

Лекция № 4

4 Топливо и его химические реакции при сгорании

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

$$C + H + O_t = 1 \text{ кг.}$$

При сгорании топлива (полном) предполагается, что в результате реакции С, Н, с О воздуха образуется CO₂ и H₂O



При расчете исходных и конечных продуктов реакции в массовых и для Нкг /H₂/единицах получим:



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 α :

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

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 α :

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.

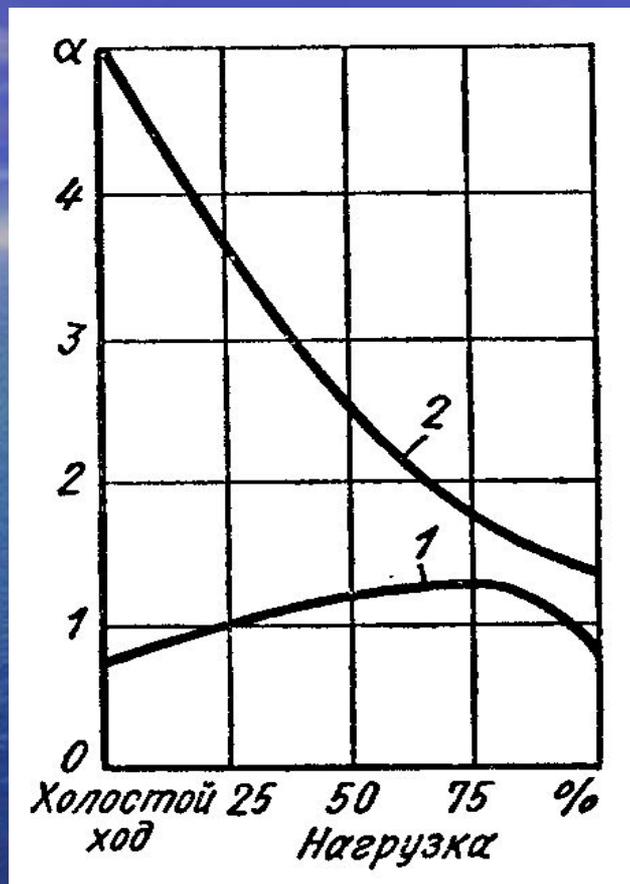


РИС. 4.1

1 – карбюраторный двигатель, 2 – дизель

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

α

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 μ_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
С	0,855	0,870			
Н	0,145	0,126			
O _T	-	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 β	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 μ_0 от α .

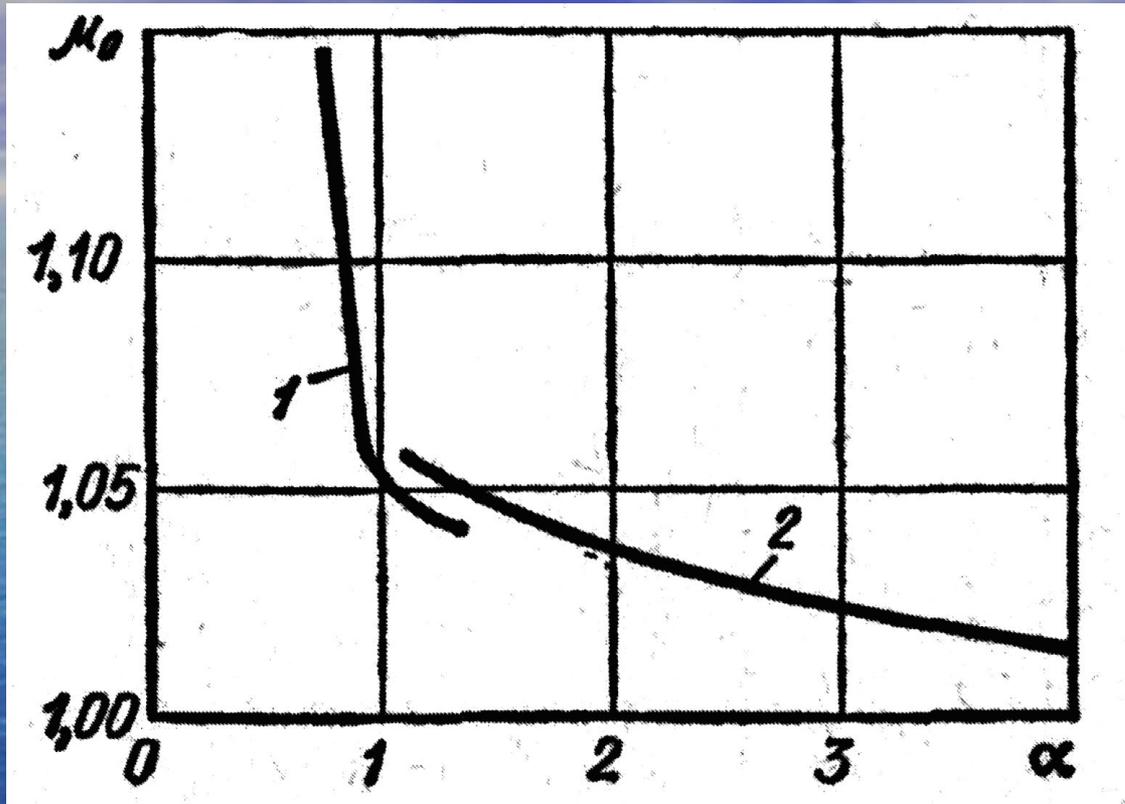


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента μ_0 от коэффициента α :
1 – бензин; 2 – дизельное топливо

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

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

Согласно опытам для бензинов, у которых $H/C = 0,17-0,19$, отношение κ , 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 λ 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

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

В отличие от полного сгорания в этом случае изменение объема ΔM 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 CO₂ изменения объема нет.

Принятая предпосылка о составе продуктов сгорания справедлива только при уменьшении α 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 α ?

4) Как отличается α 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 ?