

СВОЙСТВА МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

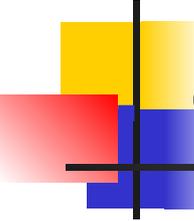


Автомобильные бензины



- В полезную (механическую) работу превращается до 42 % химической энергии топлива. Остальная часть в виде тепловой энергии расходуется на нагрев деталей двигателя, охлаждающей жидкости, на преодоление трения, привод вспомогательных механизмов двигателя, значительная доля уносится в виде теплоты с отработавшими газами, имеется неполное сгорание топлива и т.п.
- Нарушения регулировки приборов питания или несовершенство конструкции двигателя приводят к отклонению от нормального процесса сгорания топлива, что сопровождается значительным снижением мощности ДВС и его ресурса.

Сгорание топлива



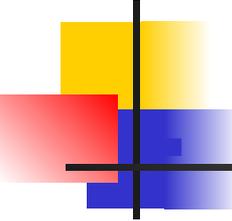
Сгорание топливовоздушной смеси - периодический циклический процесс быстрых физико-химических превращений (предпламенные превращения, воспламенение, распространение пламени), обусловленных взаимодействием углеводородов топлива с кислородом воздуха, сопровождающихся выделением существенного количества тепла и излучением света.

- **Нормальное сгорание** - воспламенение свежих частей топливовоздушной смеси и перемещение фронта пламени в камере сгорания являются следствием передачи тепла посредством теплопроводности и лучеиспускания.
- **Эффективность сгорания** топливовоздушной смеси обусловлена физико-химическими свойствами топлива

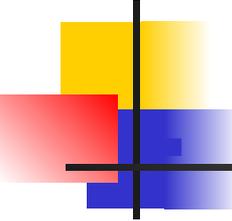
Классификация свойств

- всю совокупность свойств топлив, определяющих их качество, можно разделить на три группы: **физико-химические, эксплуатационные и технические**
- *К первой группе* относят свойства, характеризующие состав топлива и его состояние (элементный, фракционный и групповой углеводородный составы, давление паров, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, теплоёмкость, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость и др.).

Классификация свойств

- 
- ***Вторую группу*** объединяют свойства топлива, обеспечивающие надёжность и экономичность работы двигателей внутреннего сгорания (прокачиваемость, испаряемость, воспламеняемость и горючесть, склонность к образованию отложений, коррозионная агрессивность и совместимость с неметаллическими материалами, противоизносные и охлаждающие свойства).
 - Эти свойства характеризуют полезный эффект от использования топлива по назначению и определяют область его применения

Классификация свойств

- 
- ***Третью группу*** составляют свойства топлив, которые не связаны с их применением, а проявляются в процессе хранения и транспортирования.
 - Эта группа разделяется на две подгруппы: свойства, характеризующие сохранность качества топлива в процессе его транспортирования и хранения (химическая и физическая стабильность, биологическая стойкость) и свойства, обеспечивающие безопасность транспортирования, хранения и использования топлив (токсичность, пожароопасность и склонность к электризации).

Свойства бензина при транспортировке и хранении

- **Химическая стабильность** – способность топлива (углеводородов, неуглеводородных примесей и присадок) противостоять окисляющему воздействию кислорода воздуха, **физическая стабильность** характеризует склонность топлива к потерям от испарения и расслаиванию, гигроскопичность, загрязнённость и т.д., **биологическая стойкость** – это защищённость топлива от воздействия плесени, грибков и бактерий.
- **Токсичность** - степень вредности топлива для потребителя и окружающей среды, влияние качества топлива на состав отработанных газов двигателя и т.п., **пожароопасность** объединяет пределы воспламеняемости смеси паров топлива с воздухом, температуры вспышки, самовоспламенения и т.д.

Энергетический потенциал бензина

Полнота и скорость сгорания бензина зависят от соотношения количества бензина и воздуха, определяемого коэффициентом избытка воздуха. Не любая смесь паров бензина с воздухом может воспламеняться и сгорать.

- Количество воздуха в горючей смеси, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг бензина, называют ***стехиометрическим***. Для бензина оно составляет 14,8 кг.
- Отношение действительного количества воздуха к стехиометрическому называют ***коэффициентом избытка воздуха***.

