

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива



Разработчик: к.х.н., доцент каф. ТХНГ Н.В. Чухарева



Топливо- горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения значительных количеств теплоты

Факторы, определяющие целесообразность применения тех или иных горючих веществ в качестве топлива :

- имеющиеся запасы;
- стоимость добычи в транспортировки;
- теплота сгорания;
- реакционная способность,
- влияние на окружающую среду;
- доступность для широкого использование и т.д.



Происхождение органического топлива

Естественное

Искусственное

Агрегатное состояние топлива

Твердое

Жидкое

Газообразное



Назначение и способ использования

Энергетическое



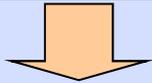
**Вид топлива,
являющийся
источником тепловой
энергии**

Технологическое



**Вид топлива,
являющийся источником
тепловой энергии и
компонент
технологического
процесса**

Горючая часть

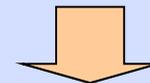


- углерод - С,
- водород - Н,
- сера горючая (летучая) - Sl .



Элементный состав топлива

Негорючая часть



- кислород - О,
- азот – N,
- минеральные вещества (зольность) – А,
- влага - W .

Компонентный состав топлива

Механическая смесь горючих и негорючих газов

ГОРЮЧАЯ ЧАСТЬ

- окись углерода (CO),
- водород (H₂),
- метан (CH₄),
- тяжелые углеводорода (C_mH_n),
- иногда сероводород (H₂S).

НЕГОРЮЧАЯ ЧАСТЬ

- кислород (O₂),
- азот (N₂)
- двуокись углерода (CO₂).

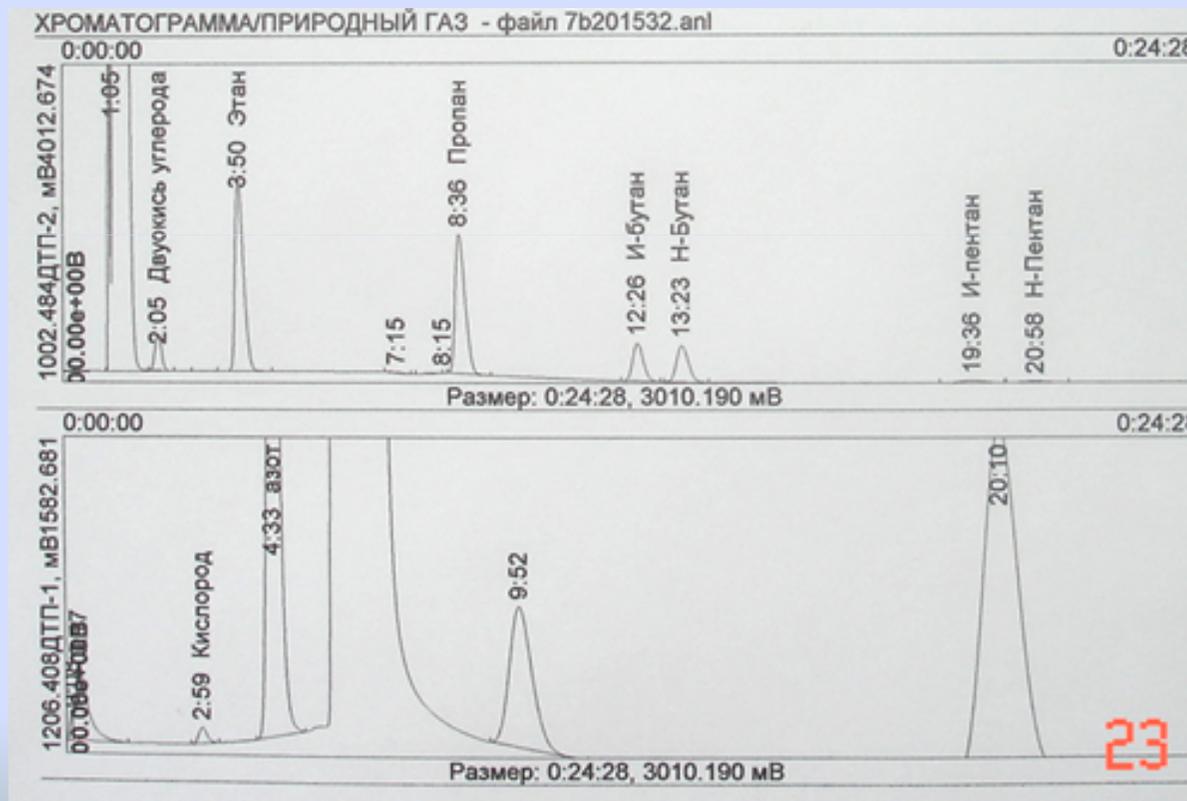
Газообразное топливо принято характеризовать составом сухой газообразной части в % по объему:



Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

6

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов. Для определения состава газообразного топлива широкое применение наши методы хроматографии



Природный газ характеризуется высоким содержанием (CH_4), а также небольшого количества других УВ: (C_2H_6), (C_3H_8), (C_4H_{10}), (C_2H_4)-этилен, и (C_3H_6)-пропилен.

В искусственных газах содержание горючих составляющих (водорода и окиси углерода) достигает 25...45%, в балласте преобладают азот и углекислота—55...75%.

**ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ СОСТАВ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА,
ВЫРАЖЕННЫЙ В % ПО МАССЕ НА РАБОЧЕЕ
ВЕЩЕСТВО, НА ГОРЮЧЕЕ И НА СУХОЕ**

$$C^p + H^p + S_{л}^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100$$

$$C^c + H^c + S_{л}^c + O^c + N^c + A^c = 100$$

$$C^z + H^z + S_{л}^z + O^z + N^z = 100$$



ПЕРЕСЧЕТ СОСТАВА ТОПЛИВА

Заданная масса топлива	Коэффициенты пересчета на массу		
	рабочую	горючую	сухую
Рабочая	1	$100/[100 - (A^p + W^p)]$	$100/(100 - W^p)$
Горючая	$[100 - (A^p + W^p)]/100$	1	$(100 - A^c)/100$
Сухая	$(100 - W^p) / 100$	$100 / (100 - A^c)$	1



Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

УГЛЕРОД

$Q_H=33600$ КДж

В газообразном топливе содержание углерода, например в метане составляет 75 % массовых



ВОДОРОД

$Q_H=119000$ КДж
 $Q_V=141500$ КДж

В метане содержание углерода - 25% массовых



СЕРА ЛЕТУЧАЯ

$Q_H=9000$ КДж

Сера топлива состоит из:

- **серы органической**, входящей в топливо в виде органических соединений,
- **серы колчеданной**, входящей в состав топлива в виде колчедана (FeS_2),
- **серы сульфатной**, входящей в топливо в виде, например, гипса ($CaSO_4$).

Сера органическая и колчеданная образуют серу горючую (летучую)

КИСЛОРОД И АЗОТ

- **Снижает** содержание горючих элементов
- **Кислород связывает** часть горючих элементов топлива, обесценивает его.
- **Азот** в топливе способствует образованию в газообразных продуктах сгорания **окислов азота**, обладающих высокой токсичностью, значительно превышающей токсичность окислов серы

внутренний балласт

ЗОЛА И ВЛАГА

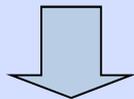
- **Снижает** содержание горючих элементов
- **Снижает** тепловую ценность

внешний балласт

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА

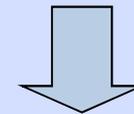
Теплота сгорания (Q) - количество тепла в кДж, которое выделяет при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива при нормальных физических условиях

Высшая (Q_v)



все тепло, выделившееся при сгорании единицы топлива, включая тепло конденсации водяных паров.

Низшая (Q_n)



теплота сгорания, которая не учитывает тепло конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания топлива.

Теплота сгорания

$$Q_{\text{мол}} = \left| \sum_i^n n_i H_{\text{ПС}} - H_{\text{ГВ}} \right|$$

молярная

где $Q_{\text{мол}}$ – молярная теплота сгорания топлива, кДж/моль;
 n_i – количество молекул i -го продукта горения, приходящееся на одну молекулу горючего;
 $H_{\text{ПС}}$, $H_{\text{ГВ}}$ – теплота образования продуктов горения и исходных горючих веществ соответственно.

