

## Лекция № 4

### 4 Топливо и его химические реакции при сгорании

Для одного килограмма жидкого топлива, состоящего из углерода (С), водорода (Н) и кислорода (Ог) при отсутствии серы можно написать

$$C + H + Oг = 1 \text{ кг.}$$

При сгорании топлива (полном) предполагается, что в результате реакции С, Н, с О воздуха образуется CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O



При расчете исходных и конечных продуктов реакции в массовых и для Нкг /H<sub>2</sub>/единицах получим:

$$/H_2/12 \text{ кг } C + 32 \text{ кг } O_2 = 44 \text{ кг } CO_2;$$

$$4 \text{ кг } H_2 + 32 \text{ кг } O_2 = 36 \text{ кг } H_2O.$$

Соответственно для Скг /С/

$$Скг /С/ + 8/3Скг /O_2/ = 11/3Скг /CO_2/ \quad (4.1)$$

и для Нкг

$$Нкг /H_2/ + 8Нкг /O_2/ = 9Нкг /H_2O/. \quad (4.2)$$

Наименьшее количество кислорода  $O_0$ , которое необходимо подвести извне к топливу для полного его окисления, называется *теоретически необходимым количеством кислорода*. Из уравнений (4.1) и (4.2) следует, что для полного сгорания 1 кг топлива необходимо кислорода

$$O_0 = 8/3C + 8H - O_T \text{ кг.}$$

В воздухе кислорода содержится 23% по массе, а по объему 21%. Воздуху для окисления топлива необходимо

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3}C + 8H - O_T \right) \text{ кг} \quad (4.3)$$

или

кг.

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_T}{32} \right) \text{ кмоль.} \quad (4.4)$$

Кажущаяся молекулярная масса воздуха  $\mu_0 = 28,97$ , следовательно

$$l_0 = \mu_0 \cdot L_0 = 28,97 L_0$$

В ДВС количество действительно потребляемого воздуха может быть меньше, больше или равно  $L_0$ , что оценивается  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{L}{L_0}$$

При стехиометрической смеси  $L = L_0$ ,  $\alpha = 1$ ;  $\alpha < 1$ , смесь богатая,  $\alpha > 1$ , смесь бедная. В бензиновых ДВС при полной открытой дроссельной заслонке наибольшая экономичность достигается при  $\alpha = 1-1,3$ . Максимальная мощность достигается при  $\alpha = 0,85-0,9$ .

Для различных двигателей при номинальной мощности принимают следующие значения  $\alpha$  :

Карбюраторные двигатели	0,8 - 0,96
Двигатели с форкамерно-факельным зажиганием	0,85 – 0,98 и выше
Двигатели с искровым зажиганием и впрыском топлива	0,85 – 1,3
Дизели с нераздельными камерами и объемным смесеобразованием	1,5 – 1,7
Дизели с неразделенными камерами и пленочным смесеобразованием	1,5 – 1,6
Вихрекамерные дизели	1,3 – 1,45
Предкамерные дизели	1,4 – 1,5
Дизели с наддувом	1,3 – 2,2

На рис. 4.1 показана примерная зависимость от нагрузки.