Энергетический потенциал бензина

Различают *нижний* и *верхний пределы воспламеняемости* топливовоздушных смесей.

- Нижний предел определяется недостатком топлива в воздухе, т.е. таким состоянием смеси, при котором продолжение обеднения делает её невоспламеняемой. При этом коэффициент избытка воздуха $a = 1,35 - 1,4$ (т.е. $a > 1$).
- За верхний предел воспламеняемости бензиновоздушной смеси принимают такое содержание топлива в воздухе, при котором дальнейшее обогащение смеси делает её невоспламеняемой. Обычно при этом величина $a = 0,45...0,5$ (т.е. $a < 1$).
- Если величина $a < 1$, то смесь называют **богатой**, если $a > 1$, то **бедной**. В случае уменьшения a происходит обогащение, а при увеличении a - обеднение смеси. Если $a = 1$, то смесь называют **нормальной рабочей смесью** (она содержит теоретически необходимое количество воздуха).

Энергетический потенциал бензина

На практике работают на слегка обедненной топливовоздушной смеси ($\alpha = 1,05 - 1,15$). Это позволяет работать в наиболее экономичном режиме. Когда требуется за малое время развить большую мощность двигателя (режимы форсированной работы) используют переобогащенную топливовоздушную смесь ($\alpha = 0,9 - 0,95$). При этом воздуха для полного сгорания топлива не хватает, из-за неполноты сгорания бензин расходуется неэкономно, увеличиваются вредные выбросы в атмосферу.

- Устойчивая работа двигателя внутреннего сгорания на различных режимах возможна при более широком диапазоне воспламеняемости. Стремятся увеличить нижний предел воспламеняемости, позволяющий работать на обедненной горючей смеси. Регулирование процесса горения топлива осуществляют **модификаторами горения** - присадками для активизации горения, повышения экономичности двигателя.

Энергетический потенциал бензина

Теплота сгорания топлива?

- Для углеводородов теплота сгорания обусловлена соотношением С:Н. С увеличением этого соотношения уменьшается теплота сгорания. Например, при увеличении С:Н с 7 до 13 теплота сгорания топлива снижается примерно в 1,1 раза
- ***Высшая теплота сгорания топлива?***
- ***Низшая теплота сгорания топлива?***
- Примерная формула бензина $C_{7.2}H_{12.6}$

Энергетический потенциал бензина

Теплоту сгорания горючей смеси, поступающей в камеру сгорания двигателя, находят по формуле

$$Q_{\text{тс}} = Q_{\text{н}} / (1 + \alpha L_0).$$

- где L_0 – стехиометрическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива.
- Эта формула справедлива лишь при $\alpha \geq 1$, поскольку при $\alpha < 1$ часть топлива не сгорает и его теплота сгорания не реализуется. Чем выше теплота сгорания топлива, тем больше требуется воздуха для его сжигания.
- Перспективно использование, водорода или внедрение добавок - веществ с более высокой теплотой сгорания

