

**Московский энергетический институт  
кафедра Паровых и газовых турбин  
им. А.В. Щегляева**

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И УСТАНОВКИ**

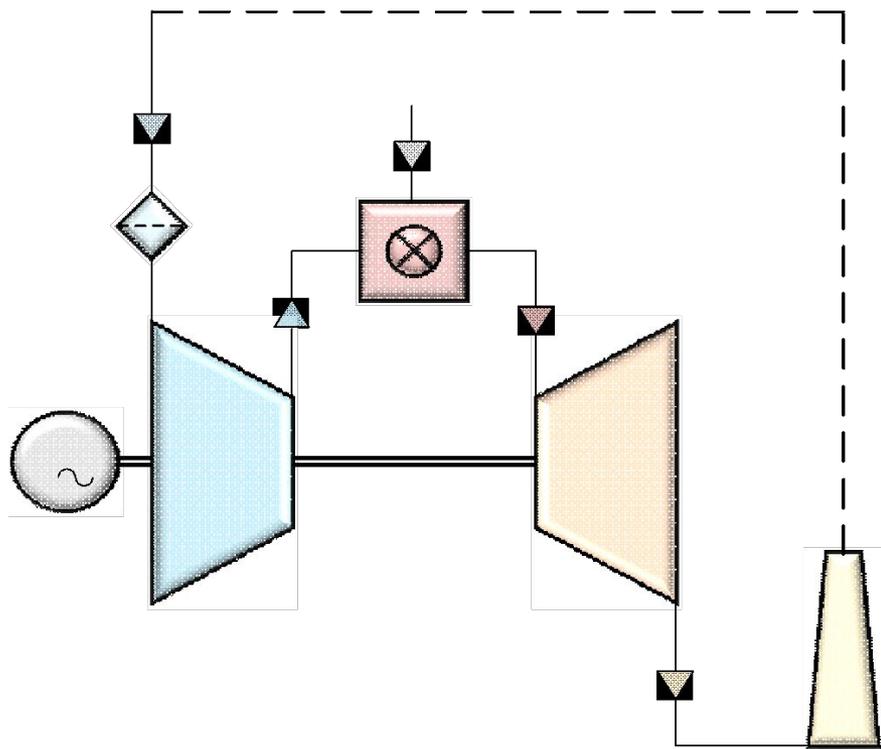
**21-28.02.2022 г.**

**к.т.н., доцент Митрохова О.М.**





# Устройство, схема и принцип работы ГТУ

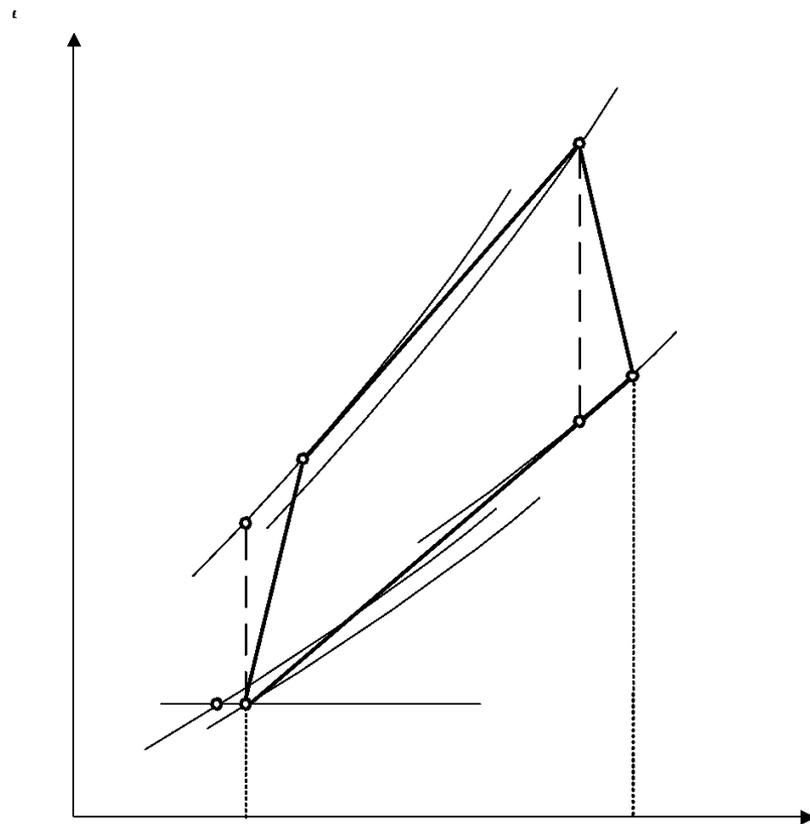


Потери давления в элементах ГТУ:

$$\Delta\delta_{\dot{o}} = B - p_a$$

$$\Delta p_{\text{кс}} = p_b - p_c$$

$$\Delta\delta_{\dot{a}\dot{o}} = \delta_d - B$$



# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания



Смесь идеальных газов (азота, кислорода, углекислого газа и т.д.), например, воздуха подчиняется уравнению Клапейрона:

$$p\nu = R_{\hat{a}}T$$

где  $p$  – давление;  $\nu$  - удельный объем;  $R_{\hat{a}}$  - газовая постоянная смеси, подсчитываемая по уравнению смешения:

$$R_{\hat{a}} = \sum_{i=1}^n r_i R_i$$

где  $n$  - число компонентов в смеси,  $R_i$  - универсальная газовая постоянная  $i$ -ой компоненты с весовой долей  $r_i$ , равной  $m_i = m_i/m$  ( $m$  - масса смеси,  $m_i$  - масса  $i$ -ой компоненты).

Поскольку химический состав "стандартного" воздуха известен, то легко получить, что  $R_{\hat{a}} = 0,28699$  кДж/(кг·К).



# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания



Удельная истинная теплоемкость воздуха (газа) при постоянном давлении  $c_{pv}$  зависит от температуры и для каждой из них может быть рассчитана по уравнению смешения:

$$c_{p\hat{a}}(T) = \sum_{i=1}^n r_i c_{pi}(T)$$

где  $c_{pi}$  - истинная теплоемкость  $i$ -ой компоненты воздуха.