массовая

$$Q_{\text{масс}} = \frac{Q_{\text{мол}}}{\mu} 1000$$

где μ – молярная масса горючего вещества, кг/кмоль

объемная

$$Q_{\text{об}} = \frac{Q_{\text{мол}}}{V_{\mu}} 1000$$

где V_{μ} – объем киломоля газа, который при стандартных условиях составляет 22,4 м³/кмоль

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

13

Низшая теплота сгорания сухого газообразного топлива может быть определена в формуле

$$Q_H^C = 127 CO + 108 H_2 + 358 CH_4 + 234 H_2S + 590 C_2H_4 + 638 C_2H_4 + 915 C_3H_8 + 1190 C_4H_{10} + 1465 C_5H_{12}$$

<i>Удельная теплота сгорания веществ</i>	
<i>Горючее</i>	<i>Теплота сгорания, Дж/кг</i>
Бытовой газ	$13,25 \cdot 10^6$
Условное топливо	$29,3 \cdot 10^6$ (7000 ккал/кг)
Мазут	$39,2 \cdot 10^6$
Нефть	$41 \cdot 10^6$
Керосин	$40,8 \cdot 10^6$
Дизельное топливо	$42,7 \cdot 10^6$
Бензин	$44 \cdot 10^6 \dots 42 \cdot 10^6$
Пропан	$47,54 \cdot 10^6$
Этилен	$48,0 \cdot 10^6$
Метан	$50,1 \cdot 10^6$
Водород	$120,9 \cdot 10^6$

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

14

Для сравнения тепловой ценности различных топлив пользуются понятием **условного топлива**, теплота сгорания которого равна **29350 кДж/кг (7000 ккал/кг)**

Для пересчета натурального топлива с теплотой сгорания в условное топливо служит безразмерный коэффициент **Э**, называемый тепловым эквивалентом данного топлива.



$$\mathcal{E} = \frac{Q_H^P}{29350}$$

Летучие вещества и кокс

Принято относить горючей массе топлива

Чем геологически моложе топливо, тем больше выход летучих веществ.

Выход летучих горючих веществ характеризует способность топлива к воспламенению (чем больше выход летучих, тем ниже температура их выделения)



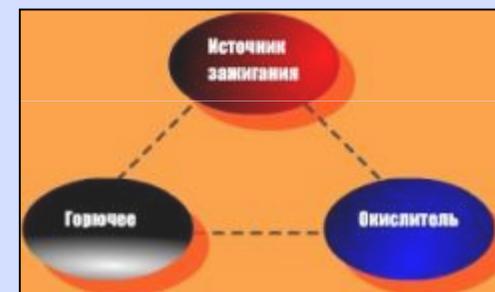
Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

16

Горение топлива

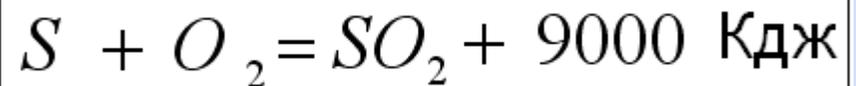
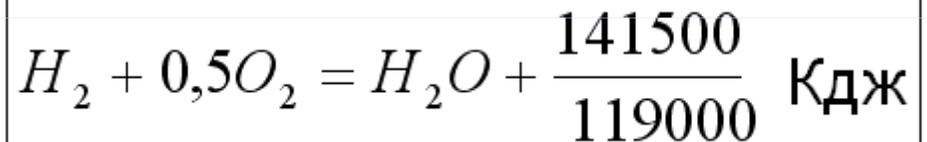
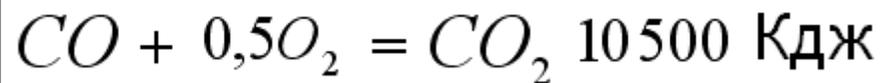
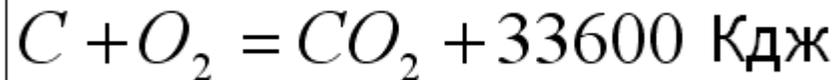
Горение – это сложный физико-химический процесс взаимодействия топлива с окислителем, протекающий при высоких температурах и сопровождающийся интенсивным выделением теплоты (экзотермические реакции)