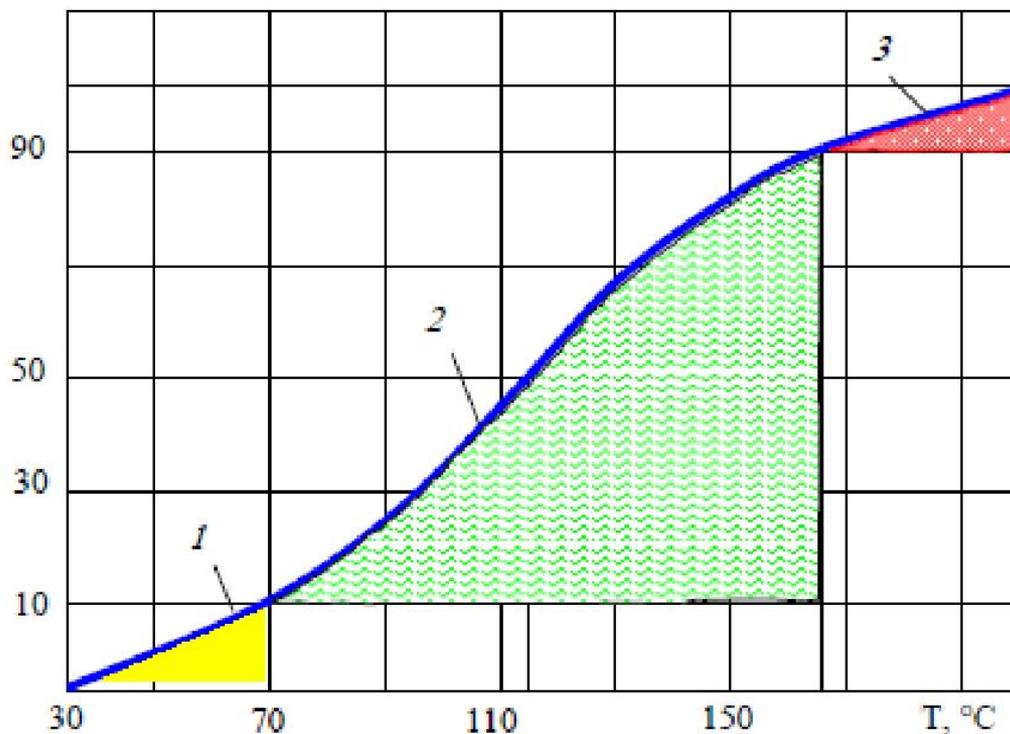
Испаряемость бензина

Испаряемость, обуславливает:

- скорость и полноту перехода бензина из жидкого в парообразное состояние;
- условия смесеобразования и состав смеси во впускной системе двигателя;
- склонность к образованию паровых пробок;
- полноту сгорания бензина и степень разжижения моторного масла бензиновыми фракциями. Испаряемость оценивается фракционным составом, давлением насыщенных паров и зависимостью соотношения пар-жидкость от температуры.
- Поэтому испаряемость бензина зависит от его **молекулярной массы**, которая связана с **плотностью** и **средней температурой разгонки** топлива.

Фракционный состав

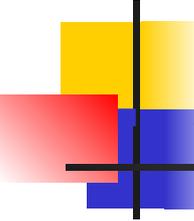
Объем, %



Основные фракции автомобильного бензина:

1 – пусковая; 2 – рабочая; 3 – хвостовая (тяжелая)

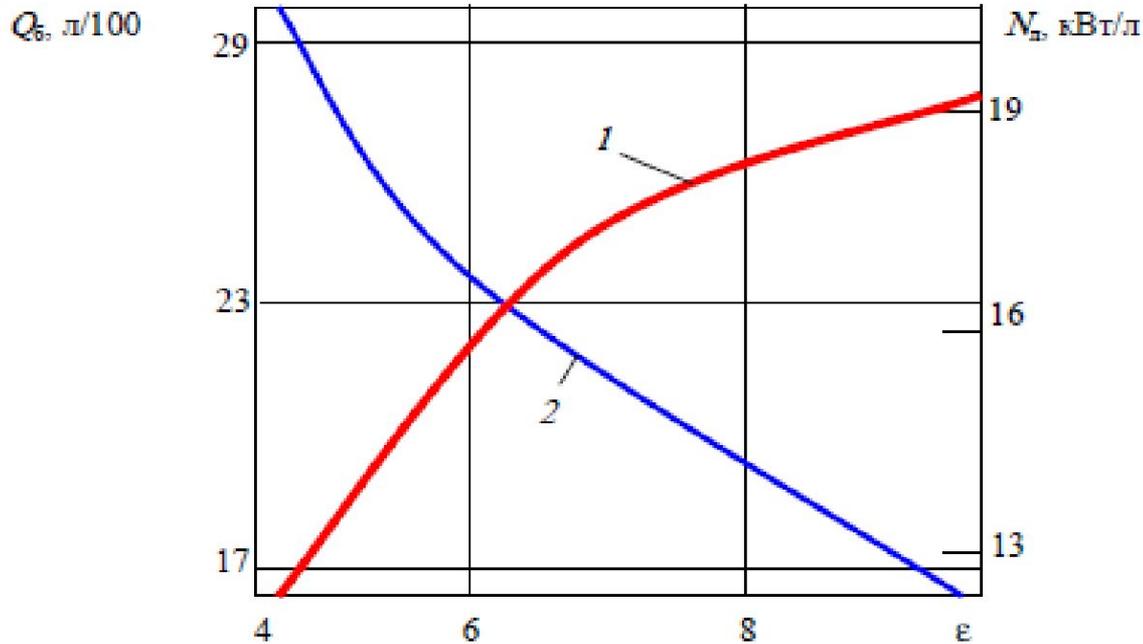
Фракционный состав



Пусковая фракция – от начала кипения до выкипания 10 % объема бензина. Она определяют температуру окружающего воздуха, при которой возможен запуск непрогретого двигателя.

