**III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА**

Анисимов В. Ф.

Рябошапка В. Б.

*Винницький  
державний  
аграрний  
університет*

УДК 621.431.73.629

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА  
ВОЗДУХА НЕОБХОДИМОГО  
ДЛЯ ПОЛНОГО СГОРАНИЯ  
БИОТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНОМ  
ДВИГАТЕЛЕ**

*Розглянуті основні фази процесу горіння в дизелях при використанні дизельного палива та біопалива, кінетику розвитку об'ємної реакції швидкості згорання суміші, а також наведені розрахунки кількості повітря для повного згорання двох видів палив. Встановлено зміну відносних кількостей продуктів згорання в дизелі при використанні вищезгаданих палив.*

*Considered basic phases of burning process in diesels at the use of diesel fuel and biofuel, kinetics of development by volume reaction of combustion mixture speed, and also the calculations of air amount are resulted for complete combustion of two fuel types. The change of relative amounts of combustion products is set in a diesel at the use of aforementioned fuel.*

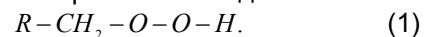
В дизелях с однокамерным смесеобразованием по сравнению с дизелями с двухкамерным смесеобразованием, процесс сгорания протекает менее интенсивно, что объясняется отсутствием предварительной завершённости процессов подготовки рабочей смеси определённого состава, ведущее к ухудшению качества горения не вполне перемешанной и неоднородной по своему агрегатному состоянию (гетерогенной) топливовоздушной смеси.

Поскольку скорость реакции сгорания зависит от концентрации реагирующих веществ (компонентов) то, если один из компонентов будет выходить за пределы стехиометрических соотношений, реакции будут затухать до полного их прекращения (рис. 1), так как  $\omega < \omega_k$  ( $\omega$  – скорость массового сгорания смеси,  $\omega_k$  – критическая скорость реакции, при которой скорость тепловыделения обеспечивает тепловой взрыв (самовоспламенение)).

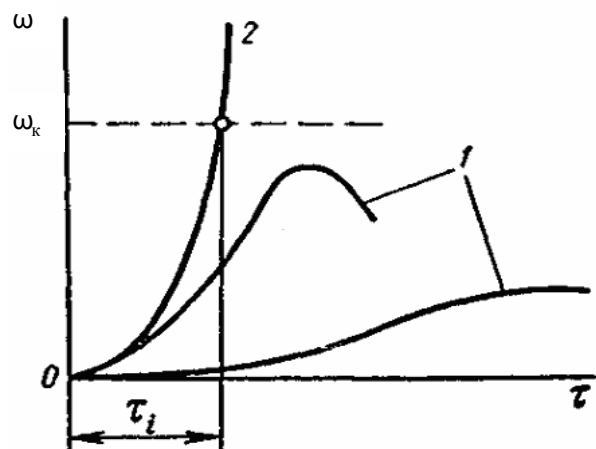
Характерным процессом химических реакций горючей смеси в дизелях является низкотемпературное воспламенение [1].

При низких температурах расщепление углеводородной молекулы исключается, поэтому образование свободных радикалов (активных центров) может быть получено в

процессе автоокисления с образованием эндотермических перекисных соединений.



Накопление подобных перекисей идет с нарастающей скоростью, достигая критической концентрации, при которой внутримолекулярные связи этих молекул разрушаются с образованием холодного пламени и, наконец, теплового взрыва.



**Рис. 1. Кинетические типы развития  
объемной реакции:  
1 – затухание; 2 – воспламенение**

Весь период сгорания в дизелях может быть разделен на 4 фазы (рис. 2).

Первая фаза сгорания (а – б) характеризуется задержкой воспламенения впрыснутого топлива. В течение этой фазы происходит химико-физическая подготовка той части топлива, которое за этот отрезок времени поступило в цилиндр. За время этой фазы в цилиндр поступает 30-40% топлива от всего количества за цикл. Давление и температура сжатых в камере сгорания газов, примерно равны 3,5 – 5,0 МПа и 600 – 700 °С. Температура самовоспламенения при давлении около 4 МПа близка 200 °С.

