

**Тема 2. Термодинамические
основы циклов двигателей
внутреннего сгорания**

Показатели эффективности циклов двигателей

Различают: *обратимый термодинамический цикл*
необратимый действительный цикл

Допущения принимаемые при рассмотрении термодинамического цикла:

1. Рабочее тело в цилиндре не меняется.
2. Теплота подводится извне в соответствии с выбранным характером его протекания.
3. Теплоемкость рабочего тела постоянна и не зависит от температуры.
4. Процессы сжатия и расширения протекают без теплообмена с внешней средой.

Термический КПД для обратимого термодинамического цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = \frac{l_u}{q_1}$$

q_1 - количество теплоты, подведенной за цикл, Дж/кг;

$|q_2|$ - абсолютное количество теплоты, отданной за цикл холодному источнику, Дж/кг;

l_u - работа, совершаемая 1 кг рабочего тела за цикл, Дж/кг.

 Термическим КПД цикла (двигателя) называют отношение работы обратимого термодинамического цикла к теплоте подведенной к рабочему телу от горячего источника.

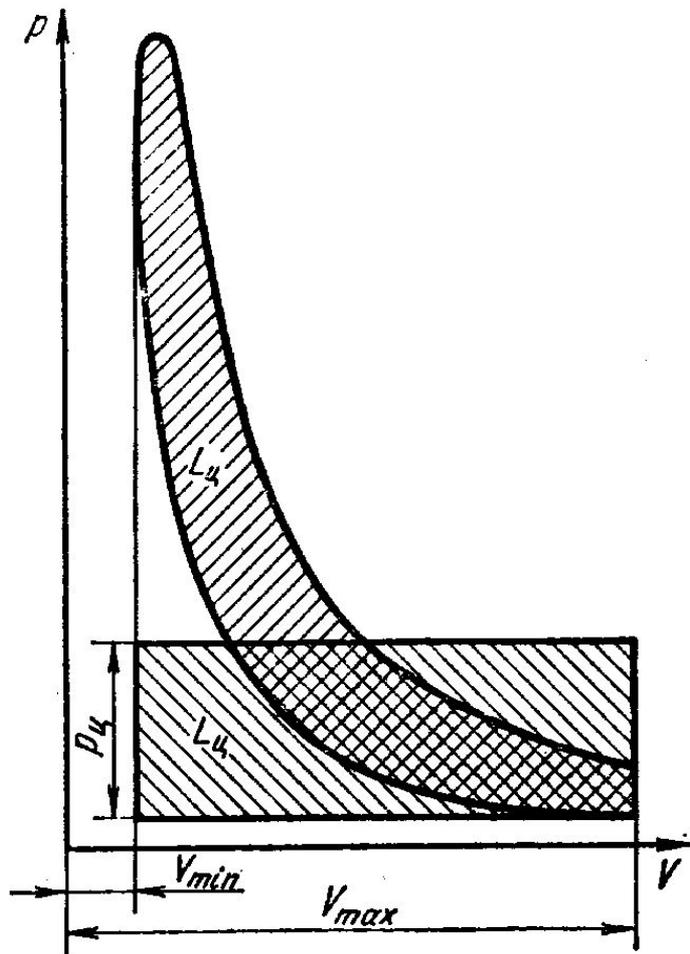
Среднее давление термодинамического цикла:

Работа замкнутого цикла:

$$L_{\text{ц}} = \oint p dV$$

Среднее давление за цикл:

$$p_{\text{ц}} = \frac{L_{\text{ц}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}$$



Цикл теплового двигателя в координатах $p - V$



Средним давлением (обратимого) цикла поршневого двигателя называют отношение работы цикла к рабочему объему цилиндра.