- $T_{min} = 0,5T_{10} \% - 50,5$.
- **Рабочая фракция** - от 10 до 90 % объема топлива.
- **Концевая (или хвостовая) фракция** – 90 % - $T_{кк}$, характеризующие полноту испарения бензина в двигателе. Высококипящие углеводороды во впускной системе двигателя не испаряются, в капельно-жидком состоянии поступают в камеру сгорания, где часть их испаряется и сгорает, а другая часть уходит с выхлопными газами, и стекает по стенкам цилиндра, смывая с них смазочную пленку.

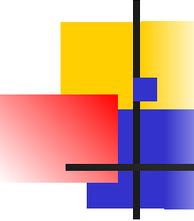
Детонационная стойкость



Влияние степени сжатия на литровую мощность двигателя (1) и расход топлива (2)

степень сжатия ϵ - отношение полного объема цилиндра двигателя, когда поршень находится в нижней мертвой точке, к объему пространства сжатия, когда поршень находится в верхней мертвой точке.

Октановое число



Моторный метод имитирует работу двигателя на форсированных режимах при достаточно больших и длительных нагрузках с повышенной тепловой напряжённостью.

- ***Исследовательский метод*** - режим работы легкового автотранспорта в условиях города.

Методы расчета плотности

Плотность дистиллятных фракций :

$$\rho_4^{20} = (\rho_4^{20}) \cdot (0,58 + 0,12 \sqrt[3]{x_{cp}})$$

- где x_{cp} – отгон от нефти (включая компоненты C_1 - C_5) до средней температуры кипения, % (масс.).
- Для пересчета плотности нефтяных фракций и нефтепродуктов с одной температуры на другую пользуются уравнением (по ГОСТ 3900-47):

$$\rho_t = \rho_4^{20} - \gamma(t - 20) \quad \gamma = 0,001828 - 0,00132\rho_4^{20}$$

$$\gamma = 5,6 \cdot 10^{-4} \left(\rho_4^{20} + \frac{100}{t_{кип}} \right) (\rho_4^{20})^{-1,68}$$

- где $t_{кип}$ – средняя температура кипения, °С

Методы расчета ММ

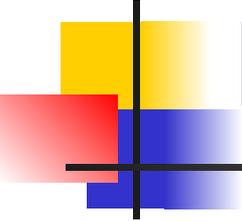
Молекулярная масса нефтяных фракций определяется по уравнениям Воинова:

$$M = 60 + 0,3t_{\text{кип}} + 0,001t_{\text{кип}}^2 \quad M = (7K - 21,5) + (0,76 - 0,04K)t_{\text{кип}} + (0,0003K - 0,00245)t_{\text{кип}}^2$$
$$K = 0,8\rho_{15}^{15}$$

- где $t_{\text{кип}}$ - среднемолярная температура кипения, С;
- К - характеризующий фактор.
- Уравнение, обеспечивающее высокую точность расчета (для нефтепродуктов выкипающих от 77 до 449 С):

$$\lg M = 1,9914 + 0,00194t_{\text{кип}} + \lg(n_D^{20} - \rho_4^{20})$$

- где $t_{\text{кип}}$ - температура кипения углеводорода (или для нефтяных фракций средняя температура кипения), С;
- n_D^{20} - показатель преломления.