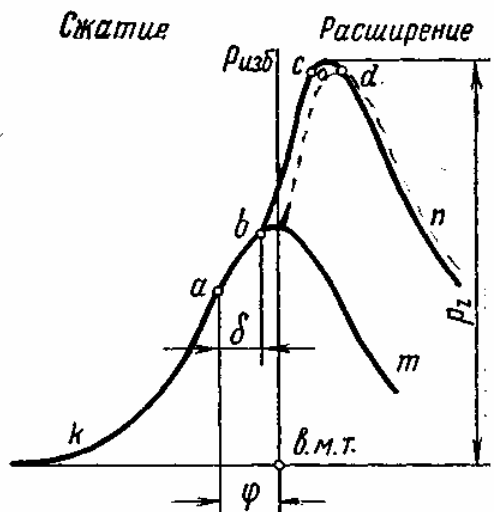
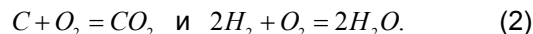


Рис. 2. Индикаторная диаграмма процесса сгорания в дизеле

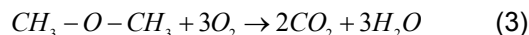
В дизелях с однокамерным смесеобразованием (рис. 3 а) тонкое распыливание топлива обеспечиваются за счет отверстий в соплах форсунок малого диаметра не превышающих 0,35 – 0,40 мм и увеличения давления впрыскивания до 30 – 50 МПа и более. Из-за отсутствия вихревого движения воздуха в такой камере, перемешивание топлива с воздухом недостаточно равномерно.

В дизелях с разделенными камерами сгорания (рис. 3 б) в вихревой камере создается интенсивное вихревое движение воздуха, что способствует более качественному перемешиванию топлива с воздухом при пониженных давлениях распыливания не более 30 МПа. Здесь можно применять более надежную штифтовую форсунку.

Жидкие топлива, применяемые в двигателях, состоят из различных углеводородных соединений или их производных, и полное сгорание их описывается стехиометрическими уравнениями химических реакций полного окисления углерода и водорода.



С химической точки зрения биотопливо представляет собой метиловый эфир  $CH_3 - O - CH_3$ , имеем



Как видно, что углеродно-водородное соединение дизельного топлива и биотоплива различается между собой числами атомов углерода и водорода, образующих молекулу, и ее строением. У однородных по структуре углеводородов с увеличением числа атомов в молекуле возрастают молекулярная масса, плотность, температура вспышки и др. (табл. 1).

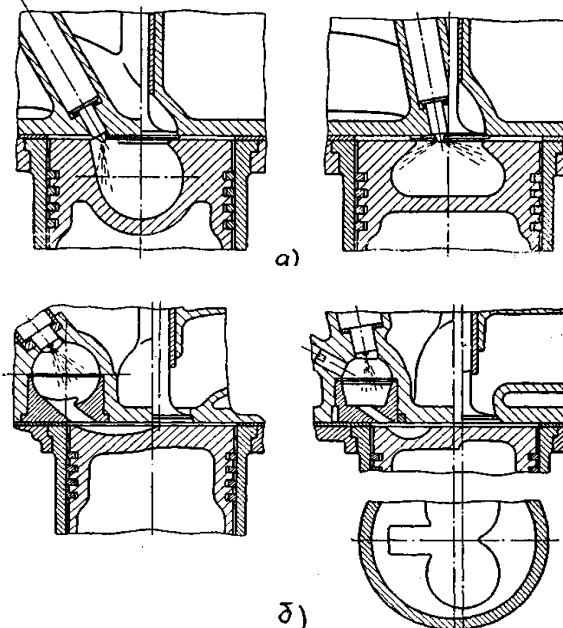
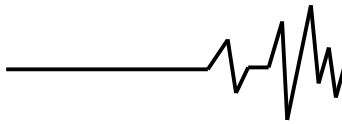