Среднее значение теплоемкости в интервале температур от 0 °С до температуры  $t$  рассчитывается по соотношению:

$$\bar{c}_{p\hat{a}}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t c_{p\hat{a}}(t) dt$$

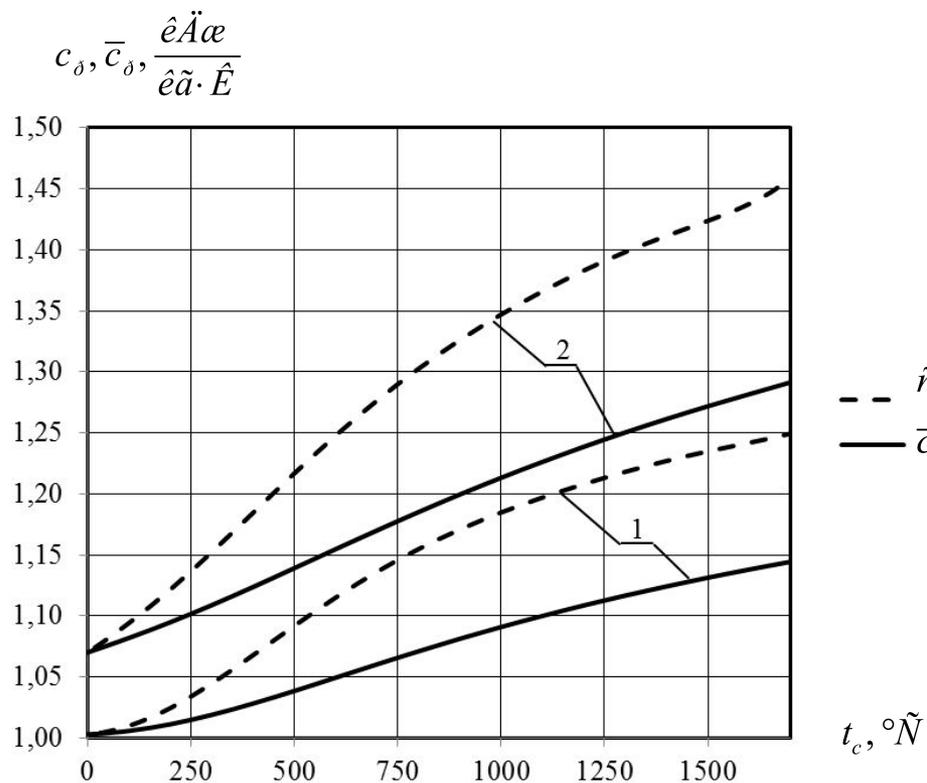
Тогда энтальпия воздуха, отсчитываемая от 0 °С, при любой температуре

$$h_{\hat{a}} \approx \bar{c}_{p\hat{a}} \cdot t$$

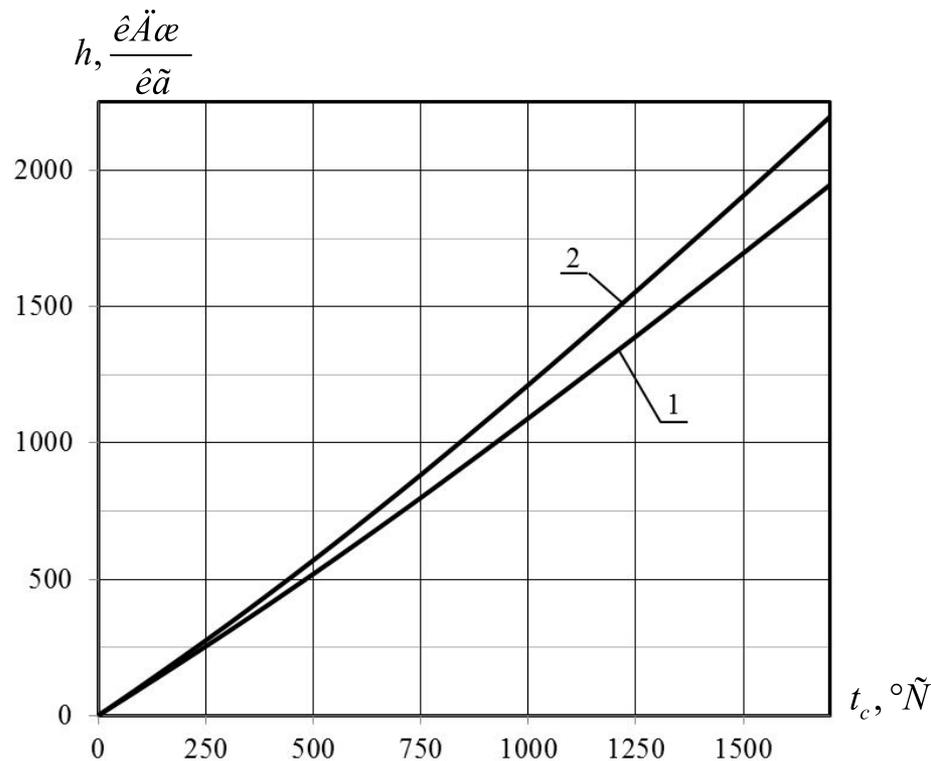




# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания



Зависимости удельной истинной и средней теплоемкостей воздуха (линии 1) и чистых продуктов сгорания стандартного углеводородного топлива (линии 2) от температуры



Зависимости энтальпий воздуха (линии 1) и чистых продуктов сгорания стандартного углеводородного топлива (линии 2) от температуры



# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания

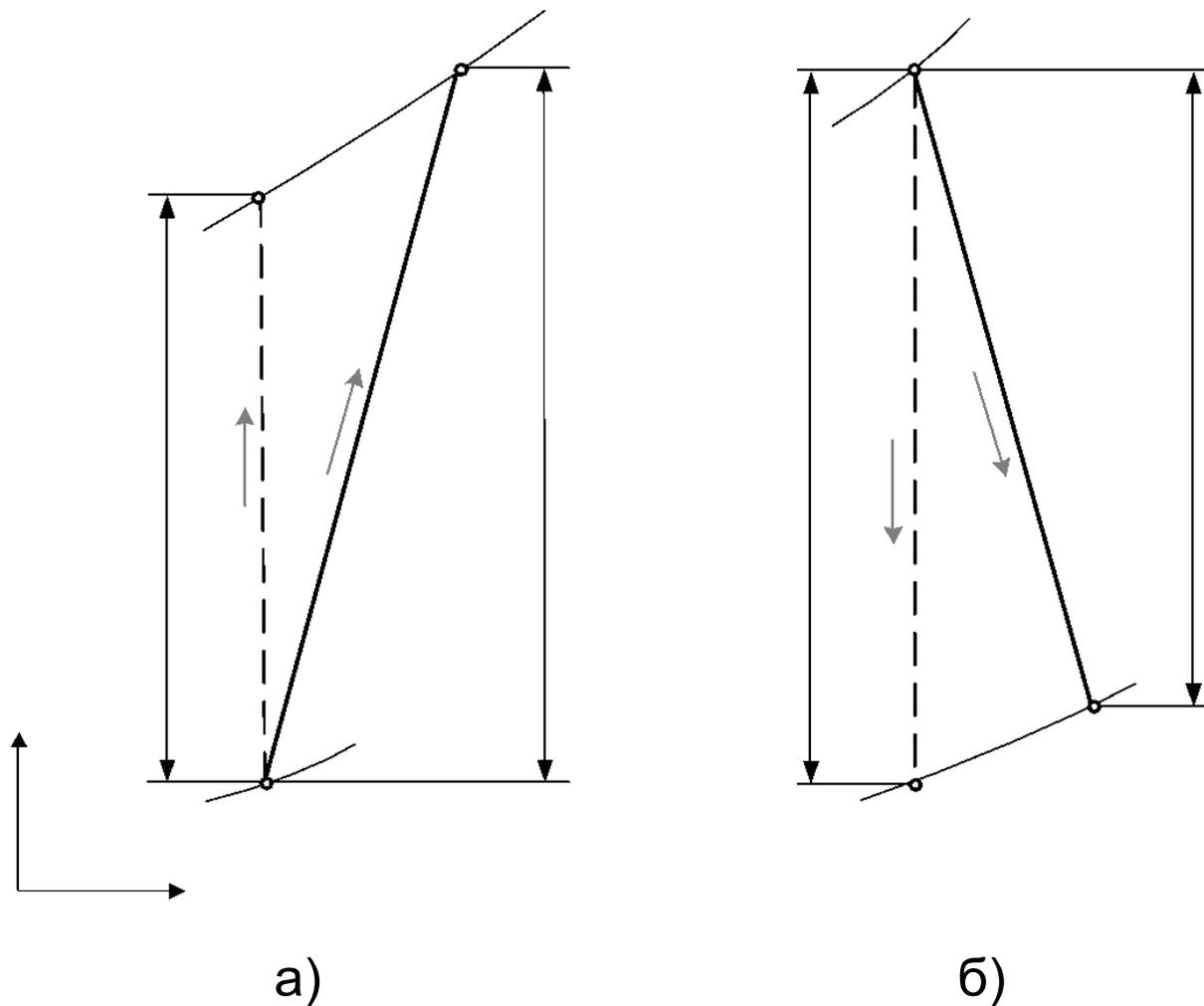
Удельная изобарная теплоемкость и энтальпия сухого воздуха и продуктов сгорания углеводородного топлива (С – 85%, Н – 15%)

