумя параллельно работающими ГПА до и после изменения параметров перекачки газа»

Выполнил: Медянкин В.Н.

Группа: ТН-12-01

Проверил: проф. Калинин А.Ф.

28.04.2016

# Исходные данные

- 1 ГТК-25И «УРАЛ», оснащенный нагнетателем PCL-804-2
- 1 ГПА-16 «Волга», оснащенные нагнетателями НЦ-16/76-1,44

$$Q_{K1} \approx 68 \text{ сутки}^3 Q \quad ; \quad m_{K2} \approx 76 \text{ сутки}^3 /$$

- Характеристики природного газа на входе в ЦБН:

$$P_{1(\text{случай})} = 5,4 \quad ; \quad P_{1(\text{случай})} = 5,0 \quad r \quad ; \quad \alpha = 10^\circ \quad ; \quad C_{H_4} = 0,96$$

- Давление газа на выходе:  $P_2 = 1,3$  ;
- Молярная масса природного газа:  $\mu_m = 16,3 \text{ кг / кмоль}$ ;
- Коэффициент технического состояния ЦБН:  $K_H = 0,91$ ;
- Коэффициенты технического состояния ГТУ:  $K_{\text{ГТ}} = 0,92$ ;  $K_{\text{ГТ}} = 1,05$
- Цена топливного газа:  $c_{\text{тг}} = 4100 \text{ руб. / } 1000 \text{ м}^3$ ;

# Цель:

- ○ Определить оптимальное распределение нагрузки  $N_{ер}$  и расхода газа  $Q_k$  между ГПА, а также значение действительной частоты вращения свободной турбины ГПА  $n_D$ , расход топливного газа  $Q_{ТГ}$  и энергетической составляющей эксплуатационных затрат  $C_{ЭН.С.К}$
- Сопоставить характеристики режимов работы ГПА (частоты вращения силовых турбин  $n_D$ , политропные КПД  $\eta_{пол}$ , внутренние  $N_i$  и эффективные  $N_e$  мощности сжатия, расходы топливного газа  $Q_{ТГ}$ ) до и после увеличения расхода газа  $Q_k$  через ГПА с энергетической, экономической и экологической точек зрения.

# Определение рабочей точки ЦБН PCL-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

$$N_{ep25И} = N_{e0} \cdot K_{Ne} \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_{pa} = 23,9 \cdot 0,92 \cdot 1 \cdot 0,985 \cdot 1 = 21,67 \text{ МВт}$$

$$N_{ep16} = N_{e0} \cdot K_{Ne} \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_{pa} = 16 \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 0,985 \cdot 1 = 14,51 \text{ МВт}$$

$$\frac{Q_{25И}}{Q_{16}} = \frac{Q_{25И}}{Q_K - Q_{25И}} = \frac{N_{ep25И}}{N_{ep16}}$$

тогда получим:

$$Q_{25И} = \frac{N_{ep25И} \cdot Q_K}{N_{ep25И} + N_{ep16}} = \frac{21,67 \cdot 68}{21,67 + 14,51} = 40,73 \frac{\text{млн. м}^3}{\text{сут}}$$

$$\rho_{ст} = \frac{P_{ст}}{T_{ст} \cdot \frac{\bar{R}}{\mu}} = \frac{101325}{293,15 \cdot \frac{8314}{16,3}} = 0,678 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \rho_{вх} = 43,93 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{вх} = \frac{Q_{804} \cdot \rho_{ст}}{\rho_{вх}} = \frac{40,73 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot 0,678 = 436,33 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

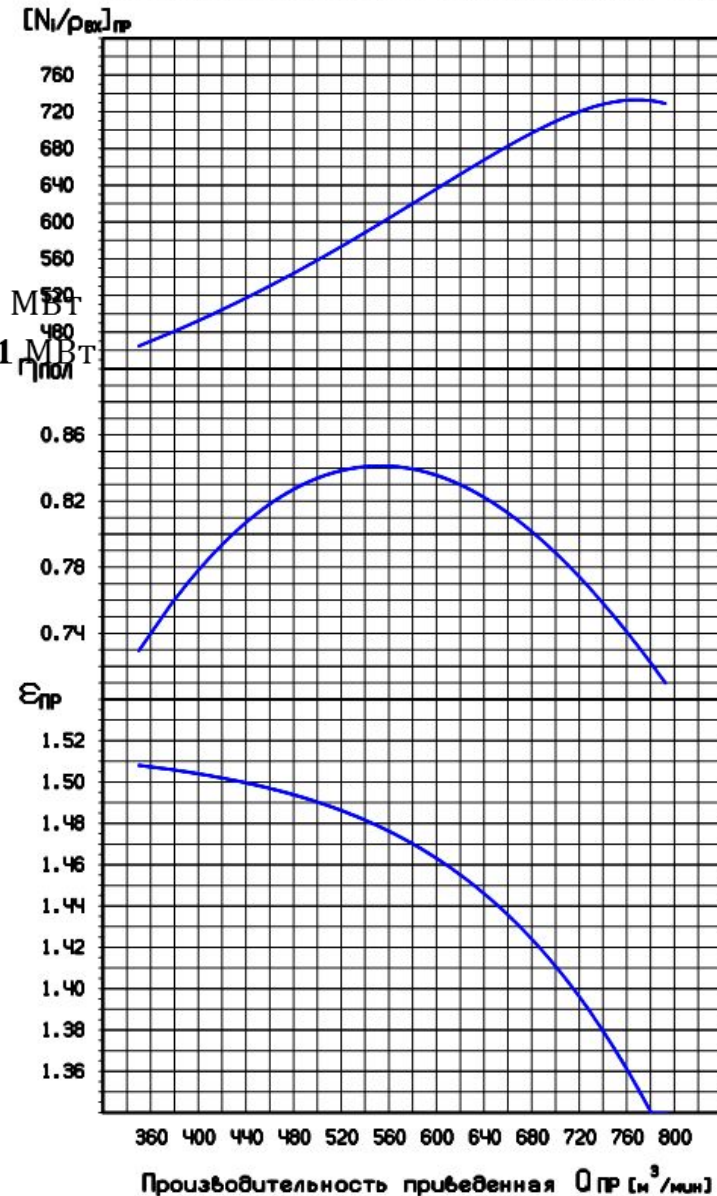
$$1) Q_{вх.пр} = Q_{вх} = 436,3 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,5; \frac{n}{n_H} = 0,823$$

$$2) Q_{вх.пр} = 520,8 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,486; \frac{n}{n_H} = 0,835$$

$$3) Q_{вх.пр} = 521,9 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,485; \frac{n}{n_H} = 0,836$$

## ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГНЕТАТЕЛЯ PCL-804-2

$T_{гр} = 288 \text{ К}, R_{гр} = 510,1 \text{ Дж/(кг К)}, Z_{гр} = 0,900, \rho_H = 4900 \text{ кг/м}^3$



Производительность приведенная  $Q_{гр}$  [ $\text{м}^3/\text{мин}$ ]