ЦЕЛЬ РАСЧЕТОВ ГОРЕНИЯ

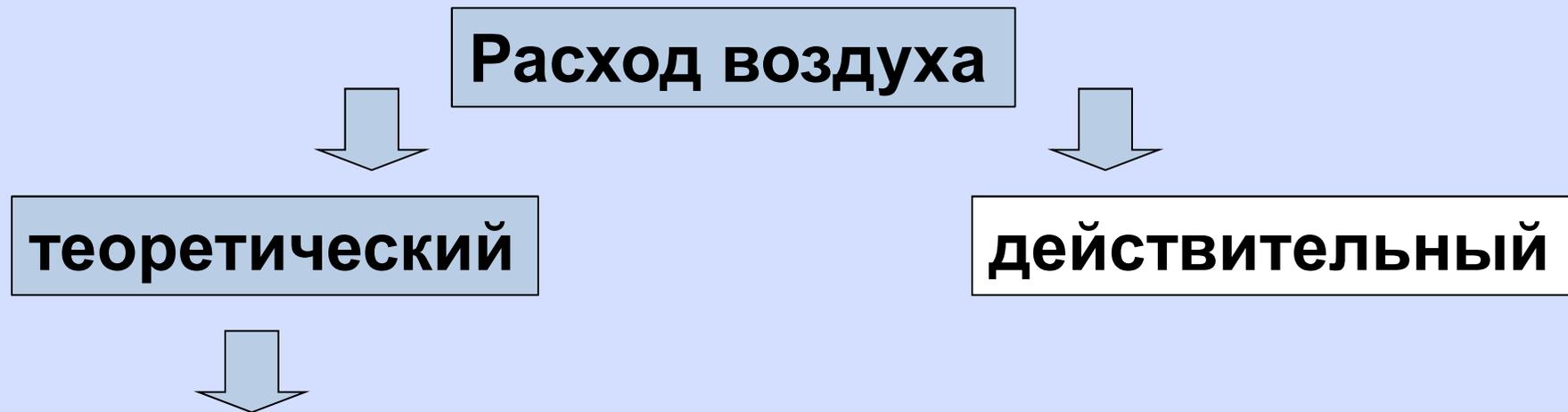


- Определение количества, необходимого для горения воздуха (окислителя);
- Определение количества и состава продуктов сгорания;
- Определение температуры горения.

Горение газообразного топлива



КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА ДЛЯ ГОРЕНИЯ



Под **теоретически необходимым расходом** понимают то минимальное количество воздуха, которое требуется для полного окисления всех горючих элементов топлива

Теоретический расход воздуха

массовый

$$L_0 = \frac{G_0}{0,232}$$

объемный

$$V_0 = \frac{L_0}{1,293}$$

G_0 - массовое количество кислорода в кг, необходимое для сжигания 1 топлива (с учетом содержащегося кислорода в топливе)

0,232 - массовая доля кислорода в атмосферном воздухе

0,232 - массовая доля кислорода в атмосферном воздухе

Общее количество кислорода, необходимое для полного сжигания 1 кг топлива:

$$G_0 = G_{OC} + G_{OH} + G_{OS} - G_{OT}$$

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

20

Из уравнения горения **углерода** :



Из этого следует, что **для сжигания 1 кг С требуется 8/3=2,67 кг O₂**,

$$G_{\text{ос}} = \frac{2,67 \cdot C^P}{100}$$

Из уравнения горения **водорода**



Для сжигания 1 кг H_2 требуется 8 кг O_2

**Для сжигания водорода, содержащегося в 1 кг топлива,
потребуется кислорода, кг:**

$$G_{OH} = \frac{8 \cdot H^P}{100}$$

Из уравнения горения серы

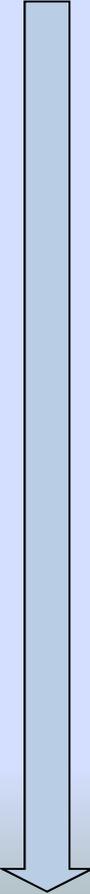


Для окисления 1 кг S необходимо израсходовать 1 кг O₂

Окисление серы, содержащейся в 1 кг топлива, потребуется кислорода, кг:

$$G_{OS} = \frac{S^P}{100}$$

Суммарное количество кислорода в кг необходимое для сжигания 1 кг топлива:

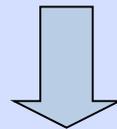

$$G_0 = \frac{2,67 \cdot C^P}{100} + \frac{8 \cdot H^P}{100} + \frac{S^P}{100} - \frac{O^P}{100}$$

$$L_0 = 0,115C^P + 0,345H^P + 0,043 \left(S^P_l - O^P \right)$$

$$V_0 = 0,089 C^P + 0,266 H^P + 0,033 \left(S^P_l - O^P \right)$$

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА E

$$E = \frac{\frac{H^2}{4.032} - \frac{O^2}{32}}{\frac{C^2}{21.01} + \frac{S^2}{32.06}} = 2.979 \frac{H^2 - 0,126 \cdot O^2}{C^2 + 0,375 \cdot S^2}$$



$$L_0 = 0,1151 \cdot (1 + E) \cdot (C^2 + 0.375 S^2)$$

КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА α

Коэффициент избытка воздуха - отношение количества воздуха, действительно подаваемого в камеру сгорания для полного окисления элементов топлива, к теоретически необходимому расходу

$$\alpha = \frac{G_B}{G_{\text{топливного газа}} \cdot L_0}$$

$$\alpha = \frac{L_{\partial}}{L_0} = \frac{V_{\partial}}{V_0}$$

где $G_{\text{возд}}$ и $G_{\text{газа}}$ – массовый расход воздуха и топливного газа

В газовых ДВС – $\alpha = 1,1 \dots 1,3$,

В карбюраторных ДВС $\alpha = 0,8, \dots 1,1$

В дизелях $\alpha = 1,2 \dots 2,0$

В ГТУ $\alpha = 4 \dots 8$

Массовое количество газообразных продуктов сгорания топлива выражается суммой количества сжигаемого топлива и количества воздуха, подаваемого для его сжигания. Количество продуктов сгорания приходящихся на 1 кг топлива, кг/кг:

$$M_{\Gamma} = 1 + \alpha \cdot L_0$$

Полный объем газообразных продуктов полного сгорания 1 кг жидкого и твердого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$) или 1 м^3 газообразного топлива ($\text{м}^3/\text{м}^3$) принято записывать в виде:

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + \Delta V_B$$

Составляющие данного уравнения для газообразного топлива в м³/м³ рассчитываются по формулам:

объем трехатомных газов

объем избыточного воздуха

$$\Delta V_B = (\alpha - 1) \cdot V_0$$

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot \left[CO + \sum m \cdot C_m H_n + H_2S + CO_2 \right]$$

теоретический объем азота

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_0 + 0,01 \cdot N_2^P$$

объем водяных паров

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left(H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + H_2S \right) + 0,0161 \cdot V_0$$

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

ЭНТАЛЬПИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

$$h = G^2 \cdot Cp^2 \cdot t_2 = V^2 \cdot Cp^{2'} \cdot t_2 \quad (\text{кДж/кг или кДж/м}^3)$$

G^2 - масса продуктов сгорания на единицу количества топлива, кг/кг или кг/м³;

V^2 - объем продуктов сгорания на единицу сжигаемого топлива, м³/кг или м³/м³;

Cp^2 и $Cp^{2'}$ - средняя массовая и объемная изобарные теплоемкости газов соответственно, кДж/(кг • град) или кДж/(м³ • град);

t_2 - температура продуктов сгорания, °С.