Рис. 3. Камеры сгорания:  
а) неразделенные камеры сгорания для пленочного смесеобразования;  
б) разделенные камеры сгорания (вихрекамерное смесеобразование)

Продолжительность фазы задержки воспламенения, равная  $0,002 \pm 0,006$  сек или  $10 \div 30^\circ$  угла поворота коленчатого вала (п.к.в.), зависит от: 1) температуры газов в конце сжатия; 2) физико-химических свойств топлива; 3) интенсивности теплопередачи от горячего воздуха к более холодному топливу; 4) соотношения топлива, кислорода и инертных газов в рабочей смеси.

Из таблицы 1 видно, что биотопливо по сравнению с дизельным топливом имеет большую по величине вязкость, плотность и температуру вспышки, а это значит, что продолжительность фазы задержки воспламенения, значительно больше, и может составить  $0,005 \pm 0,008$  сек ( $20 \div 40^\circ$ ) п.к.в. (рис. 2 – штриховая кривая).



С увеличением фазы задержки воспламенения возрастает не только продолжительность подачи топлива форсункой (из-за большей вязкости биотоплива), но и время теплового воздействия на уже впрыснутое и распыленное в цилиндре

топливо, что приводит к образованию несколько мощных очагов воспламенения смеси. Жесткость работы дизеля повышается, что оказывает отрицательное влияние на моторесурс двигателя, и незначительное снижение мощности.

Таблица 1

Физико-химические показатели дизельного топлива и биотоплива

| Показатель                        | Размерность        | Дизельное топливо | Биотопливо |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|------------|
| Плотность при °С                  | кг/м <sup>3</sup>  | 826÷850           | 877÷890    |
| Кинематическая вязкость при 20 °С | мм <sup>2</sup> /с | 3,8               | 8,0        |
| Температура вспышки               | °С                 | 60                | 100        |
| Температура застывания            | °С                 | -10               | -8         |
| Теплотворная способность          | КДж/кг             | 42,5              | 37,5       |
| Цетановое число                   |                    | 45-50             | 48-58      |
| Количество глицерина              | %                  | –                 | 0,3÷1,0    |

На уменьшения фазы задержки воспламенения оказывают существенное влияние неохлаждаемые вставки (вихревые камеры) вихрекамерных двигателей (рис. 3 б), где образуются мощные вихревые потоки воздуха для качественного смесеобразования топлива с воздухом.

Во второй фазе ( $b - c$ ) наблюдается весьма интенсивное тепловыделение и резкое возрастание давления.

В качестве критерия интенсивности сгорания за период второй фазы принимают мгновенное  $W$  и среднее  $W_{cp}$  значение скорости нарастания давления.

$$W = \frac{\Delta P}{\Delta \varphi} \text{ МПа/град. п.к.в.;} \quad (4)$$

$$W_{cp} = \left( \frac{\Delta P}{\Delta \varphi} \right)_{cp} = \frac{P_c - P_b}{\varphi_c - \varphi_b} \text{ МПа/град. п.к.в.} \quad (5)$$

По опытным данным [3] величина  $W_{cp}$ , характеризующая жесткость процесса сгорания, колеблется в пределах 0,5...1,0 МПа/град.п.к.в. для однокамерных дизелей и 0,3...0,5 МПа/град.п.к.в. для вихрекамерных дизелей.

Большие значения приращения давления соответствуют более длительной фазе задержки воспламенения  $\tau_i$ , а меньшие – более короткому  $\tau_i$ .

Скорость нарастания давления  $dP/d\varphi$  во второй фазе сгорания зависит от ряда

факторов и, в частности, от продолжительности фазы задержки воспламенения, интенсивности подачи топлива во время первой и второй фазе и равномерности распределения топлива по камере сгорания (качества смесеобразования).