# Определение рабочей точки ЦБН PCL-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

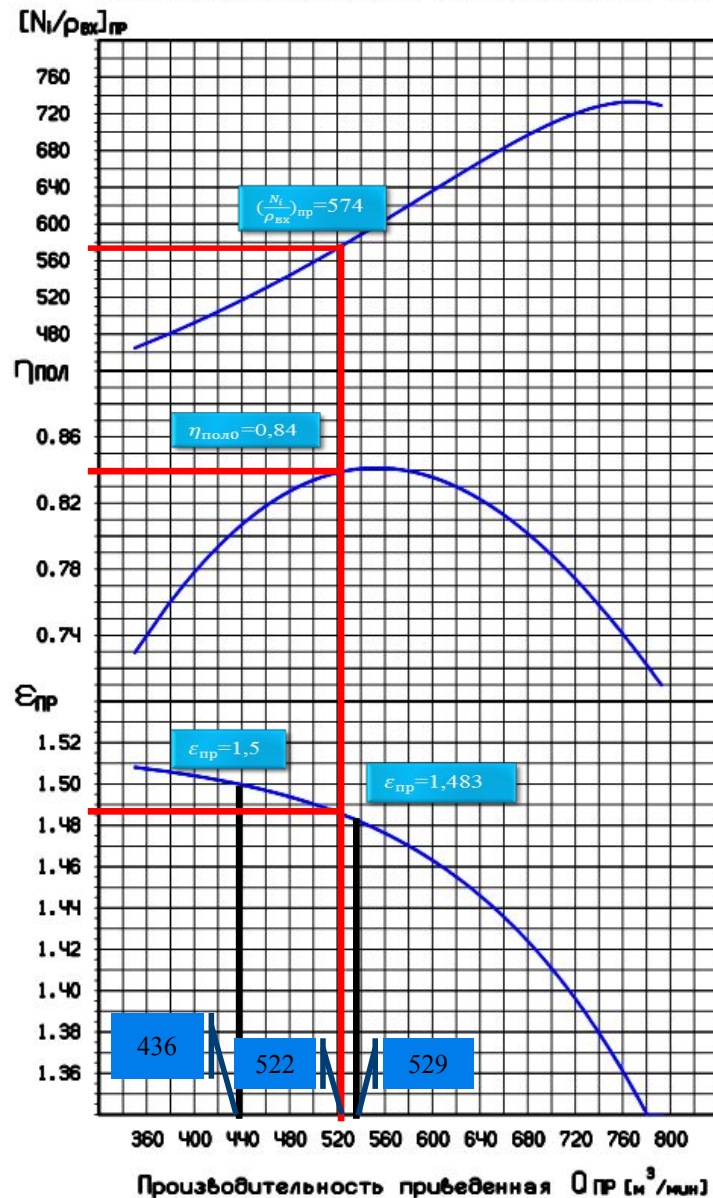
ГТК-2 5И			$\varepsilon$	n/nн.	Тпр.		Zпр.	nн, об/мин.
1	436,3	1,5	1,352	0,823	288	510,1	0,9	4900
2	529,9	1,483	1,352	0,838				
3	520,8	1,486	1,352	0,835				
4	522,4	1,485	1,352	0,836				
5	521,9	1,485	1,352	<b>0,836</b>				
6	<b>521,9</b>							

$$\frac{n}{n_H} = \sqrt{\frac{(\varepsilon - 1) Z_{\text{ВХ}} T_{\text{ВХ}} R}{(\varepsilon_{\text{пр}} - 1) (Z_{\text{ВХ}} T_{\text{ВХ}} R)_{\text{пр}}}}$$

$$Q_{\text{ВХ.пр}} = 521,9 \text{ м}^3/\text{МИН}; \varepsilon_{\text{пр}} = 1,485; \frac{n}{n_H} = 0,836$$

## ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГНЕТАТЕЛЯ PCL-804-2

Тпр = 288 К, Rпр = 510.1 дм/(кг·К), Zпр = 0.900, nн = 4900 об/мин



# Определение рабочей точки ЦБН РСЛ-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

**Политропный КПД процесса сжатия газа в ЦБН, находящегося в идеальном техническом состоянии, а также приведенная относительная внутренняя мощность.**

$$\eta_{\text{пол0}} = 0,84; \left(\frac{N_i}{\rho_{\text{ВХ}}}\right)_{\text{пр}} = 574 \frac{\text{кВт}}{\text{кг/м}^3}$$

Действительная частота оборотов РК:

$$K_n = \frac{n_d}{n_0} = (1,33 - 0,33K_H) = 1,33 - 0,33 \cdot 0,91 = 1,03; n_d = K_n n_H \frac{n}{n_H} = 1,03 \cdot 4900 \cdot 0,836 = 4218 \text{ об/мин}$$

$$\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол0}} \cdot K_H = 0,84 \cdot 0,91 = 0,764 - \text{действительный политропный КПД}$$

$$N_i = \left(\frac{N_i}{\rho_{\text{ВХ}}}\right)_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{ВХ}} \cdot \left(\frac{n}{n_H}\right)^3 = 574 \cdot 43,93 \cdot (0,836 \cdot 1,0297)^3 = 16,06 \text{ МВт}$$

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{16,06}{0,985} = 16,30 \text{ МВт}$$

$$\bar{N}_{\text{епр}} = \frac{N_e}{N_{e0}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ВХ0}}}{T_{\text{ВХ}}}} \cdot \frac{p_{a0}}{p_a} = \frac{16,305}{23,9} \cdot \sqrt{\frac{288}{288}} \cdot \frac{760}{760} = 0,68$$

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{\text{епр}}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}})} = \frac{0,68}{1 - 0,75 \cdot (1 - 0,68)} = 0,896$$

$$K_{\eta_e} = \frac{1}{K_{\text{ТГ}}} = \frac{1}{1,05} = 0,952$$

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot \bar{\eta}_e \cdot K_{\eta_e} = 0,278 \cdot 0,896 \cdot 0,952 = 0,237$$

$$B_{\text{ТГ}} = \frac{N_e}{\eta_e \cdot Q_{\text{нр}}} = \frac{16,30 \cdot 10^6}{0,237 \cdot 33488} = 2,022 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 7279 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

$$N_{\text{епр25И}} = 21,67 \text{ МВт}$$

$$N_{\text{епр25И}} > N_{e25И}$$

# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА

$$(Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год}; )$$

$$Q_{16} = Q_K - Q_{25И} = 68 - 40,73 = 27,27 \frac{\text{млн. м}^3}{\text{сут}}$$

$$\rho_{\text{ст}} = 0,678 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \rho_{\text{вх}} = 43,93 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{\text{вх}} = \frac{Q_{16} \cdot \rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{вх}}} = \frac{27,27 \cdot 10^6 \cdot 0,678}{43,93} = 297,2 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7,3}{5,4} = 1,352$$

$$\eta_{\text{пол0}} = 0,83; \frac{N_i}{P_H} = 186 \frac{\text{кВт}}{\text{ата}}; \frac{n}{n_H} = 0,86$$

