

1. Физико-химические процессы подготовки сгорания топлива.

Сгорание топлива в дизелях представляет собой процесс окисления молекул углеводородного топлива кислородом воздуха с выделением теплоты. **Химическим** процессам окисления топлива предшествуют **физические: прогрев капель топлива от воздуха в камере сгорания и их испарение**. Вследствие малых размеров капель распыленного топлива в факеле (средний диаметр капель $d_k = 20-40$ мкм) и высокой температуры воздуха в камере сгорания (более 500°C), эти процессы для каждой образующейся при впрыске капли топлива составляют очень короткий временной интервал (менее 1 мс). Установлено, что процессу самовоспламенения топлива предшествуют также подготовительные **химические** процессы - **распад молекул и образование промежуточных продуктов предпламенного окисления**. Физико-химическая подготовка топлива к сгоранию приводит к запаздыванию начала выделения тепла в цилиндре относительно начала подачи топлива форсункой.

2. НВС. Период задержки воспламенения.

На рисунке 3.6 показана индикаторная диаграмма судового среднеоборотного дизеля ($n = 720$ об/мин) в координатах р-φ. Здесь же показаны моменты начала и конца подачи топлива форсункой. Момент резкого возрастания давления в конце процесса сжатия, отмеченный на рисунке точкой НВС, принято называть началом видимого сгорания топлива. Этот момент соответствует началу интенсивного выделения тепла вследствие начала сгорания топлива. Угловой промежуток от начала подачи топлива форсункой до момента НВС, обозначенный на рис. 3.6 φ_i , составляет отмеченное выше запаздывание самовоспламенения топлива, поэтому его называют **периодом задержки самовоспламенения топлива**. Так как $\varphi_i = 6\pi\tau_i$, то задержка самовоспламенения по времени определяется формулой

$$\tau_i = \frac{\varphi_i}{6n} \quad (1)$$

Для судовых дизелей значения τ_i составляют 2-15 мс.

Период задержки самовоспламенения короче для тех топлив, которые термически менее устойчивы. Склонность к распаду и к образованию легко воспламеняющихся смесей зависит от структуры молекул углеводородов, составляющих топливо.

3. Период задержки самовоспламенения и состав топлива.

Топлива нефтяного происхождения представляют собой смесь большого числа углеводородов. С точки зрения способности к самовоспламенению в условиях дизеля их можно разделить на две группы: 1 - углеводороды, имеющие **цепную** структуру молекул (парафины); 2 - углеводороды с **кольцеобразной** структурой соединения атомов углерода в молекуле (ароматики). Структуры простейших

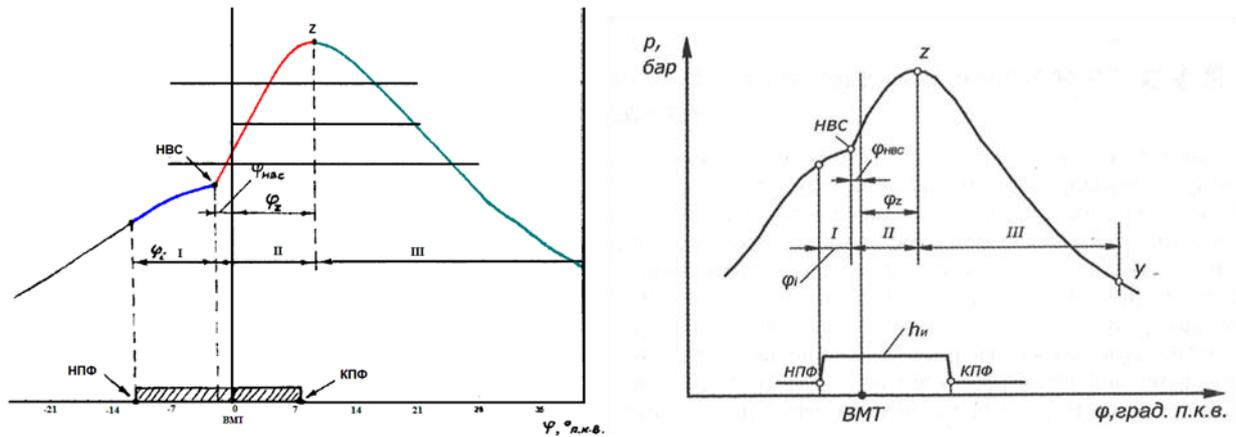


Рис. 1. Фазы процесса сгорания топлива:

НПФ, КПФ – начало и конец подачи топлива форсункой; НВС – начало видимого сгорания топлива; I – задержка самовоспламенения; II – быстрое сгорание топлива; III – диффузионное сгорание и догорание молекул углеводородов представлены на рис. 1.

Углеводороды первой группы обладают наименее прочной связью углеродных атомов, поэтому легко самовоспламеняются в дизеле. Ароматические углеводороды (2 группа) отличаются большой прочностью молекулы, поэтому их способность к самовоспламенению мала.

4. Цетановое число.