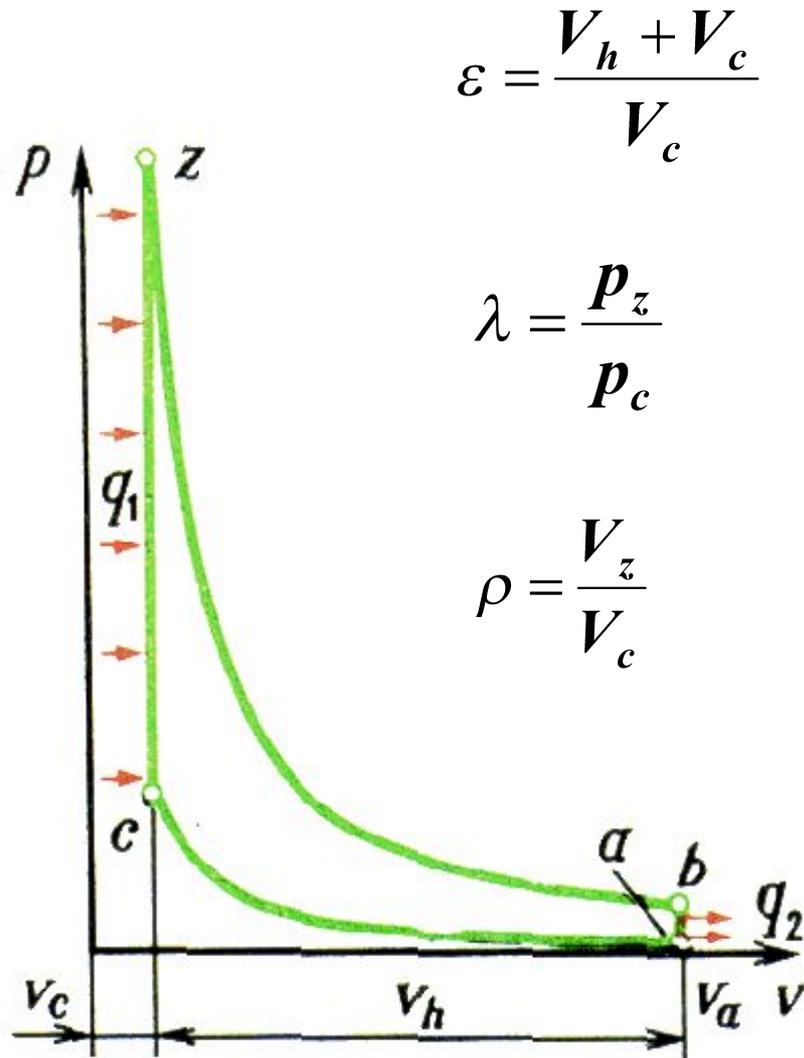
Отношение работы действительного цикла к рабочему объему цилиндра называют средним индикаторным давлением.

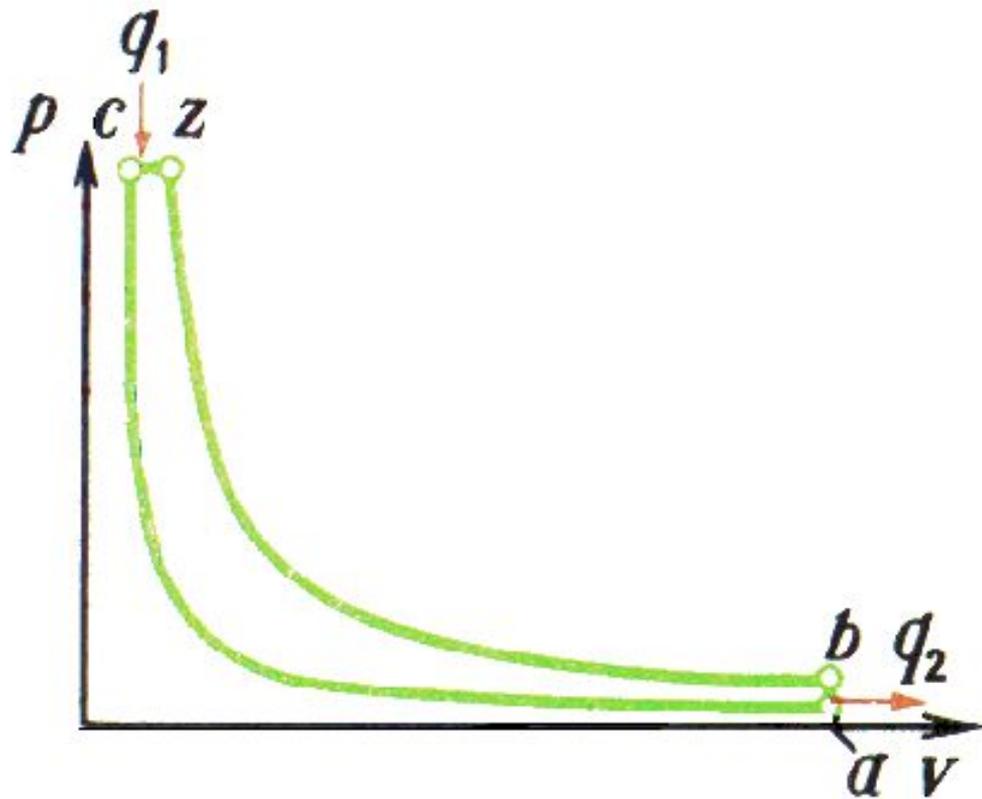
**Обратимый
термодинамический
цикл поршневого
двигателя с
принудительным
воспламенением при**