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\bar{c}_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\bar{c}_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$
Сухой воздух; $R = 0,28699 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ; $\mu = 28,97 \text{ кг}/\text{кмоль}$					Продукты сгорания; $\alpha = 1$ ; $R = 0,2901 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ; $\mu = 28,66 \text{ кг}/\text{кмоль}$				
0	273	1,0028	1,0028	0	0	273	1,0660	1,0660	0
25	298	1,0038	1,0032	25,08	25	298	1,0718	1,0689	26,77
50	323	1,0053	1,0038	50,19	50	323	1,0776	1,0718	53,59
100	373	1,0098	1,0056	100,56	100	373	1,0900	1,0778	107,78
150	423	1,0163	1,0080	151,21	150	423	1,1031	1,0840	162,60
200	473	1,0244	1,0111	202,22	200	473	1,1172	1,0905	218,10
250	523	1,0339	1,0147	253,67	250	523	1,1320	1,0973	274,33
300	573	1,0445	1,0187	305,61	300	573	1,1475	1,1044	331,31
350	623	1,0559	1,0232	358,13	350	623	1,1634	1,1117	389,08
400	673	1,0677	1,0281	411,22	400	673	1,1795	1,1191	447,65
450	723	1,0798	1,0331	464,91	450	723	1,1956	1,1267	507,03
500	773	1,0918	1,0384	519,20	500	773	1,2116	1,1344	567,20
550	823	1,1036	1,0438	574,09	550	823	1,2272	1,1422	628,19
600	873	1,1150	1,0493	629,58	600	873	1,2423	1,1499	689,93
650	923	1,1258	1,0547	685,58	650	923	1,2568	1,1576	752,41
700	973	1,1361	1,0602	742,13	700	973	1,2707	1,1651	815,60
750	1023	1,1457	1,0656	799,17	750	1023	1,2839	1,1726	879,47
800	1073	1,1546	1,0709	856,68	800	1073	1,2964	1,1800	943,98
850	1123	1,1629	1,0760	914,62	850	1123	1,3083	1,1872	1009,10
900	1173	1,1707	1,0811	972,97	900	1173	1,3195	1,1942	1074,80
950	1223	1,1779	1,0860	1031,68	950	1223	1,3302	1,2011	1141,04
1000	1273	1,1846	1,0907	1090,75	1000	1273	1,3403	1,2078	1207,81
1050	1323	1,1909	1,0954	1150,14	1050	1323	1,3499	1,2143	1275,02
1100	1373	1,1969	1,0998	1209,83	1100	1373	1,3590	1,2207	1342,79
1150	1423	1,2025	1,1042	1269,82	1150	1423	1,3676	1,2269	1410,96
1200	1473	1,2079	1,1084	1330,08	1200	1473	1,3758	1,2330	1479,55
1250	1523	1,2130	1,1125	1390,60	1250	1523	1,3835	1,2388	1548,53
1300	1573	1,2178	1,1165	1451,36	1300	1573	1,3908	1,2444	1617,91
1350	1623	1,2223	1,1204	1512,36	1350	1623	1,3976	1,2498	1687,69
1400	1673	1,2265	1,1242	1573,60	1400	1673	1,4040	1,2550	1767,87





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Термодинамические процессы в компрессоре (а) и турбине (б)





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



При расчете термодинамических процессов в агрегатах ГТУ как воздух, так и продукты сгорания можно считать идеальным газом с постоянной теплоемкостью, осредненной в диапазоне температур процесса. Если, например, при сжатии воздуха в компрессоре происходит повышение его температуры от значения  $t_a$  до  $t_b$ , то осредненная теплоемкость воздуха составит:

$$c_{p\hat{a}} = \frac{1}{t_b - t_a} \int_{t_a}^{t_b} c_{p\hat{a}}(t) dt = \frac{h_{\hat{a}}(t_b) - h_{\hat{a}}(t_a)}{t_b - t_a}$$

Аналогично для процесса расширения в газовой турбине:

$$c_{p\tilde{a}} = \frac{1}{t_c - t_d} \int_{t_d}^{t_c} c_{p\tilde{a}}(t) dt = \frac{h_{\tilde{a}}(t_c) - h_{\tilde{a}}(t_d)}{t_c - t_d}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Адиабатический теплоперепад (теоретическая работа сжатия) компрессора:

$$H_{\hat{e}t} = h_{bt} - h_a = \tilde{n} \tilde{n}_{\delta\hat{a}} (T_{bt} - T_a)$$

Работа, затраченная на сжатие 1 кг воздуха в компрессоре:

$$H_{\hat{e}} = h_b - h_a = \tilde{n} \tilde{n}_{\delta\hat{a}} (T_b - T_a)$$

Относительный внутренний КПД воздушного компрессора:

$$\eta_{\hat{e}} = \frac{H_{\hat{e}t}}{H_{\hat{e}}}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Степень сжатия (повышения давления):

$$\varepsilon = \frac{p_b}{p_a} \quad \text{или} \quad \varepsilon^{m_\varepsilon} = \frac{T_{bt}}{T_a}$$

где

$$m_{\hat{a}} = \frac{k_{\hat{a}} - 1}{k_{\hat{a}}} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}}$$

Тогда

$$H_{\hat{e}t} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}} T_a (\varepsilon^{m_{\hat{a}}} - 1)$$

$$H_{\hat{e}} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}} T_a (\varepsilon^{m_{\hat{a}}} - 1) \frac{1}{\eta_{\hat{e}}}$$

$$T_b = T_a \left( 1 + \frac{\varepsilon^{m_\varepsilon} - 1}{\eta_\kappa} \right)$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Изоэнтروпийный теплоперепад (теоретическая работа расширения) газовой турбины:

$$H_{\dot{t}} = h_c - h_{dt} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} (T_c - T_{dt})$$