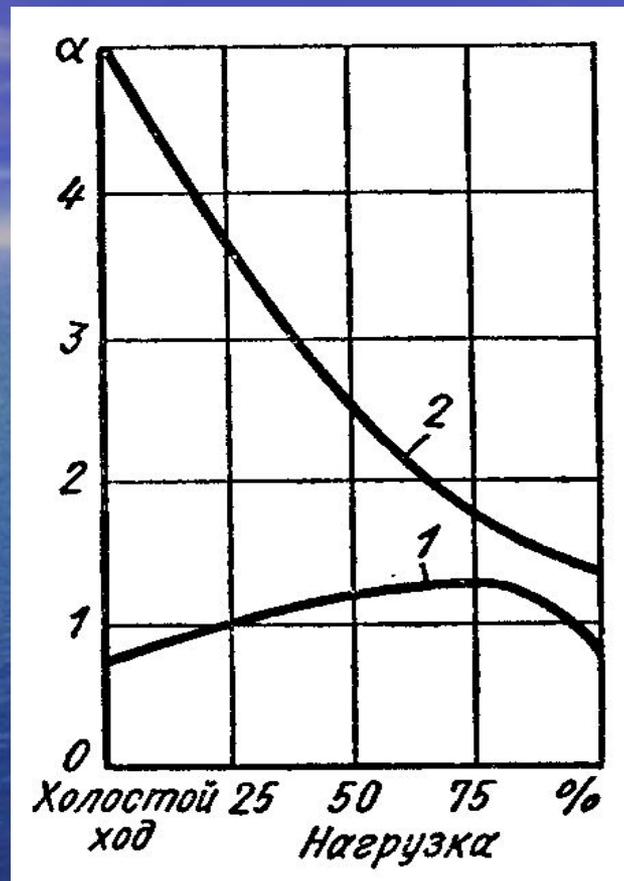


РИС. 4.1

1 – карбюраторный двигатель, 2 – дизель

В дизелях, в которых применяется качественное регулирование,  $\alpha$  = 1,25 при полной нагрузке, от 5 при малых нагрузках до  $\alpha$  нагрузки.

$\alpha$

## Горючая смесь и состав продуктов сгорания при $\alpha > 1$ (полное сгорание)

При полном сгорании 1 кг топлива в карбюраторном двигателе общее количество горючей смеси, состоящей из паров топлива и воздуха, составляет

$$M_1 = \alpha L_0 + \frac{1}{\mu_T} \quad \text{кмоль,} \quad (4.5)$$

где  $\mu_T$  - молекулярная масса топлива.

Таблица 4.1

## Элементарный состав и характеристика бензина и дизельного топлива

Параметры	Бензин	Дизельное топливо	Параметры	Бензин	Дизельное топливо
Элементарный состав по массе			Теплота сгорания смеси при $\alpha = 1$ в МДж/кмоль	83,9	86,0
C	0,855	0,870			
H	0,145	0,126			
O <sub>T</sub>	-	0,004			
Средняя молекулярная масса	110-120	180-200	$L_0$ для полного сгорания в кмоль	0,512	0,496
Теплота сгорания топлива в МДж/кг	44	42,5	Характеристика топлива $\beta$	0,402	0,346

В дизеле, так как топливно-воздушная смесь образуется в камере сгорания и из за малого объема, занимаемого жидким топливом, молекулярную массу топлива не учитывают. Тогда

$$M_1 = \alpha L_0 \text{ кмоль.}$$

Для любого топлива масса смеси

$$G_1 = 1 + \alpha l_0 \text{ кг.}$$

В случае полного сгорания ( $\alpha > 1$ ) продукты сгорания состоят из углекислого газа, водяного пара, избыточного кислорода и азота. Общее количество продуктов сгорания, отнесенное к 1 кг топлива

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} \text{ кмоль.} \quad (4.6)$$

Количество отдельных составляющих продуктов сгорания определяется по следующим уравнениям:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} \text{ кмоль}; \quad (4.7)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} \text{ кмоль}; \quad (4.8)$$

$$M_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 \text{ кмоль}. \quad (4.9)$$

где  $0,21\alpha L_0$  - масса поступившего кислорода, кмоль;

$0,21\alpha L_0$  - масса кислорода, принявшего участие в реакции, кмоль.

После подстановки в уравнение (4.6) выражений (4.7) – (4.9) находим:

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,21(\alpha - 1)L_0 + 0,79L_0 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \alpha L_0 - 0,21L_0 \quad (4.10)$$

$$M_2 = \alpha L_0 + \frac{C}{12} + \frac{H}{2} - \frac{C}{12} - \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} = \alpha L_0 + \frac{H + \frac{O_T}{8}}{4} \quad \text{КМОЛЬ.} \quad (4.11)$$

Для стехиометрического состава смеси (= 1)

$$M_{O_2} = 0 \quad ;$$

$$(M_2)_{\alpha=1} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79 L_0 \quad \text{КМОЛЬ.}$$

Тогда для любого  $\alpha > 1$

$$M_2 = (M_2)_{\alpha=1} + (\alpha - 1)L_0 \quad \text{КМОЛЬ.}$$

Масса продуктов сгорания при сгорании 1 кг жидкого топлива

$$G'_2 = \frac{11}{3}C + 9H + 0,23(\alpha - 1)l_0 + 0,77\alpha l_0 = G_1 \quad \text{КГ.}$$

Масса продуктов сгорания остается равной сумме масс воздуха и топлива до сгорания, а в общем случае не равно, то есть при одинаковых температуре и давлении объем продуктов сгорания может быть не равным объему горючей смеси до сгорания. Изменение объема смеси при сгорании происходит вследствие изменения числа молекул газообразных продуктов сгорания по сравнению с числом молекул горючей смеси до сгорания, из-за изменения объема при сгорании водорода, а также вследствие перехода кислорода топлива в газообразное состояние.