В третьей фазе ( $c - d$ ) подача топлива обычно прекращается, сгорает основная масса рабочей смеси при почти постоянном давлении, выделяется наибольшее количество теплоты, (40...50% поданного за цикл). Температура в конце фазы достигает максимальной величины  $T_d = T_{max}$ .

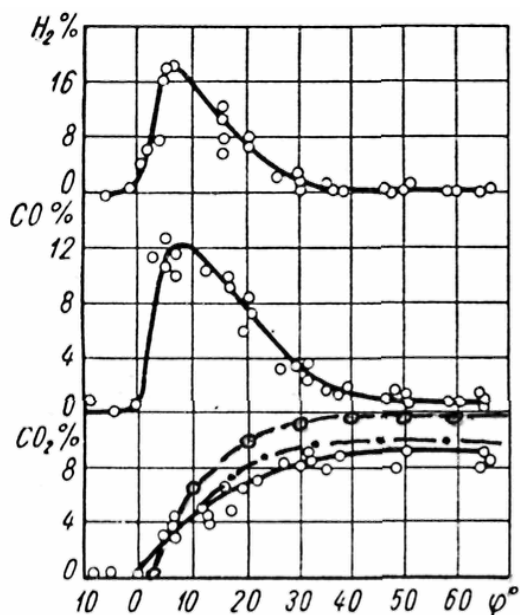
Четвертая фаза (фаза догорания) начинается с момента достижения в цилиндре максимальной температуры сгорания  $T_d$ . Большая длительность фазы догорания нежелательна, она может вызвать повышение температуры отработавших газов и потери тепла в систему охлаждения и увеличения теплонапряженности деталей.

Для уменьшения длительности четвертой фазы (рис. 4) необходимо усилить турбулентность воздействия и сократить подачу топлива в третьей фазе.

Для жидких топлив (в частности дизельного) дается элементарный весовой состав

$$C + H + S + O = 1 \text{ кг,} \quad (6)$$

где весовые доли условно выражены буквенными обозначениями соответствующих химических элементов.



**Рис. 4.** Изменение относительных количеств водорода  $H_2$ , окиси углерода  $CO$  и углекислого газа  $CO_2$  в процессе сгорания в дизеле

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг жидкого топлива определяется из стехиометрических соотношений уравнением [1]

$$M_o = \frac{1}{0,21} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \text{ кмоль/кг-топлива} \quad (7)$$

При известном химическом составе топлива теоретически необходимое количество воздуха можно определить на основании следующих соображений, используя выражение (1).

Сгорание углерода:  $C + O_2 = CO_2$ ;

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

$$1\text{кг}C + 8/3\text{кг}O_2 = 11/3\text{кг}CO_2.$$

Так как 1 кг дизельного топлива содержит не 1 кг С, а  $g_c$  кг С, то последнее уравнение примет вид

$$g_c\text{кг}C + 8/3g_c\text{кг}O_2 = 11/3g_c\text{кг}CO_2. \quad (8)$$

Сгорание водорода:  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

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

$$1\text{кг}H_2 + 8\text{кг}O_2 = 9\text{кг}H_2O;$$

$$g_n\text{кг}H_2 + 8g_n\text{кг}O_2 = 9g_n\text{кг}H_2O \quad (9)$$

Сгорание серы:  $S + O_2 = SO_2$ ;

$$32\text{кг}S + 32\text{кг}O_2 = 64\text{кг}SO_2;$$

$$1\text{кг}S + 1\text{кг}O_2 = 2\text{кг}SO_2;$$

$$g_s\text{кг}S + g_s\text{кг}O_2 = 2g_s\text{кг}SO_2 \quad (10)$$

Складывая полученные уравнения, имеем:

$$\begin{aligned} & (g_c\text{кг}C + g_n\text{кг}H_2 + g_s\text{кг}S) + \left( \frac{8}{3}g_c + 8g_n + g_s \right) \text{кг}O_2 = \\ & = \frac{11}{3}g_c\text{кг}CO_2 + 9g_n\text{кг}H_2O + 2g_s\text{кг}SO_2. \end{aligned} \quad (11)$$