Работа расширения 1 кг газа в турбине:

$$H_{\dot{\delta}} = h_c - h_d = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} (T_{\tilde{n}} - T_d)$$

Относительный внутренний КПД газовой турбины:

$$\eta_{\dot{\delta}} = \frac{H_{\dot{\delta}}}{H_{\dot{t}}}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Степень расширения:

$$\delta = \frac{P_c}{P_d} \quad \text{или} \quad \delta^{m_z} = \frac{T_c}{T_{dt}}$$

где

$$m_{\tilde{a}} = \frac{k_{\tilde{a}} - 1}{k_{\tilde{a}}} = \frac{R_{\tilde{a}}}{\tilde{n}_{\delta\tilde{a}}}$$

Тогда

$$H_{\dot{o}t} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} T_{\tilde{n}} \left( 1 - \delta^{-m_{\tilde{a}}} \right)$$

$$H_{\dot{o}} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} \cdot T_{\tilde{n}} \left( 1 - \delta^{-m_{\tilde{a}}} \right) \cdot \eta_{\dot{o}}$$

$$T_d = T_c \left[ 1 - \left( 1 - \delta^{-m_z} \right) \cdot \eta_m \right]$$



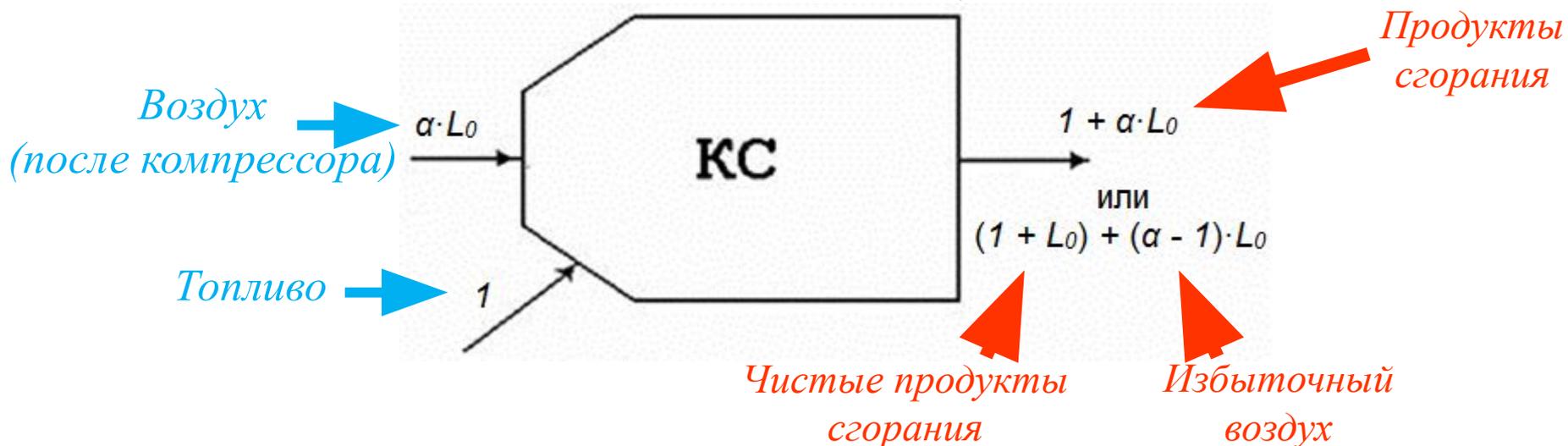


# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Продукты сгорания – это смесь газов, образующихся в результате химических реакций окисления горючих компонент топлива (углерод, водород, метан и т.д.) кислородом воздуха.

Чистые продукты сгорания (ЧПС) – это продукты сгорания, в которых отсутствуют как несгоревшие вещества, так и избыточный кислород воздуха.



## Материальный баланс камеры сгорания

$L_0$  – стехиометрический расход (количество воздуха минимально необходимое для сжигание 1 кг топлива), кг/кг;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (отношение действительного (фактического) расхода воздуха, подаваемого в камеру сгорания для сжигания 1 кг топлива, к минимально необходимому его количеству).

В результате сжигания 1 кг топлива при расходе воздуха  $L_0$  кг образуется  $(1 + L_0)$  кг ЧПС





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Доля чистых продуктов сгорания:

$$r_{\dot{i}\tilde{n}} = \frac{1 + L_0}{1 + \alpha L_0}$$

Доля избыточного воздуха:

$$r_{\hat{a}} = \frac{(\alpha - 1)L_0}{1 + \alpha L_0} = 1 - r_{\dot{i}\tilde{n}}$$

Теплофизические свойства продуктов сгорания для любой температуры  $T$  определяются соотношениями:

$$R_{\tilde{a}} = r_{\hat{a}}R_{\hat{a}} + r_{\dot{i}\tilde{n}}R_{\dot{i}\tilde{n}}$$

$$\tilde{n}_{\delta\tilde{a}}(T) = r_{\hat{a}}\tilde{n}_{\delta\hat{a}}(T) + r_{\dot{i}\tilde{n}}\tilde{n}_{\delta\dot{i}\tilde{n}}(T)$$

$$h_{\tilde{a}}(T) = r_{\hat{a}}h_{\hat{a}}(T) + r_{\dot{i}\tilde{n}}h_{\dot{i}\tilde{n}}(T)$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Продукты сгорания – это смесь газов, образующихся в результате химических реакций окисления горючих компонент топлива (углерод, водород, метан и т.д.) кислородом воздуха.

Для полного сжигания единицы топлива необходимо использовать вполне определенное количество кислорода, а следовательно, и воздуха. Это количество воздуха называют *стехиометрическим расходом*  $L_0$ , кг/кг.

В результате сжигания 1 кг топлива при расходе воздуха  $L_0$  кг образуется  $(1 + L_0)$  кг чистых продуктов сгорания, в которых отсутствуют как несгоревшие вещества, так и избыточный кислород воздуха.

Для получения требуемой умеренной температуры газов перед газовой турбиной в камеру сгорания подается расход воздуха больший стехиометрического.