$V = const$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

$$P_u = \frac{P_a}{k-1} \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \eta_t (\lambda - 1)$$

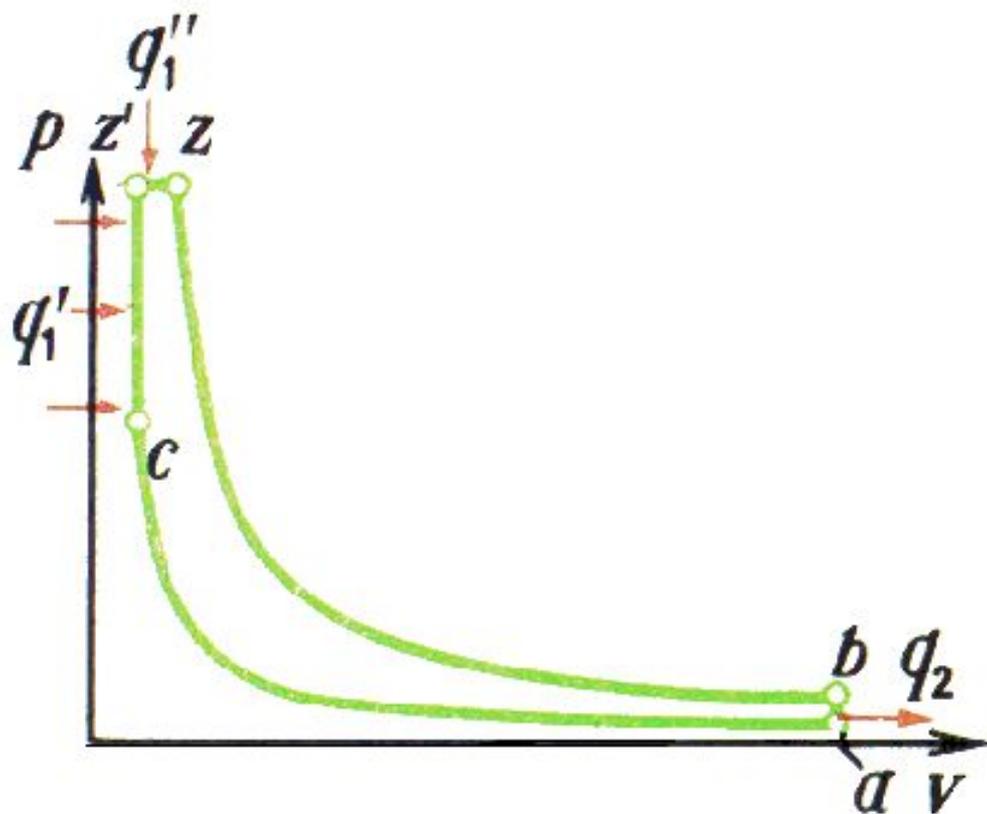




Обратимый
термодинамический
цикл поршневого
двигателя с
воспламенением от
сжатия при $p = const$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$$

$$p_u = \frac{p_a}{k-1} \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \eta_t k(\rho - 1)$$