где  $(g_c\text{кг}C + g_n\text{кг}H_2)$  – составляют 1 кг топлива;

$$\left( \frac{8}{3}g_c + 8g_n \right) \text{кг}O_2 \quad - \quad \text{количество}$$

необходимого кислорода;

$$\left( \frac{11}{3}g_c\text{кг}CO_2 + 9g_n\text{кг}H_2O + 2g_s\text{кг}SO_2 \right) \quad -$$

соответственно количество отработавших газов  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $SO_2$ .

Если учесть, что в топливе имеется кислород в растворенном виде  $g_o$  кг то выражение (11) примет вид:

$$\begin{aligned} & (g_c\text{кг}C + g_n\text{кг}H_2 + g_s\text{кг}S + g_o\text{кг}O_2) + \\ & + \left( \frac{8}{3}g_c + 8g_n + g_s - g_o \right) \text{кг}O_2 = \frac{11}{3}g_c\text{кг}CO_2 + \\ & + 9g_n\text{кг}H_2O + 2g_s\text{кг}SO_2 \end{aligned}$$

Отсюда теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг дизельного топлива определяется по формуле

$$l_o = \frac{\frac{8}{3}g_c + 8g_n + g_s - g_o}{0,23}; \quad (12)$$

где  $g_c = 84,7\%$ ;  $g_n = 13,3\%$ ;  $g_s = 1\%$ ;  $g_o = 1\%$ .

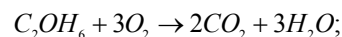
$$l_o = \frac{\frac{8}{3} \cdot 0,847 + 8 \cdot 0,133 + 0,01 - 0,01}{0,23} = 14,48 \approx 15; \text{кг.}$$

или в кмольях (с формулы 7)

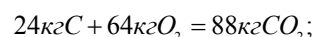
$$\begin{aligned} L_o &= \frac{\frac{g_c}{12} + \frac{g_n}{4} + \frac{g_s}{32} - \frac{g_o}{32}}{0,21} = \\ &= \frac{0,847}{12} + \frac{0,133}{4} + \frac{0,01}{32} - \frac{0,01}{32} \approx 0,5 \text{ кмоль}; \end{aligned}$$

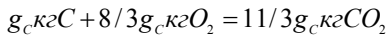
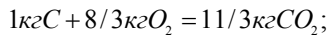
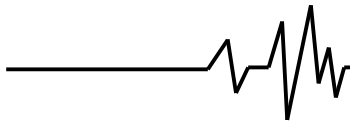
Изменения относительных количеств водорода  $H_2$ , окиси углерода  $CO$  и углекислого газа  $CO_2$  в процессе сгорания дизельного топлива в двигателе приведено на рис. 4 [2]. Как видно, что после окончания третьей фазы процесс окисления еще продолжается. Поэтому нужно учитывать четвертую фазу догорания, топлива.

Сгорание биотоплива:  $CH_3 - O - CH_3$ ;

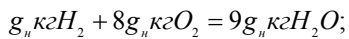
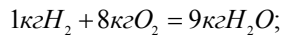
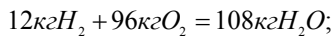


Сгорание углерода:  $C_2 + 2O_2 = 2CO_2$





Сгорание водорода:  $2H_2 + 3O_2 = 6H_2O;$



где  $g_c = 77,5\%$ ;  $g_n = 12,5\%$ ;  $g_o = 10\%$ .

$$l_o = \frac{\frac{8}{3}g_c + 8g_n - g_o}{0,23}; \quad (13)$$

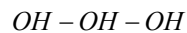
$$l_o = \frac{\frac{8}{3} \cdot 0,775 + 8 \cdot 0,125 - 0,1}{0,23} = 12,91 \text{ кг}$$

Таким образом, для полного сгорания 1 кг метилового эфира  $CH_3-O-CH_3$ ; требуется  $l_o = 12,91$  кг воздуха.