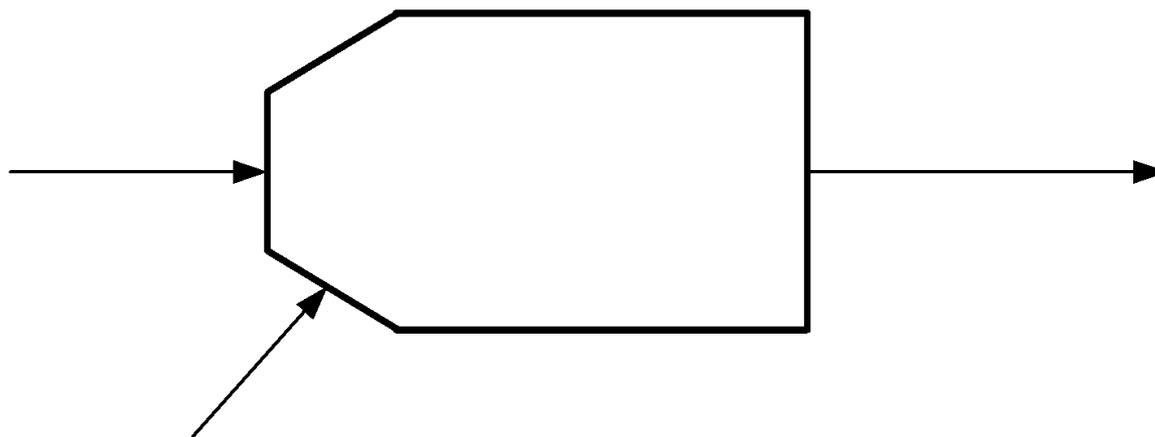
Отношение фактического и стехиометрического расходов называется *коэффициентом избытка воздуха*  $\alpha$ . Таким образом, реальные рабочие газы за камерой сгорания представляют собой смесь чистых продуктов сгорания и избыточного воздуха.

При сгорании 1 кг топлива образуется  $(1 + L_0)$  кг чистых продуктов сгорания и остается неиспользованным для сжигания  $(\alpha - 1) \cdot L_0$  кг атмосферного воздуха.





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Тепловой баланс камеры сгорания

$B_m$  – расход топлива, кг/с;

$G_k$  – расход воздуха на входе в камеру сгорания (после компрессора), кг/с;

$G_e$  – расход продуктов сгорания (газов), покидающих камеру сгорания, кг/с.

Характеристики осредненного («стандартного») углеводородного топлива (85% С и 15% Н) –  $L_0 = 15$  кг/кг и  $Q_H^p = 44\,300$  кДж/кг (при стандартной начальной температуре (обычно  $25^\circ\text{C}$ ))





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Уравнение теплового баланса (УТБ) камеры сгорания:

$$B_{\dot{o}} \left( Q_{\dot{o}}^i \cdot \eta_{e\tilde{n}} + h_{\dot{o}} \right) + G_{\dot{e}} \cdot h_b = G_{\tilde{a}} \cdot h_{\tilde{n}}$$

Откуда относительный расход топлива:

$$g_{\dot{o}} = \frac{B_{\dot{o}}}{G_{\dot{e}}} = \frac{h_{\tilde{n}} - h_b}{Q_{\dot{o}}^i \cdot \eta_{e\tilde{n}} + h_{\dot{o}} - h_{\tilde{n}}}$$

Коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{1}{g_m \cdot L_0}$$

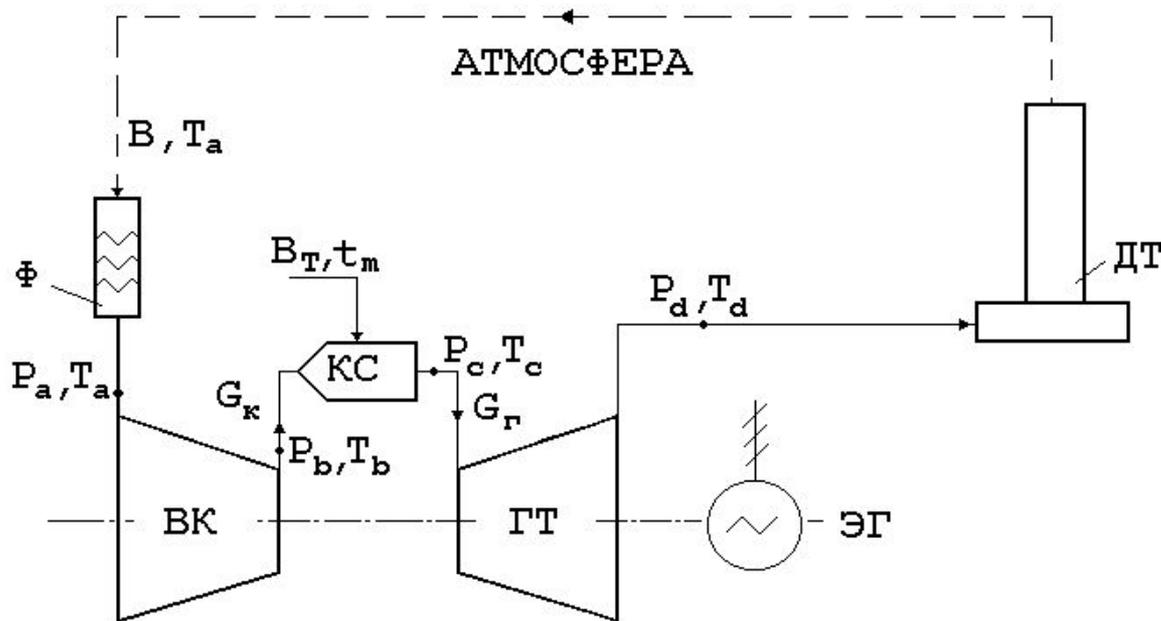
Уравнение материального баланса (УМБ) камеры сгорания:

$$B_{\dot{o}} + G_{\dot{e}} = G_{\tilde{a}}$$





# Устройство, схема и принцип работы ГТУ

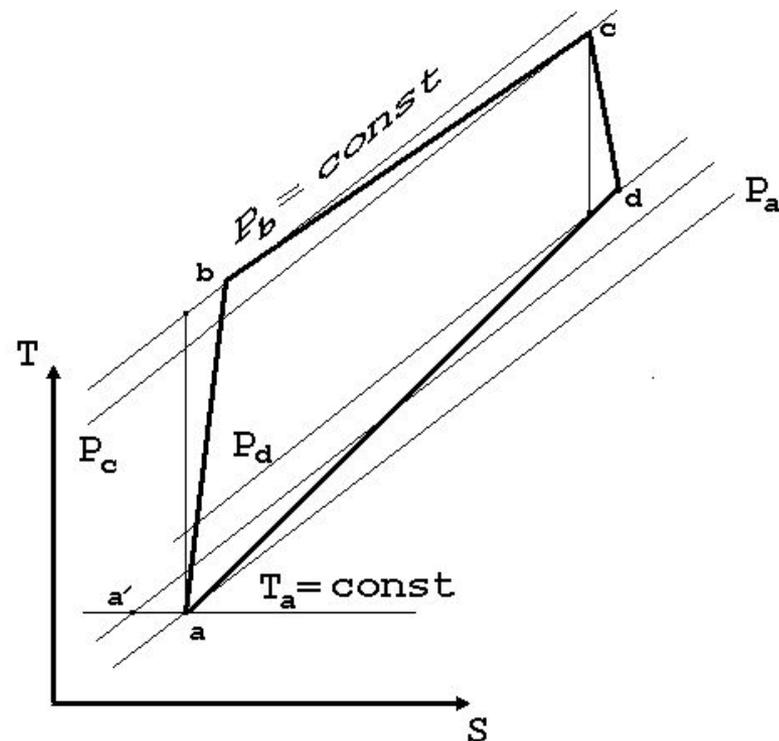


Потери давления в элементах ГТУ:

$$\Delta p_{\text{фильтр}} = B - p_a$$

$$\Delta p_{\text{КС}} = p_b - p_c$$

$$\Delta \delta_{\text{äò}} = \delta_d - B$$





# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания



Смесь идеальных газов (азота, кислорода, углекислого газа и т.д.), например, воздуха подчиняется уравнению Клапейрона:

$$p\nu = R_{\hat{a}}T$$

где  $p$  – давление;  $\nu$  - удельный объем;  $R_{\hat{a}}$  - газовая постоянная смеси, подсчитываемая по уравнению смешения:

$$R_{\hat{a}} = \sum_{i=1}^n r_i R_i$$

где  $n$  - число компонентов в смеси,  $R_i$  - универсальная газовая постоянная  $i$ -ой компоненты с весовой долей  $r_i$ , равной  $r_i = m_i/m$  ( $m$  - масса смеси,  $m_i$  - масса  $i$ -ой компоненты).