Энтальпия продуктов сгорания топлива :

$$h^2 = (V_{RO_2} \cdot C'_{CO_2} + V^0_{N_2} \cdot C'_{N_2} + V_{H_2O} \cdot C'_{H_2O} + \Delta V_B \cdot C'_B) \cdot t_2$$

ТЕМПЕРАТУРА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Калориметрическая

температуру, до которой нагрелись бы продукты полного сгорания, если бы вся теплота топлива и воздуха пошла на нагревание газов

Теоретическая

температура, до которой нагрелись бы продукты сгорания, если бы на их нагрев пошла вся теплота, введенная в камеру сгорания, за вычетом потерь от химической ($q_{хим}$) и физической ($q_{физ}$) неполноты сгорания

Действительная

фактическая температура с учетом всех потерь теплоты, в том числе и в окружающую среду. Действительная температура может быть определена путем сложных расчетов с учетом теплоотдачи

Под калориметрической температурой горения понимают температуру, до которой нагреваются продукты горения при соблюдении следующих условий:

- 1) все тепло, выделившееся в процессе реакции, идет на нагревание продуктов горения;
- 2) происходит полное сгорание стехиометрической горючей смеси, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$;
- 3) в процессе образования продуктов горения не происходит их диссоциация;
- 4) горючая смесь находится при начальной температуре 273К и давлении 101,3 кПа.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КС ПРИ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

$$Q_H + h_T + h_B = V^2 \cdot C^{2/} \cdot t_K = h^{K^2}$$

h_T и h_B - физическая теплота топлива и воздуха соответственно на единицу количества топлива, кДж/кг или кДж/м³

$$t_K = \frac{Q_H + h_T + h_B}{V^2 \cdot C^{2/}}$$

в развернутом виде

$$t_K = \frac{Q_H^P + h_T + h_B}{V_{RO_2} \cdot C'_{pmCO_2} + V_{N_2} \cdot C'_{pmN_2} + V_{H_2O} \cdot C'_{pmH_2O} + \Delta V_B \cdot C'_{pmB}}$$

Модуль 3 Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ: элементы топлива, внешний и внутренний балласт топлива, теплотехническая оценка элементов топлива

31

Справочные данные по метану

Показатели	Значения
<i>Химический состав</i>	
Молекулярная формула	CH ₄
Молекулярная масса	16,043
<i>Температура фазовых переходов, К</i>	
кипения при давлении 0,1013 МПа	111,7
замерзания (плавления) при 0,1013 Мпа	90,7
<i>Энергетические характеристики</i>	
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	50,1
Тепловой эффект сгорания криотоплива, МДж/кг	48,8
<i>Термодинамические показатели</i>	
Удельная газовая постоянная, Дж/кг.К	518,26
Теплоемкость газа (0,1013 Мпа, 293 К), кДж/кг.К	2,22
<i>Характеристики горения в воздухе</i>	
Теплопроизводительность, МДж/кг	2,75
Калориметрическая температура, К	2398
Нормальная скорость пламени, м/с	0,34
Температура самовоспламенения, К	815

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КС ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ СГОРАНИЯ

$$Q_H^P \frac{100 - q_{хим} - q_{физ}}{100} + h_T + h_B = V_{\Gamma} \cdot C'_{\Gamma} \cdot t_T$$

Если ввести понятие коэффициента тепловыделения:

$$\eta' = \frac{100 - q_{хим} - q_{физ}}{100} + \frac{h_T + h_B}{Q_H^P}$$

Теоретическую температуру можно определить по формуле

$$t_T = \frac{Q_H^P \cdot \eta'}{V_{\Gamma} \cdot C'_{\Gamma}}$$

Благодарю за внимание!

Перечень рекомендуемой литературы по Модулю 3

Основная:

- Газотурбинные установки: учебное пособие/ А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева, С.С. Байкин.— Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 139с.
- Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов. / А.Г. Костюк –3/е издание перераб. и дополненное.— М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 476с.
- Энергетика трубопроводного транспорта газов: Учебное пособие / А.Н. Козаченко, В.Н. Никишин, Б.П. Поршаков – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. – 400 с.
- Пономарев П.С. Вопросы рациональной эксплуатации газотурбинных установок: учебное пособие. – Уфа: ГОУ ВПО УГНТУ, 2003. – 88

Дополнительная:

- Газотурбинные технологии. Специализированно-аналитический журнал. Изд-во «Медиа Гранд»