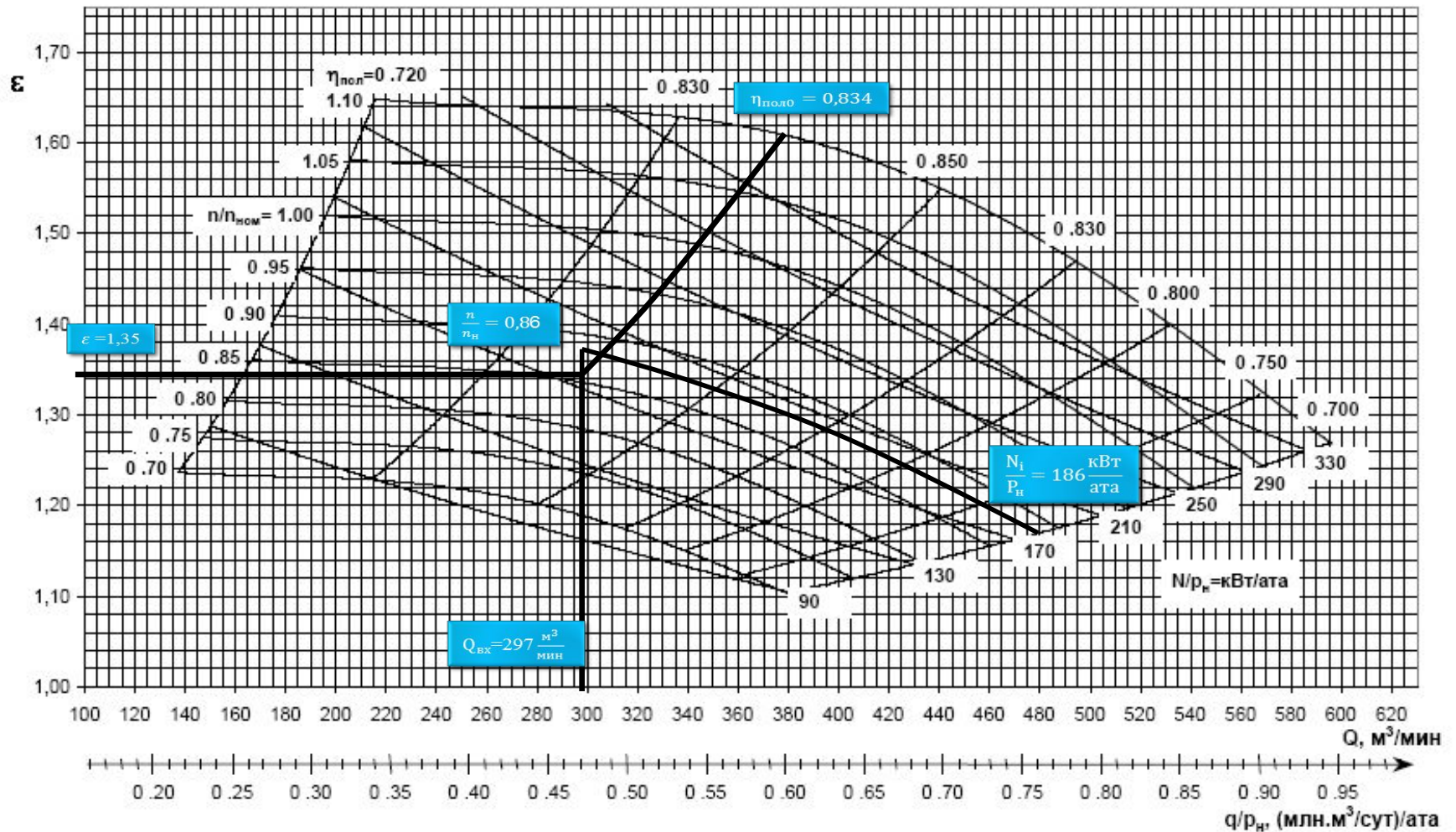
---

Покажем на графике рабочую точку.

# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА

( $Q_k = 68$ "черный" и  $76$ "красный" млн.  $m^3$ /год; )

Газодинамические характеристики компрессора НЦ-16/76-1,44 "Волга",  
расчётные величины:  $k = 1.312$  ,  $Z = 0.895$  ,  $R = 507.9$  Дж/(кг.К),  $T_H = 288K$ ,  $n_{ном} = 5300$  об/мин





# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА

$$(Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год};)$$

$$\frac{n_D}{n_H} = K_n \cdot \frac{n}{n_H} = 1,03 \cdot 0,86 = 0,88 \text{ – относительная действительная Ч.О.}$$

$$n_D = n_H \cdot \frac{n_D}{n_H} = 5300 \cdot 0,88 = 4695 \text{ об/мин – действительная Ч.О.}$$

$$\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}0} \cdot K_H = 0,834 \cdot 0,91 = 0,76 \text{ – действительный политропный КПД}$$

$$N_i = P_{\text{вх}} \cdot \frac{N_i}{P_H} = 5,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{186}{98100} = 10,24 \text{ МВт – внутренняя мощность сжатия}$$

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{10,24}{0,985} = 10,39 \text{ МВт – эффективная мощность, вырабатываемая ГТД}$$

$$\bar{N}_{\text{епр}} = \frac{N_e}{N_{e0}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{вх}0}}{T_{\text{вх}}}} \cdot \frac{p_{a0}}{p_a} = \frac{10,39}{16} \cdot \sqrt{\frac{288}{288}} \cdot \frac{760}{760} = 0,65 \text{ – приведенная относит. мощ. ГТУ}$$

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{\text{епр}}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}})} = \frac{0,65}{1 - 0,75 \cdot (1 - 0,65)} = 0,88 \text{ – относительный КПД ГТУ}$$

$$K_{\eta_e} = \frac{1}{K_{\text{тр}}} = \frac{1}{1,05} = 0,952 \text{ – коэф. тех. сост. ГТУ по эфф. КПД}$$

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot \bar{\eta}_e \cdot K_{\eta_e} = 0,274 \cdot 0,88 \cdot 0,952 = 0,23 \text{ – действительный эфф. КПД ГТУ}$$

$$B_{\text{тр}} = \frac{N_e}{\eta_e \cdot Q_{\text{нр}}} = \frac{10,39}{0,23 \cdot 33488} = 1,35 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 4860 \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \text{ – расход ТГ}$$

$$N_{\text{еп}16} = 14,51 \text{ МВт}$$

$$N_{\text{еп}16} > N_{e16}$$

## Экономические показатели

$$(Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год})$$

### Экономические затраты:

$$C_{\text{ЭН.З}} = B_{\text{ТГ}} \cdot C_{\text{ТГ}} = 7279 \cdot 4,1 \cdot 24 = 716,3 \text{ тыс. руб./сут (ГТК-25И «УРАЛ»)}$$

$$C_{\text{ЭН.З}} = B_{\text{ТГ}} \cdot C_{\text{ТГ}} = 4860 \cdot 4,1 \cdot 24 = 478,2 \text{ тыс. руб./сут (ГПА-16 «Волга»)}$$

### Энергетическая составляющая эксплуатационных затрат

$$C_{\text{Э}} = \frac{3,6 \cdot c_{\text{ТГ}}}{Q_{\text{НР}}} \cdot \sum \frac{N_{ii}}{\eta_{ei} \cdot \eta_{\text{мех}i}} = \frac{3,6 \cdot 4,1}{33488} \cdot \left( \frac{16,06 \cdot 10^3}{0,237 \cdot 0,985} + \frac{10,24 \cdot 10^3}{0,23 \cdot 0,985} \right) = 50,23 \text{ руб./сек}$$