Поскольку химический состав «стандартного» воздуха известен, то легко получить, что  $R_{\hat{a}} = 0,28699$  кДж/(кг·К).



# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания



Удельная истинная теплоемкость воздуха (газа) при постоянном давлении  $c_{pv}$  зависит от температуры и для каждой из них может быть рассчитана по уравнению смешения:

$$c_{p\hat{a}}(T) = \sum_{i=1}^n r_i c_{pi}(T)$$

где  $c_{pi}$  - истинная теплоемкость  $i$ -ой компоненты воздуха.

Среднее значение теплоемкости в интервале температур от 0 °С до температуры  $t$  рассчитывается по соотношению:

$$\bar{c}_{p\hat{a}}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t c_{p\hat{a}}(t) dt$$

Тогда энтальпия воздуха, отсчитываемая от 0 °С, при любой температуре

$$h_{\hat{a}} \approx \bar{c}_{p\hat{a}} \cdot t$$

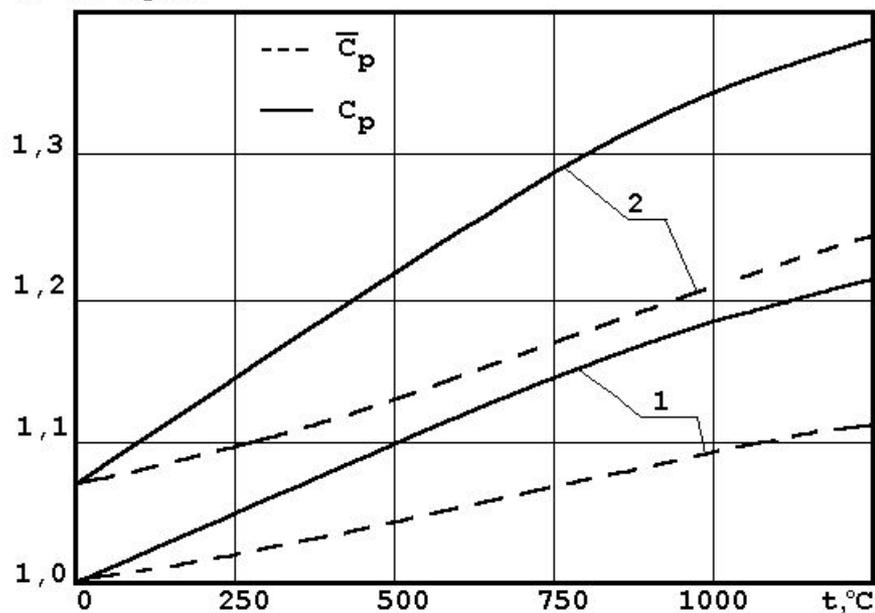




# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания

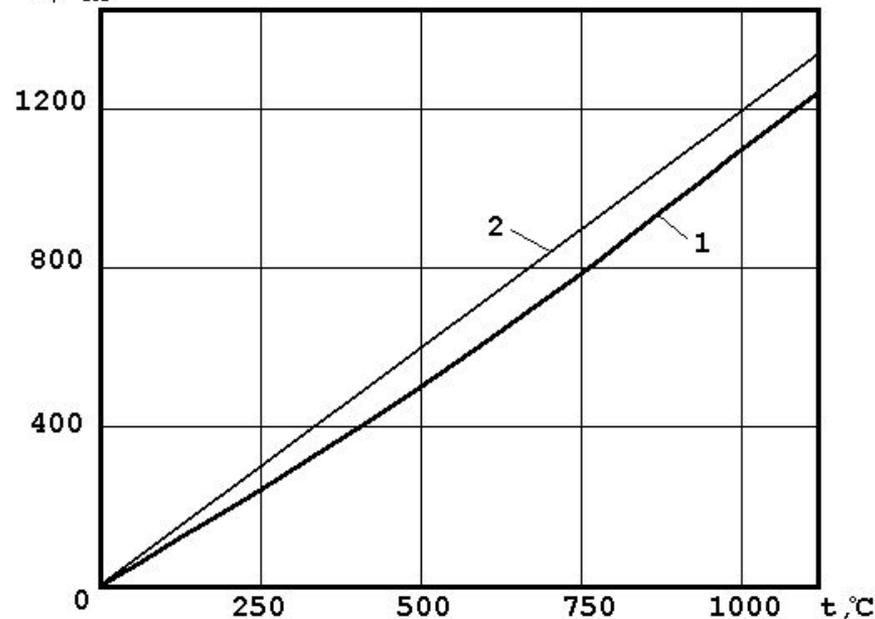


$c_p, \bar{c}_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}}$



Зависимости удельной истинной и средней теплоемкостей воздуха (линии 1) и чистых продуктов сгорания стандартного углеводородного топлива (линии 2) от температуры

$h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$



Зависимости энтальпий воздуха (линии 1) и чистых продуктов сгорания стандартного углеводородного топлива (линии 2) от температуры