Изменение определяется как разность

$$\Delta M = M_2 - M_1 .$$

Для дизелей

$$\Delta M = \alpha L_0 + \left( H + \frac{O_T}{8} \right) / 4 - \alpha L_0 = \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} \text{ КМОЛЬ.} \quad (4.13)$$

Для ДВС с внешним смесеобразованием

$$\Delta M = \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} - \frac{1}{\mu_T} \text{ КМОЛЬ.} \quad (4.14)$$

Относительное изменение объема при сгорании горючей смеси характеризуется коэффициентом молекулярного изменения свежей смеси, который представляет собой отношение количества продуктов сгорания к количеству горючей смеси до сгорания, то есть

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} = 1 + \frac{\Delta M}{M_1}$$

Для дизеля

$$\mu_0 = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O_T}{32}}{\alpha L_0}$$

Для карбюраторного двигателя

$$\mu_0 = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} - \frac{1}{\mu_T}}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_T}}$$

На рис.4.2 показана зависимость  $\mu_0$  от  $\alpha$ .

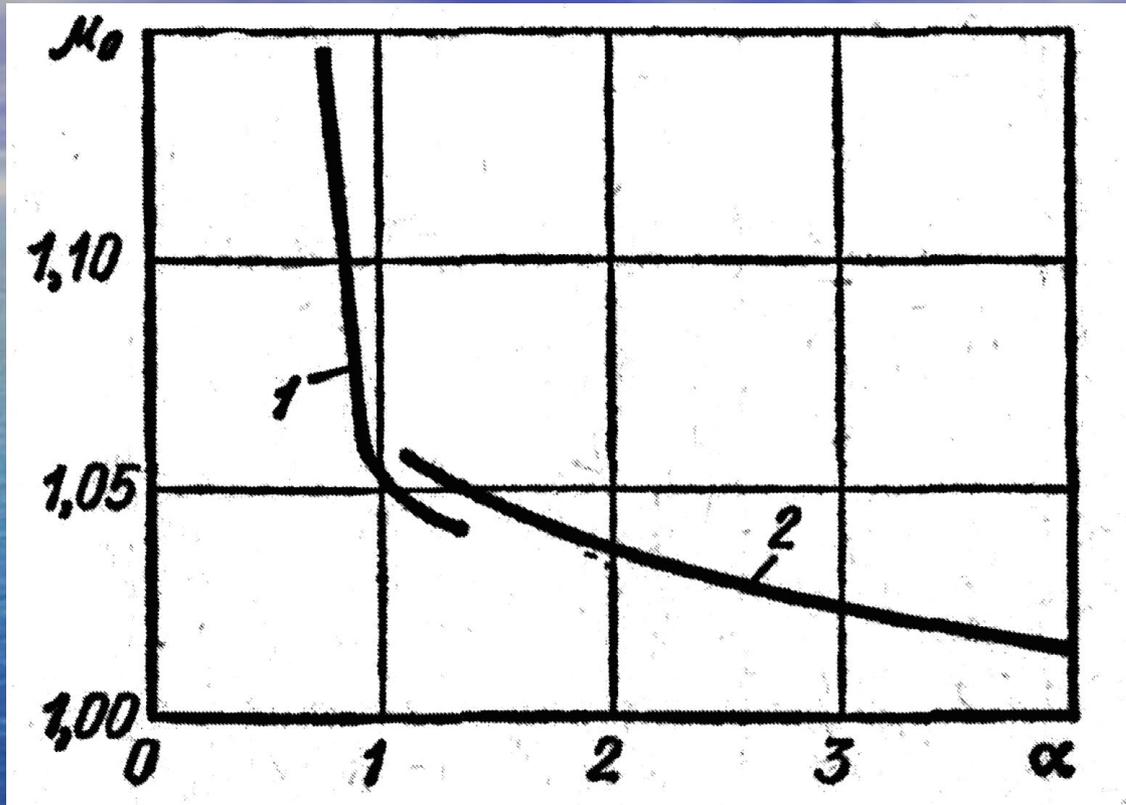


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента  $\mu_0$  от коэффициента  $\alpha$  :  
1 – бензин; 2 – дизельное топливо