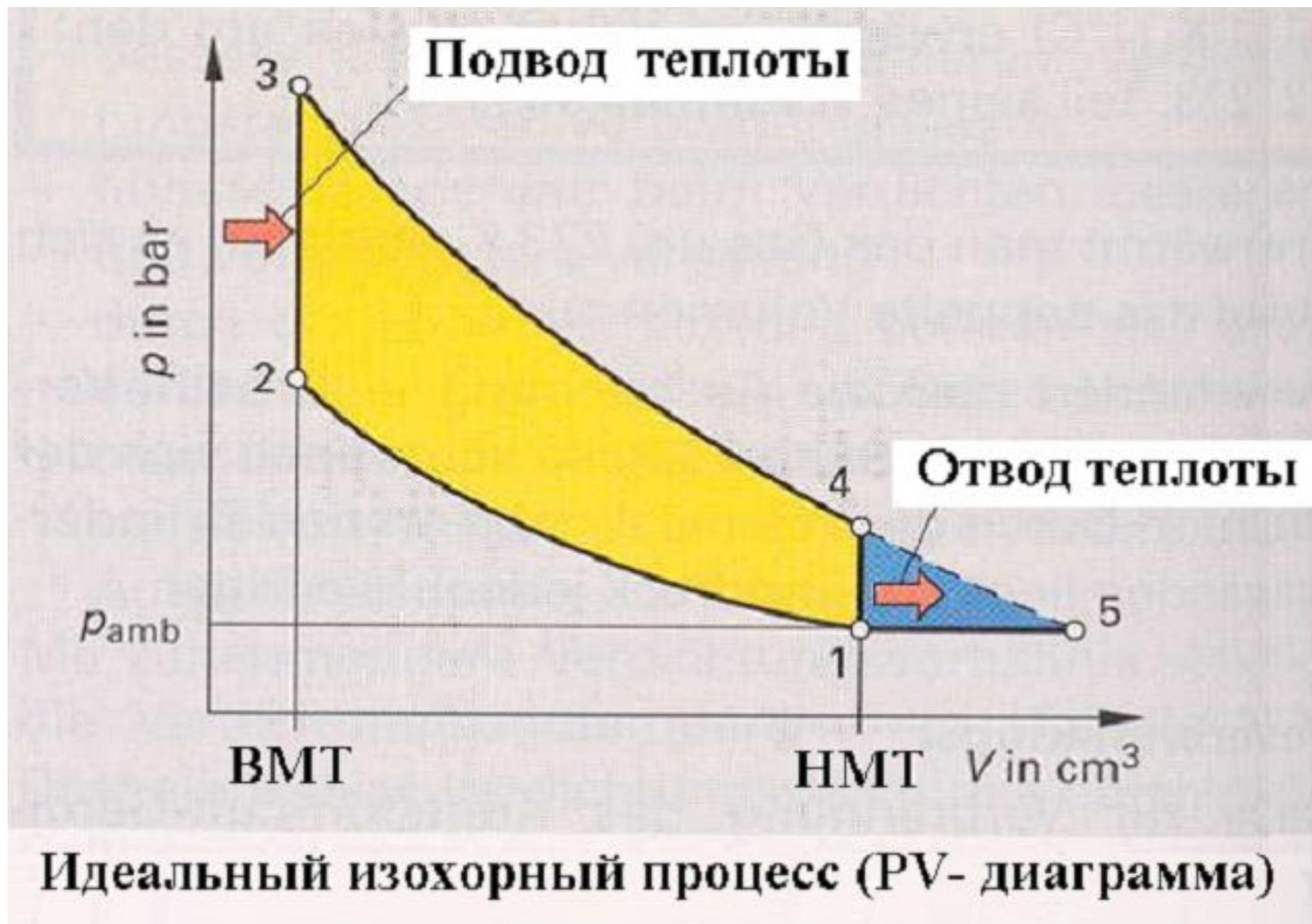


**Обратимый
термодинамический
цикл поршневого
двигателя со
смешанным
подводом теплоты**

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$$

$$P_u = \frac{P_a}{k-1} \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \eta_t [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]$$