# Некоторые теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания

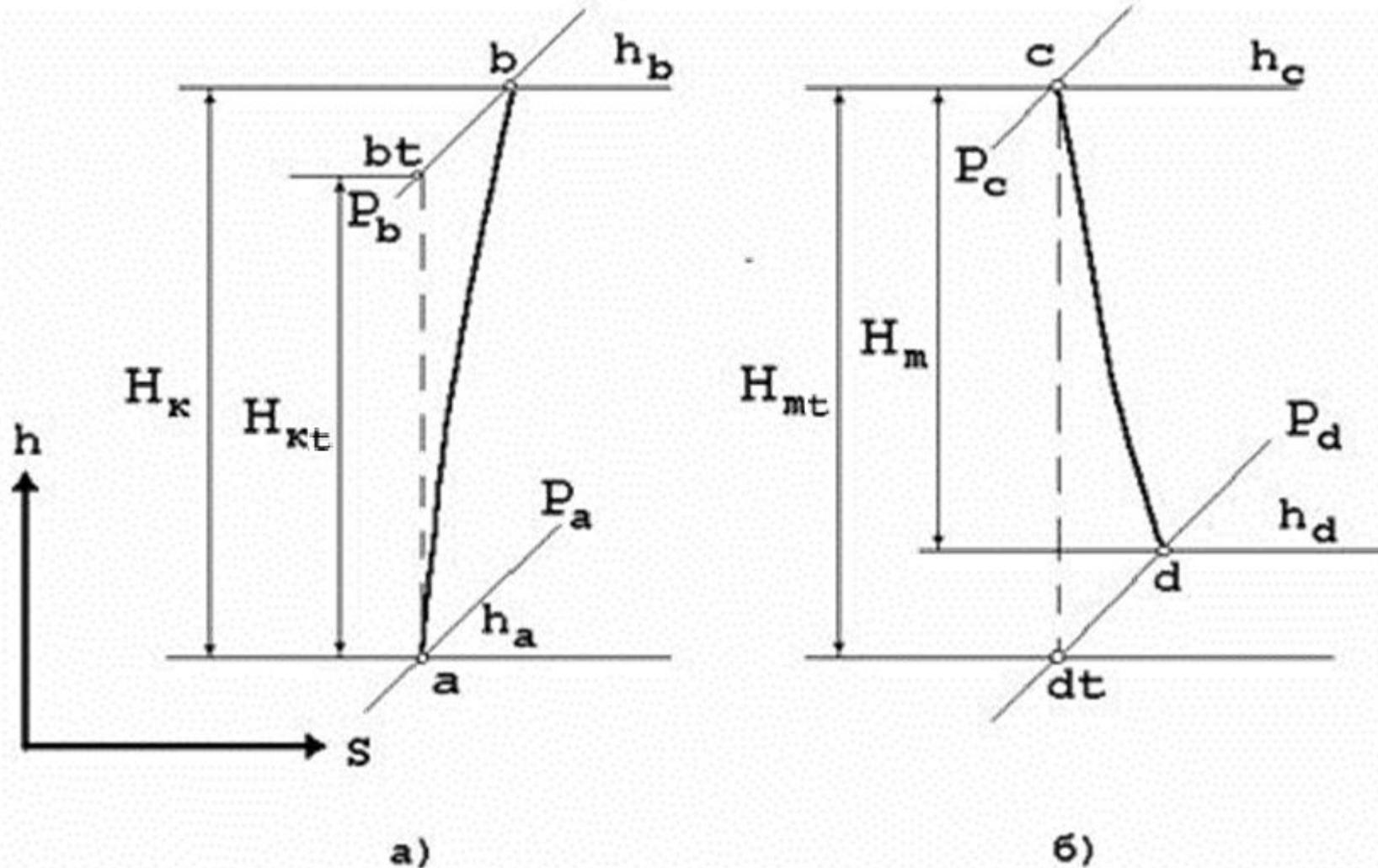
Удельная изобарная теплоемкость и энтальпия сухого воздуха и продуктов сгорания углеводородного топлива (С – 85%, Н – 15%)

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\bar{c}_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\bar{c}_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$
Сухой воздух; $R = 0,28699 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ; $\mu = 28,97 \text{ кг}/\text{кмоль}$					Продукты сгорания; $\alpha = 1$ ; $R = 0,2901 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ; $\mu = 28,66 \text{ кг}/\text{кмоль}$				
0	273	1,0028	1,0028	0	0	273	1,0660	1,0660	0
25	298	1,0038	1,0032	25,08	25	298	1,0718	1,0689	26,77
50	323	1,0053	1,0038	50,19	50	323	1,0776	1,0718	53,59
100	373	1,0098	1,0056	100,56	100	373	1,0900	1,0778	107,78
150	423	1,0163	1,0080	151,21	150	423	1,1031	1,0840	162,60
200	473	1,0244	1,0111	202,22	200	473	1,1172	1,0905	218,10
250	523	1,0339	1,0147	253,67	250	523	1,1320	1,0973	274,33
300	573	1,0445	1,0187	305,61	300	573	1,1475	1,1044	331,31
350	623	1,0559	1,0232	358,13	350	623	1,1634	1,1117	389,08
400	673	1,0677	1,0281	411,22	400	673	1,1795	1,1191	447,65
450	723	1,0798	1,0331	464,91	450	723	1,1956	1,1267	507,03
500	773	1,0918	1,0384	519,20	500	773	1,2116	1,1344	567,20
550	823	1,1036	1,0438	574,09	550	823	1,2272	1,1422	628,19
600	873	1,1150	1,0493	629,58	600	873	1,2423	1,1499	689,93
650	923	1,1258	1,0547	685,58	650	923	1,2568	1,1576	752,41
700	973	1,1361	1,0602	742,13	700	973	1,2707	1,1651	815,60
750	1023	1,1457	1,0656	799,17	750	1023	1,2839	1,1726	879,47
800	1073	1,1546	1,0709	856,68	800	1073	1,2964	1,1800	943,98
850	1123	1,1629	1,0760	914,62	850	1123	1,3083	1,1872	1009,10
900	1173	1,1707	1,0811	972,97	900	1173	1,3195	1,1942	1074,80
950	1223	1,1779	1,0860	1031,68	950	1223	1,3302	1,2011	1141,04
1000	1273	1,1846	1,0907	1090,75	1000	1273	1,3403	1,2078	1207,81
1050	1323	1,1909	1,0954	1150,14	1050	1323	1,3499	1,2143	1275,02
1100	1373	1,1969	1,0998	1209,83	1100	1373	1,3590	1,2207	1342,79
1150	1423	1,2025	1,1042	1269,82	1150	1423	1,3676	1,2269	1410,96
1200	1473	1,2079	1,1084	1330,08	1200	1473	1,3758	1,2330	1479,55
1250	1523	1,2130	1,1125	1390,60	1250	1523	1,3835	1,2388	1548,53
1300	1573	1,2178	1,1165	1451,36	1300	1573	1,3908	1,2444	1617,91
1350	1623	1,2223	1,1204	1512,36	1350	1623	1,3976	1,2498	1687,69
1400	1673	1,2265	1,1242	1573,60	1400	1673	1,4040	1,2550	1767,87





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Термодинамические процессы в компрессоре (а) и турбине (б)





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



При расчете термодинамических процессов в агрегатах ГТУ как воздух, так и продукты сгорания можно считать идеальным газом с постоянной теплоемкостью, осредненной в диапазоне температур процесса. Если, например, при сжатии воздуха в компрессоре происходит повышение его температуры от значения  $t_a$  до  $t_b$ , то осредненная теплоемкость воздуха составит:

$$c_{p\hat{a}} = \frac{1}{t_b - t_a} \int_{t_a}^{t_b} c_{p\hat{a}}(t) dt = \frac{h_{\hat{a}}(t_b) - h_{\hat{a}}(t_a)}{t_b - t_a}$$

Аналогично для процесса расширения в газовой турбине:

$$c_{p\tilde{a}} = \frac{1}{t_c - t_d} \int_{t_d}^{t_c} c_{p\tilde{a}}(t) dt = \frac{h_{\tilde{a}}(t_c) - h_{\tilde{a}}(t_d)}{t_c - t_d}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Адиабатический теплоперепад (теоретическая работа сжатия) компрессора:

$$H_{\hat{e}t} = h_{bt} - h_a = \tilde{n} \tilde{n}_{\delta\hat{a}} (T_{bt} - T_a)$$