Анализ отработавших газов, когда  $\lambda < 1$ , показывает, что отношение числа молей водорода и окиси углерода примерно постоянно для данного топлива и не зависит от  $\lambda$ . Обозначим это соотношение через

$$\kappa = \frac{M_{H_2}}{M_{CO}}.$$

Согласно опытам для бензинов, у которых  $H/C = 0,17-0,19$ , отношение  $\kappa$ , а в случае  $H/C = 0,13$ .

Продукты сгорания состоят из компонент:  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ . Химическая реакция углерода с кислородом в случае неполного сгорания.



$$1 \text{ кг } /C/ + 4/3 \text{ кг } /O_2/ = 7/3 \text{ кг } /CO/.$$

Обозначая через  $\lambda$  долю углерода  $/C/$  топлива, сгоревшего в  $CO$ , получим

$$\lambda \text{ кг } /C/ + 4/3 \lambda \text{ кг } /O_2/ = 7/3 \lambda \text{ кг } /CO/. \quad (4.15)$$

или

$$\lambda \text{ кг } /C/ + \lambda/24 \text{ кмоль } /O_2/ = \lambda/12 \text{ кмоль } /CO/. \quad (4.16)$$

## Общее количество продуктов сгорания

$$(M_2)_{\alpha < 1} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79\alpha L_0 \quad \text{кмоль.} \quad (4.18)$$

## Изменение объема при неполном сгорании

$$\begin{aligned} \Delta M &= M_2 - M_1 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79\alpha L_0 - \alpha L_0 - \frac{1}{\mu_T} = \\ &= 0,21(1 - \alpha)L_0 + \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} - \frac{1}{\mu_T} \quad \text{кмоль.} \quad (4.19) \end{aligned}$$

В отличие от полного сгорания в этом случае изменение объема  $\Delta M$  зависит не только от содержания в топливе водорода, но также и от содержания углерода, так как при сгорании углерода в CO происходит изменение объема, в то время как при сгорании углерода в CO<sub>2</sub> изменения объема нет.

Принятая предпосылка о составе продуктов сгорания справедлива только при уменьшении  $\alpha$  до  $\alpha_{\text{предельное}}$  при котором весь углерод топлива сгорает в CO и  $M_{\text{CO}_2} = 0$ . При дальнейшем уменьшении часть углерода совершенно не будет окисляться и в продуктах сгорания появиться сажа.

Для бензина при  $\beta = 0,4$  и  $\alpha_{\text{пр}} = 0,5$ .

Качество топлива определяется теплотой сгорания, т.е. количеством выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для жидкого) или объемной (для газообразного) единицы топлива.

Определяют высшую  $H_o$  и низшую  $H_u$  – теплоту сгорания, которые отличаются приростом теплоты при конденсации водяного пара, учитываемую в  $H_o$ .

Связь между ними  $H_u = H_o - 2,512 \cdot 10^6 (9H + W)$  дж/кг

По формуле Менделеева  $H_u$  (для любого жидкого топлива)

$$H_u = [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,51(9H + W)] \cdot 10^6 \text{ дж/кг.}$$

## Контрольные вопросы:

1) Какое количество углерода и водорода содержится в одном кг жидкого топлива?

2) Какое количество воздуха необходимо для сгорания одного кг бензина?

3) Что такое коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ?

4) Как отличается  $\alpha$  для бензинового и дизельного топлива?

5) Какова низшая теплота сгорания бензина?

6) Чем отличается низшая и высшая теплота сгорания?

7) Что такое богатая и бедная смесь?

8) Какова величина цетанового числа отечественных дизельных топлив?

9) При каких условиях в отработанных газах появляется  $CO$ ?