Расчет ОЧ для смесей

- На физико-химических свойствах смеси
- На фракционном и групповом составе
- На цетановом числе
- На учете межмолекулярного взаимодействия

Расчет ОЧ по составу и свойствам

Для определения **ОЧ (ММ)** прямоугонных бензинов фракции н.к.-200С: $ОЧ = -140 + 246,9\rho_4^{20}$

- Для бензинов с ОЧ больше 62:

$$ОЧ = 1020,7 - 64,84 \left[4 \left(\frac{\lg 141,5}{\rho_{15}^{15}} - 131,5 \right) + 2 \lg \left(\frac{9}{5} t_{10\%} + 32 \right) + 1,31 \lg \left(\frac{9}{5} t_{90\%} + 32 \right) \right]$$

- Для бензинов прямой гонки, термического крекинга, термического риформинга у которых $t_{a.т.} < t_{10\%} < 2t_{a.т.}$ (где а.т. – анилиновая точка, °С) предложены уравнения:

- $ОЧ = 100 - \rho_4^{20} \frac{(t_{к.к.} + t_{a.м.})}{\delta t_{к.к.}} \cdot \frac{1}{\alpha^{ГОСТ}} + \delta - \alpha^{ГОСТ}$

Расчет ОЧ по составу и свойствам

Где δ - коэффициент испаряемости бензинов,

$$\delta = \frac{t_{10\%} + t_{50\%} + t_{90\%}}{100}$$

- α - наклон кривой разгонки бензина,

$$\alpha^{\text{ГОСТ}} = t_{90\%} - t_{10\%} / 80$$

- Последнее уравнение справедливо при
- $t_{\text{к.к.}} / t_{10\%} \alpha^{\text{ГОСТ}} > 1,9$;
- если это условие не выполняется, то можно воспользоваться уравнением:

$$ОЧ = \left[100 \frac{(t_{\text{к.к.}} + t_{\text{а.м.}}) t_{\text{к.к.}}}{10 P \rho_4^{20} \delta \sqrt{t_{\text{к.к.}}}} \right] \left(\rho_4^{20} + \rho_4^{20} \alpha^{\text{ГОСТ}} + \frac{t_{\text{к.к.}}}{10 P} + \rho_4^{20} \delta \alpha^{\text{ГОСТ}} \right).$$

Расчет ОЧ по составу и свойствам

ОЧ ИМ:

- где T_{cp} – средняя температура перегонки бензина;

$$ОЧ = 120 - 2 \frac{T_{cp} - 58}{5\rho}; \quad T_{cp} = \frac{T_{нк} + T_{кк}}{2},$$

- $T_{нк}$ – температура начала перегонки бензина; $T_{кк}$ – температура конца перегонки бензина, °С;
- ρ – плотность бензина при 20 °С, г/см³.
- По групповому составу:

$$RON(NMR) = A (\%H_{ar}) / (\%H_{al}) + B$$

with $A = 2.453$ and $B = 41.71$.

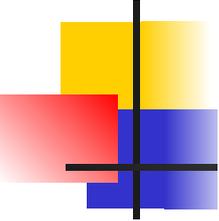
Расчет ОЧ по составу

По групповому составу (для смесей с ОЧ ИМ \geq 82):

$$\text{RON(NMR)} = A + B (\%H_{ar}) + C (\%H_{ol})$$

with $A = 83.14$, $B = 0.48$ and $C = 1.02$.

- По групповому или индивидуальному составу:
- $\text{МОЧ} = -406.14 + 508.04 \cdot (\text{H/C}) - 173.55 \cdot (\text{H/C})^2 + 20.17 \cdot (\text{H/C})^3$
- Здесь: H/C – усреднённое отношение количества атомов водорода и углерода в молекулах смеси
- По составу и правилам аддитивности:
- Где


$$ON_{mix} = \sum_{i=1}^n ON_i \cdot C_i + B,$$

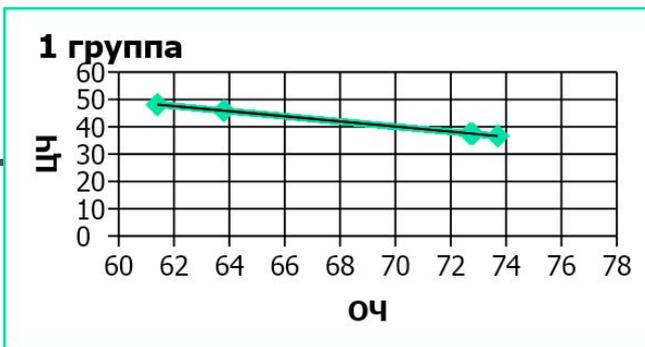
$$B = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n B_i B_j C_i C_j / 100,$$