Работа, затраченная на сжатие 1 кг воздуха в компрессоре:

$$H_{\hat{e}} = h_b - h_a = \tilde{n} \tilde{n}_{\delta\hat{a}} (T_b - T_a)$$

Относительный внутренний КПД воздушного компрессора:

$$\eta_{\hat{e}} = \frac{H_{\hat{e}t}}{H_{\hat{e}}}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Степень сжатия (повышения давления):

$$\varepsilon = \frac{p_b}{p_a} \quad \text{или} \quad \varepsilon^{m_\varepsilon} = \frac{T_{bt}}{T_a}$$

где

$$m_{\hat{a}} = \frac{k_{\hat{a}} - 1}{k_{\hat{a}}} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}}$$

Тогда

$$H_{\hat{e}t} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}} T_a (\varepsilon^{m_{\hat{a}}} - 1)$$

$$H_{\hat{e}} = \tilde{n}_{\delta\hat{a}} T_a (\varepsilon^{m_{\hat{a}}} - 1) \frac{1}{\eta_{\hat{e}}}$$

$$T_b = T_a \left( 1 + \frac{\varepsilon^{m_\varepsilon} - 1}{\eta_\kappa} \right)$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Изоэнтروпийный теплоперепад (теоретическая работа расширения) газовой турбины:

$$H_{\dot{t}} = h_c - h_{dt} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} (T_c - T_{dt})$$

Работа расширения 1 кг газа в турбине:

$$H_{\dot{\delta}} = h_c - h_d = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} (T_{\tilde{n}} - T_d)$$

Относительный внутренний КПД газовой турбины:

$$\eta_{\dot{\delta}} = \frac{H_{\dot{\delta}}}{H_{\dot{t}}}$$





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Степень расширения:

$$\delta = \frac{P_c}{P_d} \quad \text{или} \quad \delta^{m_z} = \frac{T_c}{T_{dt}}$$

где

$$m_{\tilde{a}} = \frac{k_{\tilde{a}} - 1}{k_{\tilde{a}}} = \frac{R_{\tilde{a}}}{\tilde{n}_{\delta\tilde{a}}}$$

Тогда

$$H_{\dot{o}t} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} T_{\tilde{n}} \left( 1 - \delta^{-m_{\tilde{a}}} \right)$$

$$H_{\dot{o}} = \tilde{n}_{\delta\tilde{a}} \cdot T_{\tilde{n}} \left( 1 - \delta^{-m_{\tilde{a}}} \right) \cdot \eta_{\dot{o}}$$

$$T_d = T_c \left[ 1 - \left( 1 - \delta^{-m_z} \right) \cdot \eta_m \right]$$



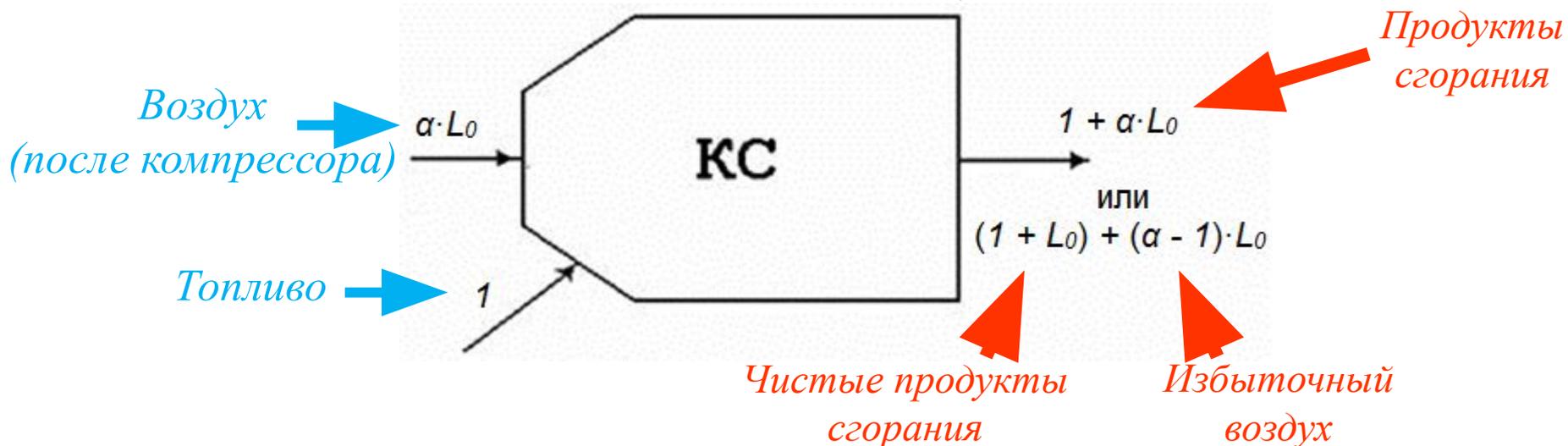


# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Продукты сгорания – это смесь газов, образующихся в результате химических реакций окисления горючих компонент топлива (углерод, водород, метан и т.д.) кислородом воздуха.

Чистые продукты сгорания (ЧПС) – это продукты сгорания, в которых отсутствуют как несгоревшие вещества, так и избыточный кислород воздуха.



## Материальный баланс камеры сгорания

$L_0$  – стехиометрический расход (количество воздуха минимально необходимое для сжигание 1 кг топлива), кг/кг;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (отношение действительного (фактического) расхода воздуха, подаваемого в камеру сгорания для сжигания 1 кг топлива, к минимально необходимому его количеству).

В результате сжигания 1 кг топлива при расходе воздуха  $L_0$  кг образуется  $(1 + L_0)$  кг ЧПС





# Термодинамические процессы в ГТУ и их расчет



Доля чистых продуктов сгорания:

$$r_{\dot{i}\tilde{n}} = \frac{1 + L_0}{1 + \alpha L_0}$$

Доля избыточного воздуха:

$$r_{\hat{a}} = \frac{(\alpha - 1)L_0}{1 + \alpha L_0} = 1 - r_{\dot{i}\tilde{n}}$$

Теплофизические свойства продуктов сгорания для любой температуры  $T$  определяются соотношениями:

$$R_{\tilde{a}} = r_{\hat{a}}R_{\hat{a}} + r_{\dot{i}\tilde{n}}R_{\dot{i}\tilde{n}}$$

$$\tilde{n}_{\delta\tilde{a}}(T) = r_{\hat{a}}\tilde{n}_{\delta\hat{a}}(T) + r_{\dot{i}\tilde{n}}\tilde{n}_{\delta\dot{i}\tilde{n}}(T)$$

$$h_{\tilde{a}}(T) = r_{\hat{a}}h_{\hat{a}}(T) + r_{\dot{i}\tilde{n}}h_{\dot{i}\tilde{n}}(T)$$





Спасибо за внимание!



МОИ