Ответ на вопрос:

$$\frac{N_{ep1}}{N_{ep2}} = \frac{21,67}{14,51} = 1,5 \approx \frac{N_{e1}}{N_{e2}} = \frac{16,30}{10,39} = 1,57$$

# Определение рабочей точки ЦБН PCL-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 76 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

$$N_{ep25И} = 21,67 \text{ МВт}; N_{ep16} = 14,51 \text{ МВт.}$$

$$Q_{вх.пр} = 561,9 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

Получим:

$$Q_{25И} = \frac{N_{ep25И} \cdot Q_K}{N_{ep25И} + N_{ep16}} = \frac{21,67 \cdot 76}{21,67 + 14,51} = 45,5 \frac{\text{млн. м}^3}{\text{сут}}$$

$$\rho_{вх} = 42,12 \text{ кг/м}^3; \rho_{ст} = 0,678 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$Q_{вх} = \frac{Q_{25И} \cdot \rho_{ст}}{\rho_{вх}} = \frac{45,52 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot 0,678 = 508,6 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

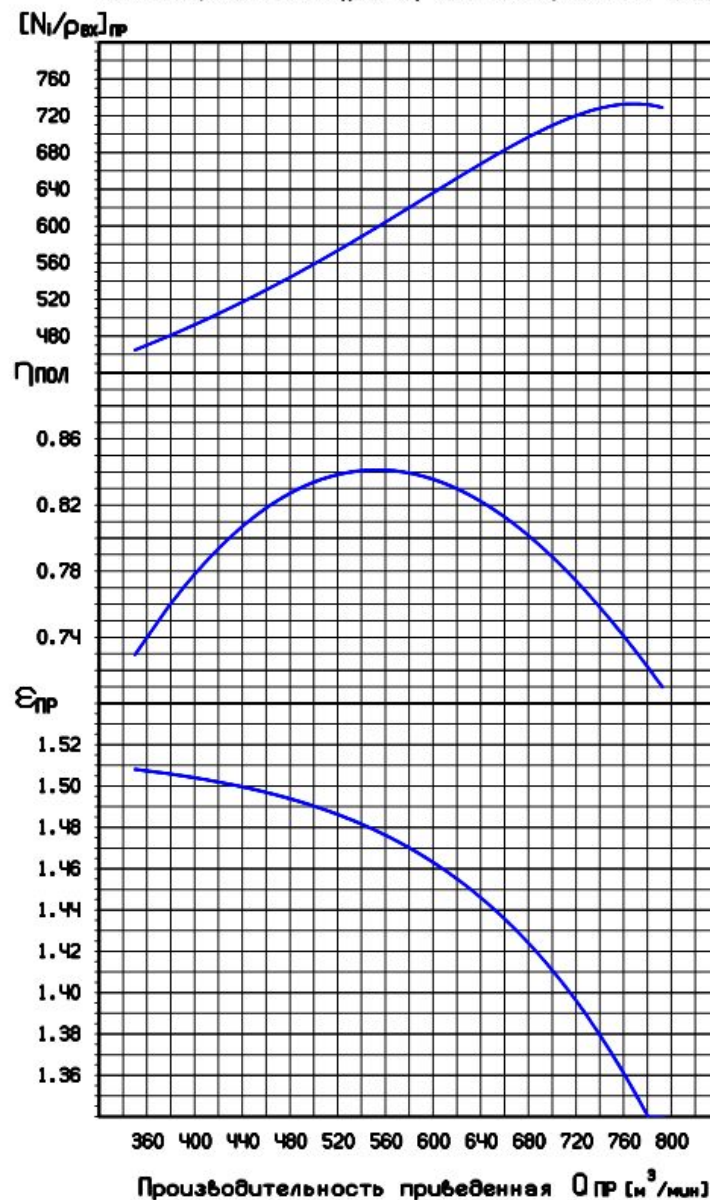
$$1) Q_{вх.пр} = Q_{вх} = 508,6 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,49; \frac{n}{n_H} = 0,895$$

$$2) Q_{вх.пр} = 568,4 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,47; \frac{n}{n_H} = 0,908$$

$$3) Q_{вх.пр} = 561,9 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{пр} = 1,475; \frac{n}{n_H} = 0,906$$

## ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГНЕТАТЕЛЯ PCL-804-2

$T_{пр} = 288 \text{ К}, R_{пр} = 510.1 \text{ Дж/(кг К)}, Z_{пр} = 0.900, \Gamma_H = 4900 \text{ об/мин}$



# Определение рабочей точки ЦБН PCL-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 76 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

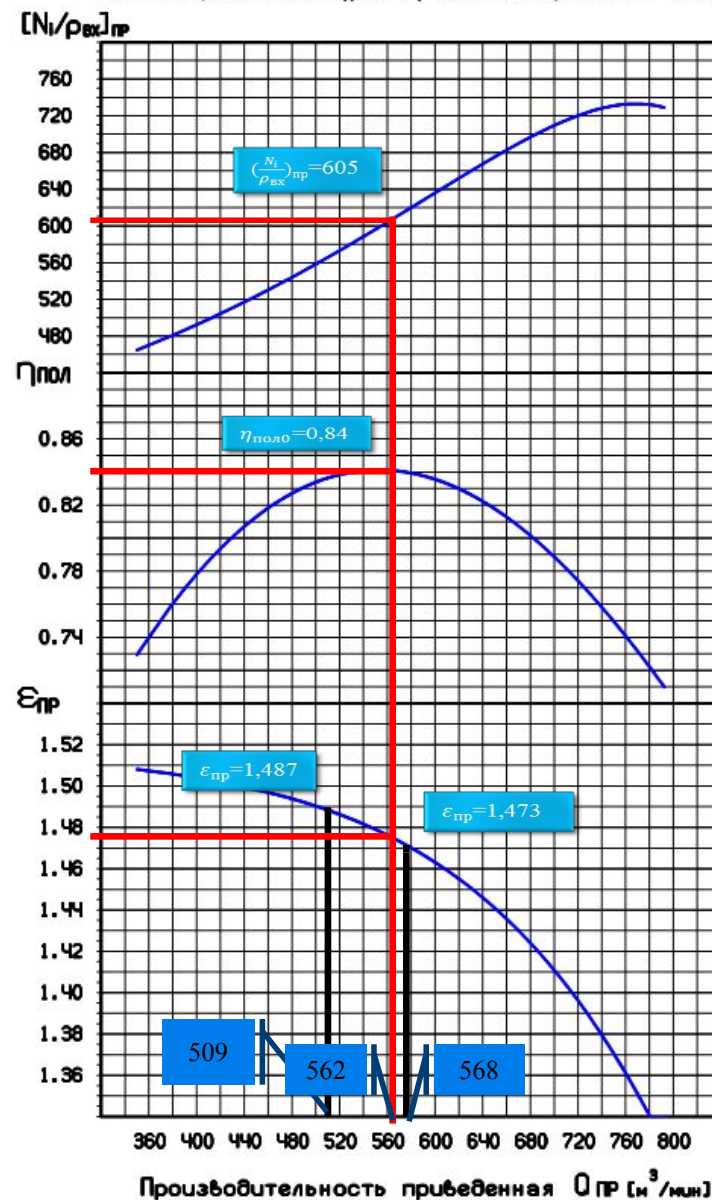
ГТК-2 5И			$\varepsilon$	n/пн.	Tпр	Zпр.	пн, об/мин
1	508,62	1,487	1,404	0,895	288	510,1	4900
2	568,39	1,473	1,404	0,908			
3	560,16	1,476	1,404	0,905			
4	561,94	<b>1,475</b>	1,404	<b>0,906</b>			
5	<b>561,94</b>						