$$B_i = \alpha D_i / D_{max}^{\beta}.$$

Где C_i -концентрация i -го потока или компонента, отн. ед.,
 B_i, B_j - величины, характеризующие тенденцию молекул i, j
к межмолекулярному взаимодействию, α, β – величины,
характеризующие интенсивность межмолекулярного взаимодействия в
зависимости от дипольного момента D . D_{max} – максимальный дипольный
момент углеводородных молекул.

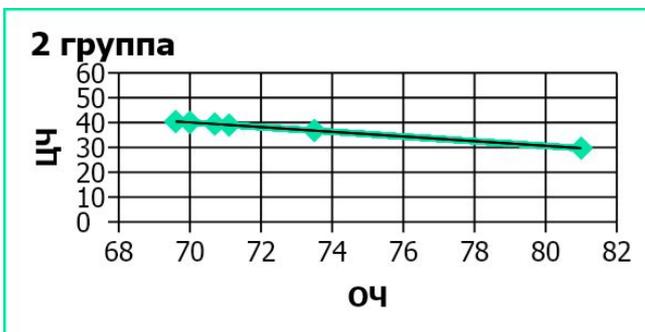
3) Основанные на корреляции октанового и цетанового чисел

Октановое число (ММ)	Цетановое число
Группа 1	
61,4	48,1
72,7	37,5
73,7	36,6
72,8	37,4
63,8	45,9



$$\text{ОЧ} = (105,9 - \text{ЦЧ}) / 0,94 \quad (6)$$

Октановое число (ММ)	Цетановое число
Группа 2	
71,1	39
69,6	40,4
73,5	36,8
70	40,1

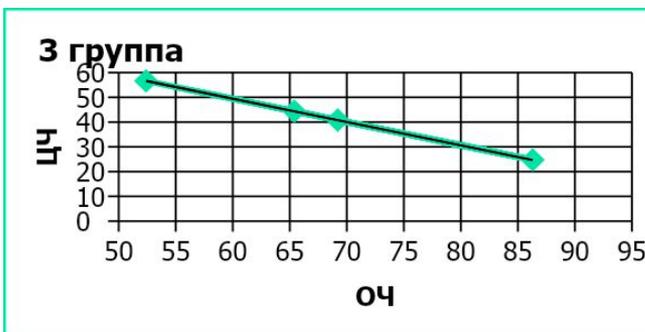


Расчет цетанового числа:

- По групповому составу

$$\text{ЦЧ} = 0,85 * \text{П} + 0,1 * \text{Н} - 0,2 * \text{А} \quad (7)$$

Октановое число (ММ)	Цетановое число
Группа 3	
65,4	44,4
86,3	24,7
69,2	40,8
52,4	56,6



- По анилиновой точке

$$\text{ЦЧ} = T_a - 15,5 \quad (8)$$

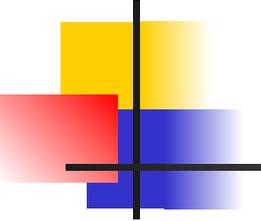
Дизельные топлива



Основные требования

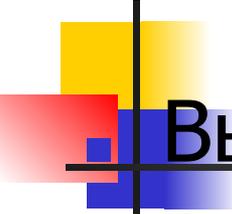
Требования	Определяющие свойства	Результат
Хорошая воспламеняемость и достаточно полное сгорание	Фракционный состав и цетановое число	Мягкая работа и легкий пуск двигателя, высокие мощностные и экономические показатели, допустимые дымность и токсичность отработавших

Основные требования

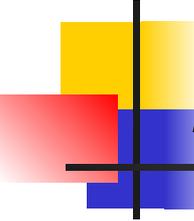


Требования	Определяющие свойства	Результат
Хорошее смесеобразование и распыл	Вязкость и плотность, содержание механических примесей и воды	Хорошая фильтруемость, нормальная подача топлива, дальнобойность факела и конус распыла
Бесперебойная работа топливного насоса высокого давления при отрицательных температурах окружающей среды	Низкотемпературные свойства	—
Безопасность при эксплуатации и хранении	Температура вспышки, стабильность	—
Минимальное нагарообразование, отложения, коррозия деталей и узлов двигателя	Химический состав и степени очистки – наличие сернистых соединений, металлов	Нормальное состояние клапанов, колец, поршней, форсунок