Примеры циклов комбинированных двигателей



Тема 3. Топливо и химические реакции при его сгорании

Структура и состав топлива

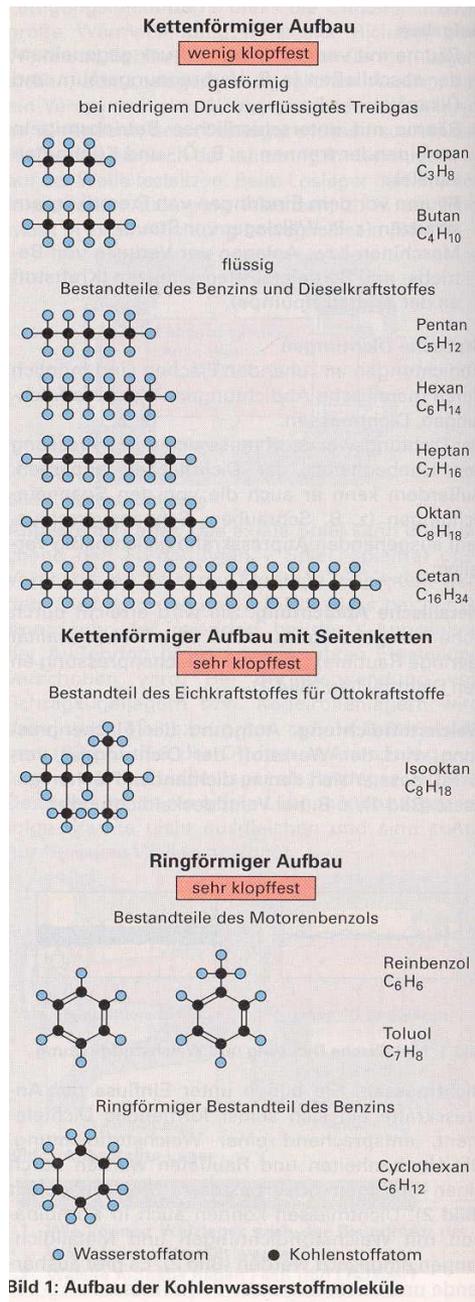


Bild 1: Aufbau der Kohlenwasserstoffmoleküle

Цепная структура молекул (с **малой склонностью к детонации**) газообразные

Пропан

Бутан

жидкие

Пентан

Гексан

Гептан

Октан

Сетан

Цепная структура молекул с боковыми ответвлениями (**высокая склонность к детонации**)

Изооктан

Кольцевая структура молекул (**высокая склонность к детонации**)

Чистый бензол

Толуол

Циклогексан

Элементарный состав топлива

жидкого:

$$C + H + O_T = 1 \text{ кг}$$

газообразно

$$\sum C_n H_m O_r + N_2 = 1$$

ГО:

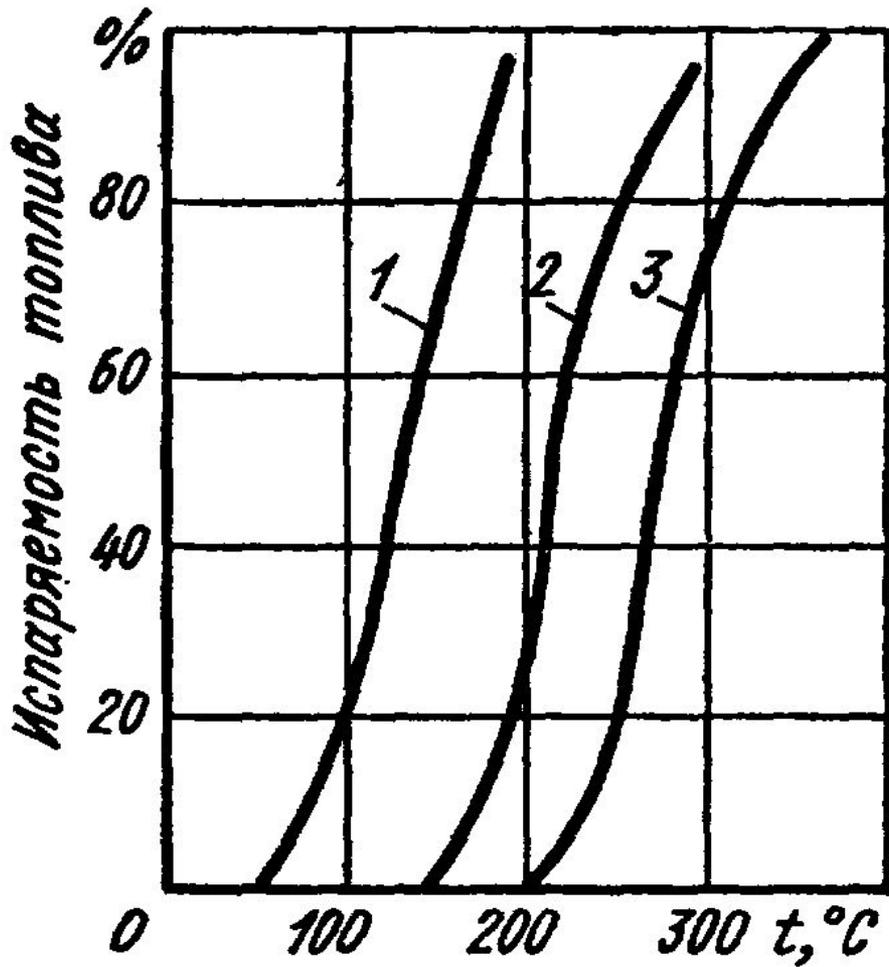
Таблица 1

Жидкое топливо	Содержание, кг		
	С	Н	О
Бензин	0,855	0,145	—
Дизельное топливо	0,870	0,126	0,004

Таблица 2

Газообразное топливо	Содержание, м ³ или моль								
	Метан CH ₄	Этан C ₂ H ₆	Пропан C ₃ H ₈	Бутан C ₄ H ₁₀	Тяжелые углеводороды C _n H _m	Водород H ₂	Оксид углерода CO	Углекислый газ CO ₂	Азот N ₂
Природный газ	90,0	2,96	0,17	0,55	0,42	0,28		0,47	5,15
Синтез-газ	52,0	—	—	—	3,4	9,0	11,0	—	24,6
Светильный газ	16,2	—	—	—	8,6	27,8	20,2	5,0	22,2

Испаряемость топлива



1 - бензин;

2 - керосин;

3 - дизельное топливо

Кривые фракционной
разгонки различных топлив

Марки и характеристики автомобильных бензинов по ГОСТ Р 51105-97

Показатель	Нормаль-80	Регуляр-91	Премиум-95	Супер-98
Плотность при 15 °С, кг/м ³	700-750	725-780	725-780	725-780
Детонационная стойкость:				
ОЧИ, не менее	80	91	95	98
ОЧМ, не менее	76	82,5	95	98
Содержание:				
свинца, г/дм ³ , не более	0,01	0,01	0,01	0,01
марганца, г/дм ³ , не более	50	18	-	-
фактических смол, мг/100 см ³ , не более	5	5	5	5
серы, % (мас.), не более	0,05	0,05	0,05	0,05
бензола, % (об.), не более	5	5	5	5
Индукционный период, мин, не менее	360	360	360	360
Испытание на медной пластинке	Выдерживает			
Цвет	Чистый, прозрачный			

Характеристики дизельного топлива (ГОСТ 305–82)

Показатели	Норма для марок		
	Л	З	А
Цетановое число, не менее	45	45	45
Фракционный состав:			
50 % перегоняется при температуре, °С, не выше	280	280	255
90 % перегоняется при температуре (конец перегонки), °С, не выше	360	340	330
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,0-6,0	1,8-5,0	1,5-4,0
Температура застывания, °С, не выше, для климатической зоны:			
умеренной	-10	-35	-
холодной	-	-45	-55
Температура помутнения, °С, не выше, для климатической зоны:			
умеренной	-5	-25	-
холодной	-	-35	-
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже:			
для тепловозных и судовых дизелей и газовых турбин	62	40	35
для дизелей общего назначения	40	35	30
Массовая доля серы, %, не более, в топливе:			
вида I	0,2	0,2	0,2
вида II	0,5	0,5	0,4
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	860	840	830

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right)$$

$$l_0 = \mu_a L_0,$$

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right),$$

$$L'_0 = \frac{1}{0,208} \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) C_n H_m O_r,$$

Пример расчета для бензина:

$$\begin{aligned} l_0 &= \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = \\ &= 14,957 \text{ кг возд/кг топл.} \end{aligned}$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = l/l_0 = L/L_0.$$