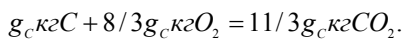
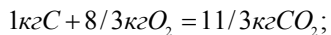
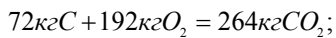
Однако, в состав биотоплива входит также и глицерин 0,3 – 1% для горения которого требуется дополнительный воздух.



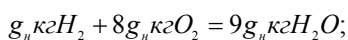
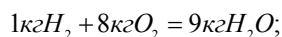
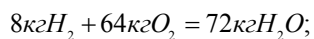
Горение глицерина:  $\begin{matrix} | & | & | \\ OH - & OH - & OH \end{matrix}$  ;



Горение углерода:  $2C_2 + 6O_2 = 6CO_2$



Сгорание водорода:  $H_2 + 2O_2 = 4H_2O;$



$$l_o = \frac{\frac{8}{3}g_c + 8g_n - g_o}{0,23}.$$

Таким образом, для сгорания 1 кг глицерина необходимо 13 кг воздуха, а так как содержание глицерина в биотопливе составляет всего лишь 0,3-1,0%, то дополнительного количества воздуха для полного сгорания биотоплива необходимо всего лишь  $0,04 \div 0,13$  кг, а всего –  $13,04 \div 13,13$ , т.е. количества воздуха, поступающего в цилиндр двигателя достаточно для полного сгорания биотоплива. Дымный же выхлоп отработанных газов и закоксовывание цилиндропоршневой группы можно объяснить большим количеством образования  $CO_2$  при сгорании биотоплива:  $2CO_2$  выделяет биотопливо (3) и  $6CO_2$  выделяет глицерин (14). На рис.4 приведены результаты

экспериментальных исследований для дизельного топлива (сплошные линии), проведенные по методике [2] и биотоплива (штриховые линии).

Как видно, что выделение количества  $H_2$  и  $CO$  при сгорании дизельного топлива и биотоплива примерно одинаковые, а  $CO_2$  биотопливо выделяет больше на 2,5...3,0% при однокамерном смесеобразовании (штриховая линия), а при вихрекамерном всего лишь на 0,5...0,7% (штрих-пунктирная линия).

После поворота коленчатого вала примерно на  $30^\circ$  после В.М.Т., т.е. после окончания третьего периода процесса горения, процесс окисления еще продолжается и чем длительнее продолжительность этой фазы, тем больше потерь теплоты в систему охлаждения, а значит и мощности двигателя.

### Выводы

1. Теоретические исследования процесса сгорания, показывают, что для наиболее оптимального его протекания необходимо стремится: уменьшать фазы задержки воспламенения и догорания, повышать качество смесеобразования, что обусловит оптимальную скорость нарастания давления во второй фазе, прекращать подачу топлива в третьей фазе.

2. Поскольку для полного сгорания одного килограмма биотоплива необходимо около 13-ти кг воздуха, по сравнению с дизельным топливом, для сгорания одного килограмма которого необходимо около 15-ти кг воздуха, то переход дизеля на биотопливо без изменения его конструкции и регулировок, приведет к увеличению коэффициента избытка воздуха.

3. Исследования изменений количества продуктов сгорания у отработанных газов показали, что выделение  $H_2$  и  $CO$  при сгорании дизельного топлива и биотоплива примерно одинаковые, а  $CO_2$  биотопливо выделяет больше на 2,5...3,0% при однокамерном смесеобразовании, а при вихрекамерном всего лишь на 0,5...0,7%.

### Литература

1. Дьяченко Н.Х., Костин А.К., Пугачев Б.П. и др. Теория двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Машиностроение, 1974.- 552с.

2. Ленин И.М., Касперов А.В., Малашкин О.М. и др. Автомобильные и тракторные двигатели. – М.: Высшая школа, 1976, 2.1. – 368с.

3. Николаенко А.В. теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. – М.: Колос, 1984. – 336с.