$$\frac{n}{n_H} = \sqrt{\frac{(\varepsilon - 1) Z_{\text{ВХ}} T_{\text{ВХ}} R}{(\varepsilon_{\text{пр}} - 1) (Z_{\text{ВХ}} T_{\text{ВХ}} R)_{\text{пр}}}}$$

$$Q_{\text{ВХ.пр}} = 561,9 \text{ м}^3/\text{мин}; \varepsilon_{\text{пр}} = 1,475; \frac{n}{n_H} = 0,906$$

## ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГНЕТАТЕЛЯ PCL-804-2

Tпр = 288 К, Rпр = 510.1 дм/(кг·К), Zпр = 0.900, Пн = 4900 об/мин



# Определение рабочей точки ЦБН РСЛ-804-2, установленного на ГТК-25И, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год};$ )

**Политропный КПД процесса сжатия газа в ЦБН, находящегося в идеальном техническом состоянии, а также приведенная относительная внутренняя мощность.**

$$\eta_{\text{пол0}} = 0,84; \left(\frac{N_i}{\rho_{\text{вх}}}\right)_{\text{пр}} = 605 \frac{\text{кВт}}{\text{кг/м}^3}$$

Действительная частота оборотов РК:

$$K_n = \frac{n_d}{n_0} = (1,33 - 0,33K_H) = 1,33 - 0,33 \cdot 0,91 = 1,03; n_d = K_n n_H \frac{n}{n_H} = 1,03 \cdot 4900 \cdot 0,906 = 4572 \text{ об/мин}$$

$$\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол0}} \cdot K_H = 0,84 \cdot 0,91 = 0,764 - \text{действительный политропный КПД}$$

$$N_i = \left(\frac{N_i}{\rho_{\text{вх}}}\right)_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{вх}} \cdot \left(\frac{n}{n_H}\right)^3 = 605 \cdot 42,12 \cdot (1,0279 \cdot 0,906)^3 = 20,69 \text{ МВт}$$

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{20,69}{0,985} = 21,01 \text{ МВт}$$

$$\bar{N}_{\text{епр}} = \frac{N_e}{N_{e0}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}} \cdot \frac{P_{\text{а0}}}{P_{\text{а}}} = \frac{21,01}{23,9} \cdot \sqrt{\frac{288}{288}} \cdot \frac{760}{760} = 0,879$$

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{\text{епр}}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}})} = \frac{0,879}{1 - 0,75 \cdot (1 - 0,879)} = 0,967$$

$$K_{\eta e} = \frac{1}{K_{\text{ТГ}}} = \frac{1}{1,05} = 0,952$$

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot \bar{\eta}_e \cdot K_{\eta e} = 0,278 \cdot 0,967 \cdot 0,952 = 0,256$$

$$B_{\text{ТГ}} = \frac{N_e}{\eta_e \cdot Q_{\text{нр}}} = \frac{21,01 \cdot 10^3}{0,237 \cdot 33488} = 2,45 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 8823 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

$$N_{\text{еп25И}} = 21,67 \text{ МВт}$$

$$N_{\text{еп25И}} > N_{e25И}$$

# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА

$$(Q_K = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год}; )$$

$$Q_{16} = Q_K - Q_{25И} = 76 - 45,5 = 30,5 \frac{\text{млн. м}^3}{\text{сут}}$$

$$Q_{\text{вх}} = \frac{Q_{16} \cdot \rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{вх}}} = \frac{30,48 \cdot 10^6}{24 \cdot 60} \cdot 0,678 = 340,50 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7,3}{5,2} = 1,4;$$

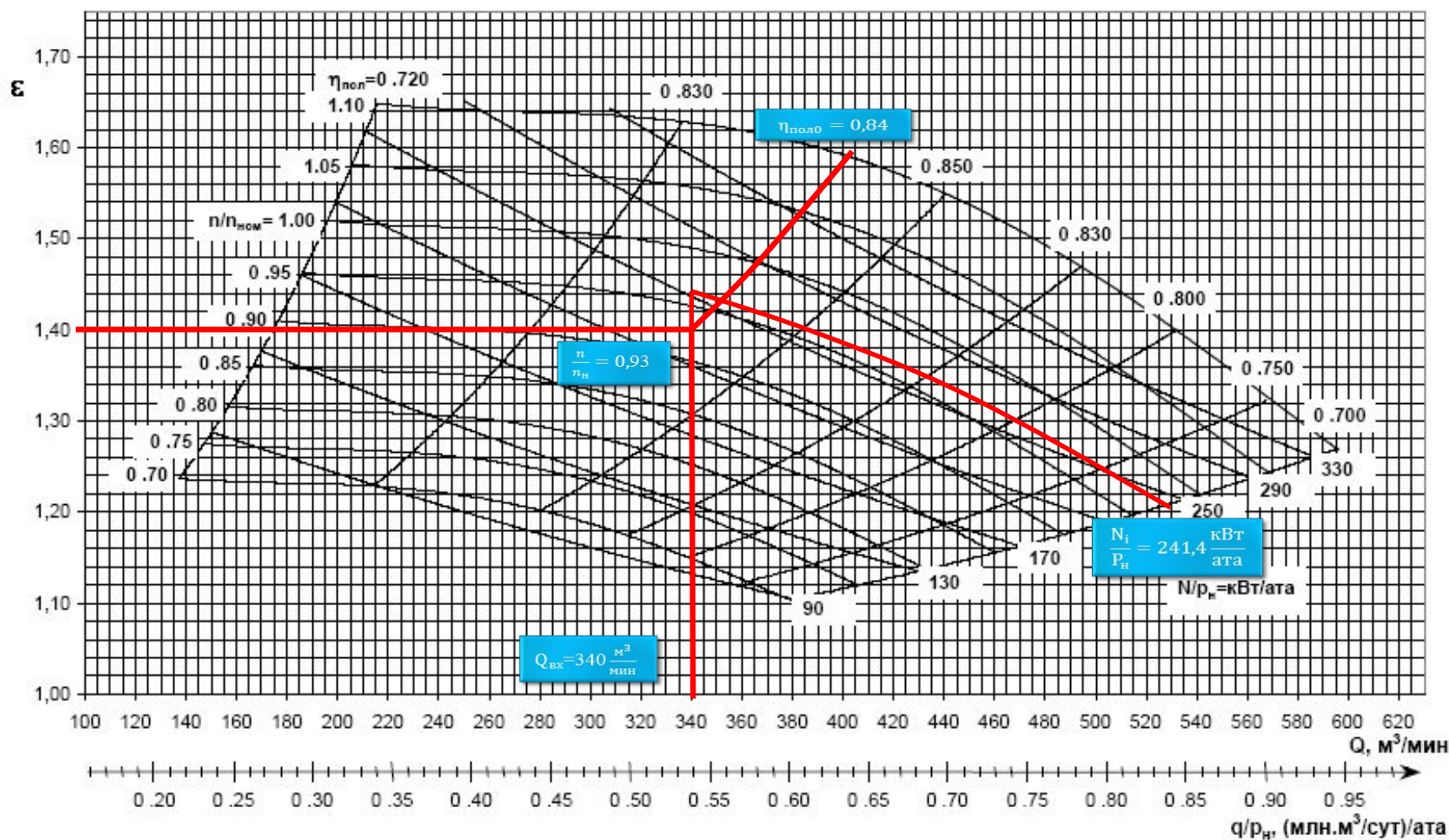
$$\eta_{\text{пол0}} = 0,84; \frac{N_i}{P_H} = 241,43 \frac{\text{кВт}}{\text{ата}}; \frac{n}{n_H} = 0,925$$