Под коэффициентом избытка воздуха понимают отношение действительного количества воздуха участвующего в сгорании к теоретически необходимому количеству воздуха

Коэффициент избытка воздуха при номинальной мощности

Карбюраторные двигатели	0,80 — 0,96
Двигатели с форкамерно-факельным зажиганием	0,85 — 0,98 и выше
Двигатели с искровым зажиганием и впрыском топлива	0,85 — 1,30
Дизели с неразделенными камерами и объемным смесеобразованием	1,50 — 1,70
Дизели с неразделенными камерами и пленочным смесеобразованием	1,50 — 1,60
Вихрекамерные дизели	1,30 — 1,45
Предкамерные дизели	1,40 — 1,50
Дизели с наддувом	1,30 — 2,2

Теплота сгорания топлива и топливовоздушных смесей

$$H_{см} = H_u / M_1,$$



Под теплотой сгорания топлива понимают то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании объемной или массовой единицы топлива

Теплота сгорания горючих смесей при Альфа=1

Топливо	$H_{см},$ кДж/кмоль	$H'_{см},$ кДж/м ³	Топливо	$H_{см},$ кДж/кмоль	$H'_{см},$ кДж/м ³
Бензин	83 860	3 739	Пропан	79 130	3 534
Керосин	83 900	3 747	Генераторный газ:		
Дизельное топливо	84 150	3 755	из дров	52 335	2 324
Этиловый спирт	81 180	3 626	из антрацита	58 010	2 587
Бутан	80 180	3 580	Природный газ	76 200	3 404

Показатели	Бензин (летний)		Дизельные топлива		Природ ный газ (метан CH ₄)	Сжиженный газ		Метанол CH ₃ O	Этано л C ₂ H ₆ O	Водород H ₂
	А-76	АИ- 93 (А-9 2)	Лет. Л	Зим. З		Пропан C ₃ H ₈	Бутан C ₄ H ₁₀			
Массовые доли элементов: углерода g _C водорода g _H кислорода g _O	0,86 0,14 -	0,87 0,13 -	0,87 0,13 -	0,869 0,131 -	0,75 0,25 -	0,818 0,182 -	0,828 0,172 -	0,375 0,125 0,5	0,522 0,13 0,348	- 1 -
Молярная масса μ _T , кг/кмоль	106	110	230	235	16	44	58	32	46	2
Плотность ρ при 20 °С, кг/м ³	784	755	836	820	0,66	502	578	791	810	0,082
Низшая теплота сгорания H _u , МДж/кг	44	43,4	42,8	43,03	50	46,35	45,75	19,6	26,9	120
Октановое число (исследователь- ский метод)	Не норм ир.	92	—	—	130	111,5	95	111	108	45...90
Цетановое число	—	—	Не менее 45		—	—	12 (расчет)	5 (расчет)	8(расч ет)	—
<i>l</i> ₀ , кг возд./кг топл. <i>L</i> ₀ , кмоль возд./ кмоль топл.	14,8 0,51	14,6 0,50	14,4 0,49	14,51 0,500	17,24 0,595	15,68 0,541	15,45 0,533	6,465 0,223	8,98 0,310	34,48 1,19
Пределы воспламенения: α _{min} α _{max}	1,5 5,9		0,6 6,5		5 15	2 11,4	1,7 10,3	5,5 26,0	3,5 15,0	4 75

Концентрационные пределы распространения пламени в смесях топлива с воздухом

Топливо	Концентрационные пределы			
	верхний		нижний	
	$r_T, \%$	α_{min}	$r_T, \%$	α_{max}
Водород	65,2	0,22	9,5	4,0
Окись углерода	70,9	0,17	15,5	2,3
Метан	11,9	0,78	6,5	1,5
Бензин	5,9	0,3	1,5	1,3
Этиловый спирт	13,7	0,4	4,0	1,7



Верхним концентрационным пределом называют объемное содержание топлива в смеси, при котором дальнейшее его увеличение делает смесь не горючей.

Нижним концентрационным пределом называют объемное содержание топлива в смеси, при котором дальнейшее его уменьшение также делает смесь не горючей.