Горение ДТ

- 
- Выделяют четыре фазы процесса сгорания топлива в цилиндре дизеля:
- I – фаза задержки (запаздывания) самовоспламенения,
 - II – фаза быстрого горения (интенсивного нарастания давления),
 - III – фаза замедленного горения,
 - IV – фаза догорания

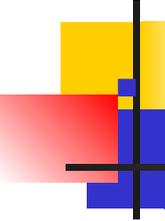
Горение ДТ



I фаза. После впрыска в камеру сгорания топливо воспламеняется не сразу, а через определенное время, характеризующее так называемой задержкой самовоспламенения. В этой фазе топливо распыляется, нагревается, испаряется и перемешивается.

- **II фаза** – фазы быстрого горения и резкого увеличения средней скорости нарастания давления dp/dj . По величине dp/dj принято судить о характере работы двигателя: если эта величина не превышает 0,5...0,7 МПа на 1° поворота коленчатого вала, то двигатель работает мягко, а если превышает (0,8 МПа и более) – то жёстко.
- Если в дизельном топливе имеется большое количество быстро окисляющихся углеводородов, то оно легко самовоспламеняется и двигатель работает мягко. Такие же углеводороды в бензине вызывают детонацию карбюраторных двигателей.

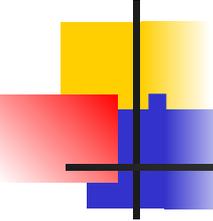
Горение ДТ



III фаза – замедленное горение продолжается до конца подачи топлива в камеру сгорания. В этой фазе выделяется до 25 % энергии топлива, снижаются температура и давление. При этом закончена цикловая подача топлива, а продукты сгорания топлива расширяются.

- **IV фаза** – фаза догорания, протекающего во время такта расширения при пониженном давлении. Увеличение продолжительности этой фазы обуславливает повышение температуры отработавших газов, дымность выпуска и снижение КПД двигателя.

Эксплуатационные свойства ДТ



Процесс горения дизельного топлива определяется двумя основными параметрами – **цетановым числом** (определяющим мощностные и экономические показатели двигателя) и **фракционным составом** (определяющим полноту сгорания топлива, дымность и токсичность отработанных газов).

- **Цетановое число** является условной единицей измерения самовоспламеняемости топлива.
- **Температура самовоспламенения** дизельного топлива – это наименьшая температура частиц распылённого в воздухе топлива в конце такта сжатия, чтобы произошло их воспламенение без постороннего источника огня.

Эксплуатационные свойства ДТ

- **Температура вспышки ДТ** - температура, при которой пары топлива, залитого в закрытый тигель, вспыхивают при поднесении пламени.
- Испаряемость топлив характеризуется их **фракционным составом**.
- За рубежом для характеристики воспламеняемости, испаряемости и пусковых свойств дизельного топлива применяется понятие **«дизельный индекс»**, определяемый расчётным путем или по номограмме. Значение ДИ обуславливает пусковые характеристики топлива, особенно при низких температурах.

$$ДИ = \frac{(1,8T_a + 32)(141,5 - 131,5\rho^{15})}{100\rho^{15}} 114$$

T_a – температура анилиновой точки

Расчет цетанового числа

Цетановое число дизельного топлива численно равно процентному (по объёму) содержанию цетана в смеси из цетана и α -метилнафталина и по характеру сгорания (самовоспламенения) равноценна испытываемому топливу. Самовоспламеняемость (ЦЧ) цетана принята за 100ед., α -метилнафталина – за 0.

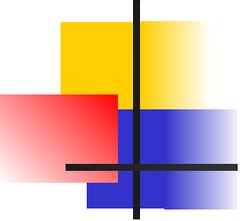
- При отсутствии стандартизованных моторных установок ЦЧ определяют расчётными методами.

$$\text{ЦЧ} = T_a - 15,5,$$

$$\text{ЦЧ} = 0,85 \cdot П + 0,1 \cdot Н - 0,2 \cdot А$$

- П, Н, А – содержание в топливе соответственно парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов, % мас.