---

Покажем на графике рабочую точку.

# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА ( $Q_K = 76$ "красный" млн. м<sup>3</sup>/год;)

Газодинамические характеристики компрессора НЦ-16/76-1,44 "Волга",  
расчётные величины:  $k = 1.312$ ,  $Z = 0.895$ ,  $R = 507.9$  Дж/(кг·К),  $T_H = 288$ К,  $n_{НОМ} = 5300$  об/мин



# Определение рабочей точки ЦБН НЦ-16/76-1,44 «Волга» установленного на ГПА-16, и режимных характеристик ГПА

$$(Q_K = 76 \text{ млн. м}^3/\text{год};)$$

$$\frac{n_D}{n_H} = K_n \cdot \frac{n}{n_H} = 1,03 \cdot 0,93 = 0,96 \text{ – относительная действительная Ч.О.}$$

$$n_D = n_H \cdot \frac{n_D}{n_H} = 5300 \cdot 0,96 = 5088 \text{ об/мин – действительная Ч.О.}$$

$$\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол0}} \cdot K_H = 0,84 \cdot 0,91 = 0,765 \text{ – действительный политропный КПД}$$

$$N_i = P_{\text{вх}} \cdot \frac{N_i}{P_H} = 5,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{241,43}{98100} = 12,8 \text{ МВт – внутренняя мощность сжатия}$$

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{12,8}{0,985} = 12,99 \text{ МВт – эффективная мощность, вырабатываемая ГТД}$$

$$\bar{N}_{\text{епр}} = \frac{N_e}{N_{e0}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}} \cdot \frac{p_{a0}}{p_a} = \frac{12,99}{16} \cdot \sqrt{\frac{288}{288}} \cdot \frac{760}{760} = 0,812 \text{ – приведенная относит. мощ. ГТУ}$$

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{\text{епр}}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}})} = \frac{0,812}{1 - 0,75 \cdot (1 - 0,812)} = 0,945 \text{ – относительный КПД ГТУ}$$

$$K_{\eta_e} = \frac{1}{K_{\text{тр}}} = \frac{1}{1,05} = 0,952 \text{ – коэф. тех. сост. ГТУ по эфф. КПД}$$

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot \bar{\eta}_e \cdot K_{\eta_e} = 0,274 \cdot 0,945 \cdot 0,952 = 0,247 \text{ – действительный эфф. КПД ГТУ}$$

$$B_{\text{тр}} = \frac{N_e}{\eta_e \cdot Q_{\text{нр}}} = \frac{12,8}{0,247 \cdot 33488} = 1,573 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 5663 \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \text{ – расход ТГ}$$

$$N_{\text{епр16}} = 14,51 \text{ МВт}$$

$$N_{\text{епр16}} > N_{e16}$$



## Экономические показатели

$$(Q_K = 76 \text{ млн. м}^3/\text{год})$$

### Экономические затраты:

$$C_{\text{ЭН.З}} = B_{\text{ТГ}} \cdot C_{\text{ТГ}} = 8823 \cdot 4,1 \cdot 24 = 868,2 \text{ тыс. руб./сут (ГТК-25И «УРАЛ»)}$$

$$C_{\text{ЭН.З}} = B_{\text{ТГ}} \cdot C_{\text{ТГ}} = 5663 \cdot 4,1 \cdot 24 = 557,2 \text{ тыс. руб./сут (ГПА-16 «Волга»)}$$

### Энергетическая составляющая эксплуатационных затрат

$$C_{\text{Э}} = \frac{3,6 \cdot C_{\text{ТГ}}}{Q_{\text{НР}}} \cdot \sum \frac{N_{ii}}{\eta_{ei} \cdot \eta_{\text{мех}i}} = \frac{3,6 \cdot 4,1}{33488} \cdot \left( \frac{20,69 \cdot 10^3}{0,256 \cdot 0,985} + \frac{12,8 \cdot 10^3}{0,247 \cdot 0,985} \right) \\ = 59,39 \text{ руб./сек}$$

Ответ на вопрос:

$$\frac{N_{ep1}}{N_{ep2}} = \frac{21,67}{14,51} = 1,5 \approx \frac{N_{e1}}{N_{e2}} = \frac{21,01}{13,0} = 1,6$$

$$(Q_k = 68 \text{ млн. м}^3/\text{год}; )$$

Итоговая таблица рассчитанных величин

№	$N_{ep}$ , МВт	$Q_{ik}$ , млн.м <sup>3</sup> /су т	n, об/мин н	$\eta_{пол}$	$N_i$ , МВт	$N_e$ , МВт	$\eta_e$	$B_{тг}$ , м <sup>3</sup> /сек	$C_{эн.з}$ , тыс.руб / сут.
ГТК-25И	21,67	40,73	4218	0,763	16,06	16,30	0,237	2,022	478,2
ГПА-16	14,51	27,27	4695	0,76	10,24	10,3 9	0,23	1,35	

$$(Q_k = 76 \text{ млн. м}^3/\text{год}; )$$

Итоговая таблица рассчитанных величин

№	$N_{ep}$ , МВт	$Q_{ik}$ , млн.м <sup>3</sup> /час	n, об/мин	$\eta_{пол}$	$N_i$ , МВт	$N_e$ , МВт	$\eta_e$	$B_{тг}$ , м <sup>3</sup> /сек	$C_{эн.з}$ , тыс.руб / сут.
ГТК-25И	21,67	45,52	4572	0,764	20,69	21,01	0,25 6	2,45	557,2
ГПА-16	14,51	30,48	5088	0,765	12,80	12,99	0,247	1,573	

## Экологический расчет агрегата ГТК-25И при $Q_K = 68$ млн. $M^3$ /сут.

Мощность выброса оксидов азота  $M_{NO_x}$  :

$$M_{NO_x} = M_{NO_x}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{4,65} ;$$

$$M_{NO_x}^0 = 12,56 \text{ г/с}; N_{e0} = 23,9 \text{ МВт}; N_e = 16,303 \text{ МВт};$$

$$M_{NO_x} = 12,56 \cdot \left( \frac{16303}{23900} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{4,65} = 7,55 \text{ г/с}$$