Оценка способности топлив к самовоспламенению в дизеле осуществляется по его цетановому числу (в дальнейшем - ЦЧ), смысл которого заключается в следующем. Если взять в разных пропорциях два чистых углеводорода первой и второй групп и провести испытание на двигателе их различных смесей, то период задержки самовоспламенения будет тем больше, чем больше в смеси ароматиков.

В качестве эталона наилучшей воспламеняемости принят углеводород **цетан** ($C_{16}H_{32}$) ему присвоено ЦЧ=100; в качестве эталона наихудшей воспламеняемости принят ароматический углеводород **α -метилнафталин** ($C_{10}H_7CH_3$), для которого ЦЧ=0.

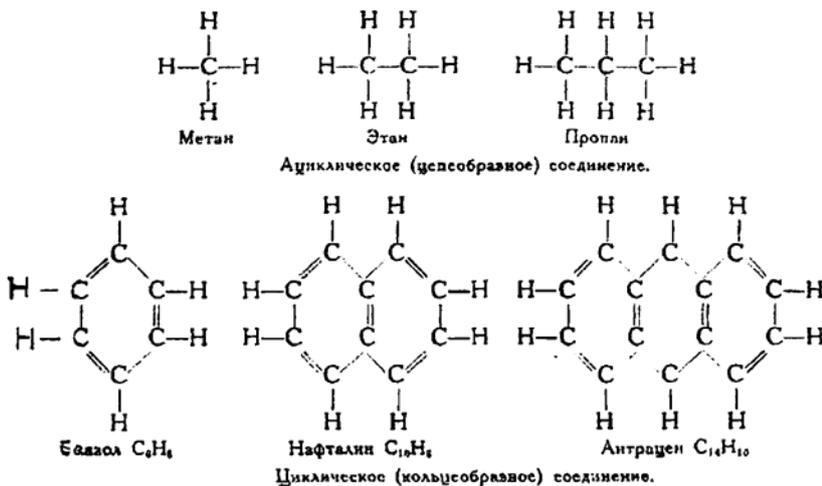


Рис. 2. Структуры молекул углеводорода

Цетановое число смеси этих двух углеводородов определяется долей цетана в смеси. Очевидно, чем больше цетановое число топлива, тем оно лучше воспламеняется в дизеле и наоборот. Цетановые числа легких маловязких дизельных топлив определяются на специальной лабораторной дизельной установке (ИТ9-3Д) путем сравнения их воспламеняемости с эталонными смесями цетана и α -метилнафталина.

Значения ЦЧ дизельных топлив составляют 50-60. Способность к самовоспламенению у тяжелых высоковязких топлив (мазатов) ниже (их ЦЧ = 30-

35) из-за большого содержания в них ароматических углеводородов. Для этих топлив оценка ЦЧ проводится косвенными методами, так как из-за их высокой вязкости лабораторная установка не может использоваться.

5. Первая фаза – период задержки самовоспламенения.

Период задержки самовоспламенения принято считать **первой фазой процесса сгорания** топлива. В обобщенном виде зависимость задержки самовоспламенения топлива в дизеле можно выразить следующим образом:

$$\varphi_i = f(p, T, ЦЧ, n) \quad (2)$$

где p , T - давление и температура воздуха в камере сгорания в момент начала подачи топлива форсункой.

Экспериментально установлено, что φ_i нелинейно зависит от давления, температуры и ЦЧ. Увеличение давления, температуры и ЦЧ приводит к сокращению φ_i и наоборот. С частотой вращения φ_i связан прямо пропорционально, поэтому повышение оборотов двигателя приводит к его возрастанию.

На величину φ_i влияют и другие факторы, например, конструкция и температура стенок камеры сгорания, движение воздушного заряда и др. Этим объясняется различие величин φ_i в двигателях различного конструктивного исполнения даже при одинаковых значениях параметров p , T , ЦЧ, и n . В зависимости от сочетания перечисленных факторов период задержки самовоспламенения в судовых дизелях составляет:

МОД - $3 \div 6^\circ$ п.к.в.;

СОД - $5 \div 15^\circ$ п.к.в.

В высокооборотных дизелях φ_i может достигать 20 и более град. п.к.в.

6. Вторая фаза процесса сгорания

Вторая фаза процесса сгорания - фаза быстрого сгорания топлива - начинается в точке НВС и завершается в момент достижения максимального давления газов в цилиндре (точка z на рис. 1). К началу сгорания в цилиндр подана часть цикловой подачи топлива $g_{ци}$, которая зависит от величины φ_i (при однофазном впрыске связь между ними примерно пропорциональная). Большая часть $g_{ци}$ к моменту самовоспламенения подготовлена к сгоранию: испарилась, пары топлива, смешались с воздухом, в топливовоздушной смеси образовались химически активные части молекул - радикалы.

Экспериментальные исследования показали, что первые очаги пламени возникают в тех зонах факела распыленного топлива, где концентрация паров топлива в воздухе близка к **стехиометрической** (т.е. локальный коэффициент избытка воздуха близок к единице). Поскольку таких зон в каждом факеле много и число факелов равно числу отверстий в распылителе форсунки, то самовоспламенение топлива в дизеле носит многоочаговый характер.