Расчет цетанового числа

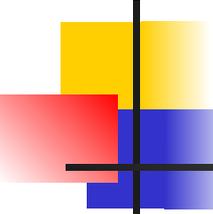

$$\text{ЦЧ} = 256,18 - 0,445T_a - 10,44\sqrt{T_c} - \frac{2,605\rho}{2\sqrt[3]{T_c}}$$

где $T_c = T_{10\%} + 0,53T_{50\%} + 0,17T_{90\%}$.

Цетановые числа дизельных топлив по данным разных авторов рекомендуется определять в зависимости от плотности фракций по уравнениям:

Фракции, °С	Вариант 1	Вариант 2
150-350	$\text{ЦЧ} = 263 - 254 \rho_4^{20}$	$\text{ЦЧ} = 52 - 324 \rho_4^{20} - 0,83)$
200-350	$\text{ЦЧ} = 305,2 - 297,5 \rho_4^{20}$	$\text{ЦЧ} = 51,4 - 378 \rho_4^{20} - 0,85)$
240-350	$\text{ЦЧ} = 368,3 - 367,4 \rho_4^{20}$	

Цетановое число



В соответствии с ГОСТ 305–82 дизельное топливо для быстроходных двигателей выпускается с цетановым числом 40...45 единиц.

- Использование топлива с низким цетановым числом (менее 40 ед.) приводит к увеличению периода задержки самовоспламенения и возникновению жёсткой работы, а применение топлива с цетановым числом выше 50 ед. нецелесообразно вследствие возрастания удельного расхода топлива из-за снижения полноты его сгорания.
- Летом применяют топлива с ЦЧ=40, а зимой для обеспечения холодного пуска двигателя – с ЦЧ \geq 45.

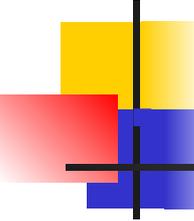
Расчет температуры вспышки

Твсп. определяют по фракционному составу и/или ЦЧ.

$$t_{\text{всп.}} = 310 \rho_4^{20} - 291 + 0,635 t_{\text{н.к.}} + \exp(-6,125 \ln t_{\text{н.к.}} + 31,125)$$

- где $t_{\text{н.к.}}$ – температура выкипания 1,5% нефтепродукта по ИТК, °С.
- Твсп. = $-130,32 + 0,70704 * T_{10\%}(\text{ASTM})$
- Твсп. = $-124,72 + 0,70704 * T_{10\%}(\text{ASTM})$
- Твсп. = $0,675 \text{ЦЧ} + 30,8$
- Твсп. = $0,675 \text{ЦЧ} + 7,9$
- Твсп. = $0,675 \text{ЦЧ} + 8,6$

Низкотемпературные свойства ДТ



Температура помутнения - температура, при которой теряется фазовая однородность топлива из-за появления в нем кристаллов парафинов и льда. Кристаллы закупоривают поры фильтров тонкой очистки, нарушая подачу топлива к насосу высокого давления и к форсункам.

- При **температуре застывания** топливо теряет подвижность, что означает невозможность его использования в двигателе и перекачивания.
- Использовать топливо можно только при температуре окружающего воздуха выше точки помутнения.

Расчет низкотемпературных свойств дизельного топлива

Температура помутнения – надежных корреляций нет.

- *Температура застывания:*

$$t_{\text{заст.}} = \frac{4,254(\ln v_{50})^2 + 48,337 \ln v_{50} - 59,5}{1 + 0,184 \ln v_{50}}$$

Для топлив с пониженным содержанием серы введен показатель ***предельной температуры фильтруемости (ПТФ)*** - наиболее высокая температура, при которой данный объем топлива не проходит через стандартный фильтр в установленное время при стандартизованных условиях охлаждения.

Расчет ПТФ

Установлено, что наибольшая достоверность аппроксимации характерна для математических выражений, описывающих зависимость вида ПТФ = $f(t(50-10) \%об.)$