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{Q_{кр}}{Q_{кр0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right]$$

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,682 \right] = 0,39 \text{ г/с}$$

Расход продуктов сгорания  $Q_{кс}$  :

$$Q_{кс} = 0,95 \cdot Q_{кс}^0 \cdot \frac{288,2}{T_a}$$

Мощность выброса оксида углерода  $M_{CO}$  :

$$M_{CO} = m_{CO}^{m_{z0}} \cdot q_{mz}^0 \cdot \frac{Q_{кр}}{Q_{кр0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right]; \quad |$$

$$m_{CO}^{m_{z0}} = 1,39 \text{ г/м}^3;$$

$$q_{mz}^0 = 9292 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$Q_{кр}, Q_{кр0} = 33431 \text{ кДж/м}^3;$$

$$\bar{N}_{e16} = N_e / N_{e0} = 16303 / 23900 = 0,682$$

$$M_{CO} = 1,39 \cdot 9292 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,682 \right] = 9,8 \cdot 10^3 \text{ г/ч} = 2,73 \text{ г/с}$$

Мощность выброса диоксида углерода  $M_{CO_2}$  :

## Экологический расчет агрегата ГТК-25И при $Q_K = 68$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

$$Q_{nc}^0 = 92,5 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{nc} = 0,95 \cdot 92,5 \cdot \frac{288,2}{288,2} = 87,9 \text{ м}^3/\text{с}$$

Температура продуктов сгорания на срезе дымовой трубы:

$$T_{nc} = T_{nc}^0 \cdot \left(\frac{N_{\epsilon}}{N_{\epsilon 0}}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{T_a}{288,2}\right)^{0,75}$$

$$T_{nc}^0 = 764 \text{ К};$$

$$T_{nc} = 764 \cdot \left(\frac{16303}{23900}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{288,2}{288,2}\right)^{0,75} = 656 \text{ К}$$

Объемный расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы при действительной температуре  $T_{nc}$ :

$$Q_{nc}^{\phi} = Q_{nc} \cdot \frac{T_{nc}}{273,2};$$

$$Q_{nc}^{\phi} = 87,9 \cdot \frac{656}{273,2} = 211,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

## Экологический расчет агрегата ГТК-25И

при  $Q_K = 76$  млн. м<sup>3</sup>/сут.

$$M_{NO_x} = M_{NO_x}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{4,65} ;$$

$$M_{NO_x}^0 = 12,56 \text{ г/г};$$

$$N_{e0} = 23,9 \text{ МВт};$$

$$N_e = 21,010 \text{ МВт};$$

$$M_{NO_x} = 12,56 \cdot \left( \frac{21010}{23900} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{4,65} = 10,58 \text{ г/г}$$

Мощность выброса оксида углерода  $M_{CO}$ :

$$M_{CO} = m_{CO}^{mz_0} \cdot q_{mz}^0 \cdot \frac{Q_{чр}}{Q_{чр0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right];$$

$$m_{CO}^{mz_0} = 1,39 \text{ г/м}^3;$$

$$q_{mz}^0 = 9292 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$Q_{чр}, Q_{чр0} = 33488 \text{ кДж/м}^3;$$

$$\bar{N}_{e16} = N_e / N_{e0} = 21010 / 23900 = 0,879$$

$$M_{CO} = 1,39 \cdot 9292 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,879 \right] = 11,73 \cdot 10^3 \text{ г/ч} = 3,26 \text{ г/г}$$

## Экологический расчет агрегата ГТК-25И при $Q_K = 76$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

Мощность выброса диоксида углерода  $M_{CO_2}$ :

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{Q_{нр}}{Q_{нр0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right]$$

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,879 \right] = 0,462 / с$$

Расход продуктов сгорания  $Q_{нс}$ :

$$Q_{нс} = 0,95 \cdot Q_{нс}^0 \cdot \frac{288,2}{T_a}$$

$$Q_{нс}^0 = 92,5 \text{ м}^3 / с;$$

$$Q_{нс} = 0,95 \cdot 92,5 \cdot \frac{288,2}{288,2} = 87,9 \text{ м}^3 / с$$

Температура продуктов сгорания на срезе дымовой трубы:

$$T_{нс} = T_{нс}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{0,4} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{0,75}$$

$$T_{нс}^0 = 764 \text{ К};$$

$$T_{нс} = 764 \cdot \left( \frac{21010}{23900} \right)^{0,4} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,75} = 726 \text{ К}$$

Объемный расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы при действительной температуре  $T_{нс}$ :

$$Q_{нс}^\phi = Q_{нс} \cdot \frac{T_{нс}}{273,2}; \quad Q_{нс}^\phi = 87,9 \cdot \frac{726}{273,2} = 233,6 \text{ м}^3 / с.$$

### Сопоставление экологических параметров ГТК 25И

$$\Delta M_{NO_x} = 10,58 - 7,55 = 3,03 / = 261,8 /$$

$$\Delta M_{CO} = 3,26 - 2,93 = 0,33 / = 28,51 /$$

$$\Delta M_{CO_2} = 0,46 - 0,39 = 0,07 / =$$

$$\Delta Q_{нс} = 87,9 - 87,9 = 0^3 / ;$$

$$\Delta K_{нс} = 726 - 656 = 70$$

$$\Delta Q_{нс}^\phi = 233,6 - 211,1 = 22,5^3 /$$

## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга»

при  $Q_K = 68$  млн.  $\text{м}^3/\text{сут.}$

Мощность выброса оксидов азота  $M_{NO_x}$  :

$$M_{NO_x} = M_{NO_x}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{4,65} ;$$

$M_{NO_x}^0 = 5,47$  г/с - мощность выбросов оксидов азота при номинальной загрузке ГТУ;

$M_{NO_x}$  - мощность выбросов оксидов азота при частичной загрузке ГТУ;

$N_{e0} = 16,0$  МВт - эффективная мощность ГТУ при номинальной загрузке;

$N_{e, opt} = 10,39$  МВт - эффективная мощность ГТУ при оптимальном распределении нагрузки;

$T_a$  - температура окружающего воздуха.

$$M_{NO_x} = 5,47 \cdot \left( \frac{10390}{16000} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{4,65} = 3,12 \text{ г/с}$$

Мощность выброса оксида углерода  $M_{CO}$  :

$$M_{CO} = m_{CO}^{ms} \cdot q_{mz}^0 \cdot \frac{Q_{np}}{Q_{np0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right] \cdot 4,17 \cdot 4720 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,65 \right] = 14,5 \cdot 10^3 \text{ г/ч} = 4,03 \text{ г/с}$$

$m_{CO}^{ms} = 4,17$  г /  $\text{м}^3$  - удельный выброс оксидов азота на единицу расхода топливного газа;

$q_{mz}^0 = 4720$   $\text{м}^3/\text{ч}$  - номинальный расход топливного газа;

$Q_{np}, Q_{np0} = 33488$  кДж /  $\text{м}^3$  - значения действительной и номинальной нижней теплоты сгорания топливного газа;

$\bar{N}_e$  - относительная мощность ГТУ.

$$\bar{N}_{e16} = N_e / N_{e0} = 10390 / 16000 = 0,65$$

## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга» при $Q_K = 68$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

Мощность выброса диоксида углерода  $M_{CO_2}$ :

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{Q_{np}}{Q_{np0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot N_e \right] = 0,511 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,65 \right] = 0,382 / c$$

Расход продуктов сгорания  $Q_{nc}$ :

$$Q_{nc} = Q_{nc}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,67} = 42,8 \cdot \left( \frac{10390}{16000} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,67} = 37,12 \text{ м}^3 / c$$

$Q_{nc}^0 = 42,8 \text{ м}^3/c$  – номинальный расход продуктов сгорания (табл. 4.2[1]);

Температура продуктов сгорания на срезе дымовой трубы:

$$T_{nc} = T_{nc}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{0,14} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{0,93} = 721 \cdot \left( \frac{10390}{16000} \right)^{0,14} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,93} = 679K$$

$T_{nc}^0 = 721K$  – номинальная температура отработавших продуктов сгорания (табл. 4.2[1]).