Сгорание подготовленной топливовоздушной смеси протекает по законам химической кинетики с очень высокой скоростью, намного превышающей скорость физических процессов подготовки топлива к сгоранию в факеле: испарения капель и взаимодиффузии паров топлива и воздуха. Поэтому горючая смесь, подготовленная за период задержки самовоспламенения, выгорает в течение $10-20^\circ$ п.к.в., определяя продолжительность фазы быстрого сгорания топлива.

Интенсивность сгорания во второй фазе оценивают **средней скоростью нарастания давления при сгорании** — w_{cp} , которая определяется как отношение приращения давления от момента НВС до точки z к продолжительности второй фазы в °п.к.в., а также **степенью повышения давления газов в цилиндре** $\lambda = p_z/p_c$, которые называют показателями динамичности рабочего цикла. Величину w_{cp} определяют по индикаторной диаграмме (см. рис. 1)

$$w_{cp} = \frac{\Delta p}{\Delta \varphi} = \frac{p_z - p_{нвс}}{\varphi_z + \varphi_{нвс}} \quad (1)$$

Величина w_{cp} показывает, на сколько бар повышается давление при повороте коленчатого вала на 1 градус в среднем за фазу быстрого сгорания. Чем ее величина больше, тем «жестче» процесс сгорания.

Для МОД $w_{cp} = 2-3$ бар/°п.к.в.; для СОД $w_{cp} = 3 - 4$ бар/°п.к.в. и для ВОД = 6 - 8 бар/°п.к.в. При больших значениях w_{cp} работа двигателя становится жесткой, появляются стуки в цилиндре, увеличивается износ деталей.

Очевидно, что динамические показатели связаны с величиной φ_i : чем он больше, тем больше будет $g_{ги}$, тем большая доля цикловой подачи сгорит во второй фазе, тем выше будут значения λ и w_{cp} , и наоборот.

7. Третья фаза процесса сгорания

Третья фаза процесса сгорания длится от момента достижения p_z в цилиндре до полного выгорания топлива. В отличие от точек НВС и z , момент окончания сгорания топлива по индикаторной диаграмме определить невозможно. Расчетными методами с использованием экспериментальных диаграмм установлено, что в судовых МОД и СОД продолжительность третьей фазы составляет 30—40° п.к.в. Подача топлива, как правило, в начале третьей фазы процесса сгорания еще продолжается, в камере сгорания располагаются горящие топливные факелы, достигшие своего максимального размера.

На рисунке 3 показан кадр, снятый скоростной кинокамерой на исследовательском четырехтактном высокооборотном дизеле, показывающий горящие топливные факелы в конце процесса впрыска топлива. Фотография факела, расположенного справа, обработана прибором, который по яркости пламени определяет его температуру.



Рис. 3. Структура и температурные зоны горящего топливного факела
1 — $t = 2900^\circ\text{C}$; 2 — $t = 2700^\circ\text{C}$; 3 — $t = 2500^\circ\text{C}$; 4 — $t = 2300^\circ\text{C}$

Значительная часть воздушного заряда в силу неравномерного распределения топлива по объему камеры сгорания и малого времени, отводимого на смесеобразование и сгорание, не участвует в сгорании. Температура воздуха вне топливных факелов существенно ниже (порядка $800-1000^\circ\text{C}$), чем в зонах горения. Таким образом, в реальном рабочем процессе дизеля имеет место высокая степень неоднородности концентраций топливовоздушной смеси и температур по камере сгорания. В связи с этим температура газов и коэффициент избытка воздуха,

используемые при расчете рабочих процессов дизелей (в отличие от давления газов), являются условными параметрами, усредненными по камере сгорания.

Характер сгорания капель топлива, не успевших сгореть к началу третьей фазы процесса, а также поступивших в камеру сгорания в процессе продолжающегося впрыска, существенно отличается от сгорания во второй фазе. Так как в горящем факеле очень высокие температуры - в среднем по факелу 2500-2700°C (см. рис. 3), то процессы прогрева и воспламенения паров многократно сокращаются. Скорость сгорания топлива лимитируется физическими процессами: испарением капли и взаимодиффузией паров топлива и воздуха вокруг капли. Принято считать, что сгорание топлива в 3 фазе определяется процессами турбулентной диффузии. В связи с сокращением содержания воздуха в факеле и медленным его притоком в зону горения диффузионное сгорание к концу фазы переходит в догорание топлива с низкими скоростями.

Сокращению процесса догорания топлива способствует организованное (вихревое) движение воздушного заряда в камере сгорания. Продолжительность 3-й фазы также зависит от продолжительности впрыскивания топлива форсункой $\varphi_{впр} = \varphi_{нпф} + \varphi_{кпф}$. Сокращение $\varphi_{впр}$ приводит к сокращению длительности 3 фазы и в целом процесса сгорания топлива и наоборот.