Объемный расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы при действительной температуре  $T_{nc}$ :

$$Q_{nc}^{\phi} = Q_{nc} \cdot \frac{T_{nc}}{273,2} = 37,12 \cdot \frac{679}{273,2} = 92,3 \text{ м}^3 / c ;$$



## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга» при $Q_K = 76$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

Мощность выброса оксидов азота  $M_{NO_x}$  :

$$M_{NO_x} = M_{NO_x}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{eo}} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{T_a}{288,2} \right)^{4,65} ;$$

$M_{NO_x}^0 = 5,47$  г/с - мощность выбросов оксидов азота при номинальной загрузке ГТУ;

$M_{NO_x}$  - мощность выбросов оксидов азота при частичной загрузке ГТУ;

$N_{eo} = 16,0$  МВт - эффективная мощность ГТУ при номинальной загрузке;

$N_{e,oe} = 10,39$  МВт - эффективная мощность ГТУ при оптимальном распределении нагрузки;

$T_a$  - температура окружающего воздуха.

$$M_{NO_x} = 5,47 \cdot \left( \frac{12990}{16000} \right)^{1,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{4,65} = 4,12 / c$$

## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга» при $Q_K = 76$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

Мощность выброса оксида углерода  $M_{CO}$ :

$$M_{CO} = m_{CO}^{mz_0} \cdot q_{mz}^0 \cdot \frac{Q_{кр}}{Q_{кр0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right];$$

$m_{CO}^{mz_0} = 4,17 \text{ г} / \text{м}^3$  – удельный выброс оксидов азота на единицу расхода топливного газа;

$q_{mz}^0 = 4720 \text{ м}^3 / \text{ч}$  – номинальный расход топливного газа;

$Q_{кр}, Q_{кр0} = 33488 \text{ кДж} / \text{м}^3$  – значения действительной и номинальной низшей теплоты сгорания топливного газа;

$\bar{N}_e$  – относительная мощность ГТУ.

$$\bar{N}_{e16} = N_e / N_{e0} = 12990 / 16000 = 0,81$$

$$M_{CO} = 4,17 \cdot 4720 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,81 \right] = 16,9 \cdot 10^3 \text{ г} / \text{ч} = 4,7 \text{ г} / \text{с}$$

## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга» при $Q_K = 76$ млн. м<sup>3</sup>/сут.

Мощность выброса диоксида углерода  $M_{CO_2}$ :

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{Q_{np}}{Q_{np0}} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot \bar{N}_e \right]$$

$$M_{CO_2} = 0,511 \cdot \frac{33488}{33488} \cdot \left[ 0,25 \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,5} + 0,75 \cdot 0,81 \right] = 0,442 / c$$

Расход продуктов сгорания  $Q_{nc}$ :

$$Q_{nc} = Q_{nc}^0 \cdot \left( \frac{N_e}{N_{e0}} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{288,2}{T_a} \right)^{0,67} = 42,8 \cdot \left( \frac{12990}{16000} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{288,2}{288,2} \right)^{0,67} = 39,96 \text{ м}^3 / c$$

$Q_{nc}^0 = 42,8$  м<sup>3</sup>/с – номинальный расход продуктов сгорания (табл. 4.2[1]);

## Экологический расчет агрегата ГПА-16 «Волга» при $Q_K = 76$ млн. $m^3$ /сут.

Температура продуктов сгорания на срезе дымовой трубы:

$$T_{nc} = T_{nc}^0 \cdot \left(\frac{N_{\varepsilon}}{N_{\varepsilon 0}}\right)^{0,14} \cdot \left(\frac{T_a}{288,2}\right)^{0,93} = 721 \cdot \left(\frac{12990}{16000}\right)^{0,14} \cdot \left(\frac{288,2}{288,2}\right)^{0,93} = 700K$$

$T_{nc}^0 = 721K$  – номинальная температура отработавших продуктов сгорания (табл. 4.2[1]).

Объемный расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы при действительной температуре  $T_{nc}$ :

$$Q_{nc}^{\phi} = Q_{nc} \cdot \frac{T_{nc}}{273,2} = 39,96 \cdot \frac{700}{273,2} = 102,4 m^3 / c ;$$

**Сопоставление экологических характеристик.**

$$\Delta M_{NO_x} = 4,1 - 3,1 = 1,0 g / c = 86,4 кг / сут$$

$$\Delta M_{CO} = 4,7 - 4,03 = 0,66 g / c = 57,41 кг / сут$$

$$\Delta M_{CO_2} = 0,44 - 0,38 = 0,06 g / c = 5,18 кг / сут$$

$$\Delta Q_{nc} = 39,96 - 37,12 = 2,84 m^3 / c ;$$

$$\Delta T_{nc} = 700 - 679 = 21K$$

$$\Delta Q_{nc}^{\phi} = 102,4 - 92,3 = 10,1 m^3 / c$$

## Сопоставим параметры агрегата, работающего до и после увеличения коммерческого расхода:

При увеличении коммерческого расхода природного газа через КС с 68 до 76 млн.  $\frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$  (на 10,5%) и снижении его давления на входе в ЦБН с 5,4 МПа до 5,2 МПа:

- Значение энергетической составляющей эксплуатационных затрат

возрастет на  $\frac{C_{э2}-C_{э1}}{C_{э1}} = \frac{59,39-50,23}{50,23} = 18,24\%$

- Соотношение расхода топливного газа между газо-перекачивающими агрегатами увеличится на ГТК 25И:  $\frac{B_{ТГ2}-B_{ТГ1}}{B_{ТГ1}} = \frac{8823-7279}{7279} = 21\%$

на ГПА-16:  $\frac{B_{ТГ2}-B_{ТГ1}}{B_{ТГ1}} = \frac{5663-4860}{4860} = 17\%$

- Эксплуатационные затраты увеличатся на:

$$(C_{эн.з25} + C_{эн.з16})_{76} - (C_{эн.з25} + C_{эн.з16})_{68} = (868,2+557,2) - (716,3+478,2) = 231 \frac{\text{т.р.}}{\text{сут.}}$$

- Выбросы загрязняющих веществ неизбежно возросли. Возросла также температура продуктов сгорания на срезе дымовой трубы, и возрос расход продуктов сгорания.

**Благодарю за внимание!**