

УДК 621.43.01(075.8)

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПЛАМЕННЫХ РЕАКЦИЙ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО ПЕРИОДА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

© Л. В. Кнауб

Мы представляем математическую модель расчета продолжительности индукционного периода сгорания на основе учета теплофизических свойств и концентраций компонент углеводородного топлива, скоростей предпламенных реакций и энергий активации. Это позволяет доказать возможность использования низкосортных топлив путем регулирования скоростей рекомбинации активных радикалов.

Ключевые слова: индукционный период, скорость сгорания, предпламенная реакция, физико-химические свойства, углеводородное топливо.

We present the mathematical model of calculation of duration of induction period of combustion on the basis of account of thermo physical properties and concentrations of components of hydrocarbon fuel, speeds preflaming reactions and energies of activating. It allows to prove possibility of the use of lowgrade fuels by adjusting of speeds of recombination of active radicals.

Keywords: induction period, combustion speed, preflaming reaction, physical and chemical properties, hydrocarbon fuel.

1. Введение

Индукционный период горения в факеле – это обобщающий временной аргумент, в течение которого протекают процессы подвода топлива, распыливание, испарение и невидимое горение, в результате которых меняются, одновременно или со смещением по фазе, физико-химические и газодинамические параметры состояния микрообъемов факела.

Воспламенение и сгорание топлива в дизеле представляет собой единый и весьма сложный процесс [1–8]. Согласно схеме, предложенной профессором Толстовым А. И., различаются четыре периода в процессе воспламенения и сгорания; основным признаком каждого из этих периодов является величина скорости сгорания [6].

Первый, или подготовительный период τ_1 , является периодом запаздывания воспламенения топлива. Этот период продолжается - от начала подачи топлива в цилиндр до момента отрыва линии сгорания на индикаторной диаграмме от линии сжатия.

В течение этого периода происходит распыливание, нагрев, испарение капель топлива и образование большого количества микрообъемов с неоднородным составом смеси.

Первый период характеризуется весьма малыми, близкими к нулю, скоростями реакций, протекающими при весьма большом коэффициенте избытка воздуха в отдельных микрообъемах камеры сгорания. По продолжительности этот период занимает $0,4 \div 1,5$ мс., т. е. 7–12 % суммарного времени, которое используется для развития процесса сгорания от начала впрыскивания до максимальной энтропии. Однако, этому периоду отводится главная роль в процессе сгорания топлива, именно индукционный период определяет динамику формирования, развития и выгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания.

2. Постановка проблемы

Изменяя продолжительность первого периода и характеристику подачи топлива, можно воздействовать как на динамику цикла, так и на полноту индикаторной диаграммы (полноту сгорания).

Продолжительность первого периода зависит главным образом от температуры и давления воздуха к моменту впрыскивания топлива, мелкости распыливания и физико-химических свойств топлива.

Известно, что реакции окисления углеводородов, входящих в состав дизельного топлива, начинаются с расщепления или распада молекулы на радикалы. И, поскольку, свойство, например, толуола ($C_6H_5CH_2 - H$) отдавать протон водорода с наименьшей затратой энергии ($E_{\text{ккал}} \approx 77,5$), как доказывает Злотин Г. Н. [9], по сравнению с бензолом (C_6H_6), энергия разрыва связи $C_6H_6 - H$ которого, 104 ккал [9], говорит о том, что реакция окисления толуола будет идти с наименьшей затратой энергии и с наибольшей скоростью. Процесс рекомбинации радикалов, образующихся при распаде молекулы толуола, начнется и закончится раньше, по сравнению с бензолом и, в целом, индуктивный период сгорания толуола будет меньше. Следовательно, зная физико-химические свойства углеводородов топлива, т.е. испаряемость, теплоту парообразования, поверхностное натяжение, энергетический уровень межмолекулярных связей, энергию активации отдельных молекулярных связей и энергию активации отдельных молекул с кислородом, можно предсказать, какие реакции будут играть определяющую роль в продолжительности индукционного периода. Поэтому наша задача состояла в составлении математической модели продолжительности индукционного периода на

основе учета выше перечисленных свойств топлива. Это, в свою очередь, позволит доказать возможность использования низкосортных топлив с рециркуляцией отработавших газов в двигателях внутреннего сгорания.

3. Литературный обзор

Индукционный период является важной количественной характеристикой предпламенной подготовки топлива к сгоранию, поэтому многие исследователи пытались разработать надежные методы расчёта продолжительности задержки воспламенения. Этому вопросу посвящено много работ. К наиболее известным можно отнести работы Воинова А. Н., Зельдовича Я. Б., Семенова Н. Н., Толстова А. И. и др. [1, 3, 6, 7].

Существующие методы расчёта задержки воспламенения являются различными модификациями классического уравнения скорости химической реакции, основанной на уравнении Аррениуса [7].

В предпламенный период практически одновременно протекает несколько процессов: образование и формирование, деформация – разрушение капель, прогрев и испарение топлива, релаксация (прогрев паров топлива до выравнивания температуры воздушного заряда), химические процессы, влияющие на скорость реакции.

В работе Франк-Каменецкого [8] период индукции определяется как

$$\tau_i = \int_{T_0}^{T_m} dT / (Q / c_p \rho) \cdot Z e^{-E/RT} - (T - T_0 / \tau_g), \quad (1)$$

где τ_i – продолжительность индукционного периода; Q – тепловой эффект реакции; ρ – плотность смеси; c_p – теплоёмкость реагирующей смеси; Z – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – газовая постоянная; T – температура в момент отрыва линии сжатия от линии сгорания; T_0 – начальная температура впрыска топлива в камеру сгорания; T_m – достаточно высокая температура, точное значение которой мало влияет на результат; τ_g – характерное время теплоотвода от одного моля компонента, определяемое как

$$\tau_g = c_p \cdot \rho \omega / \alpha S, \quad (2)$$

где ω – объём камеры сгорания; S – поверхность объёма; α – коэффициент теплоотдачи.

Уравнение (2) позволяет учесть при расчете времени индукции скорость простой реакции, выраженной законом Аррениуса и зависящей только от температуры. На самом же деле необходимо учитывать еще и зависимость скорости реакции от концентрации, порядка реакции, механизма и т. д., а это требует расчёта периода индукции для каждого составляющего компонента топлива, а затем усреднять с учетом локальных источников температуры.

То же самое можно сказать и об энергии активации, которая требует экспериментального исследования.

Для расчёта дизелей с непосредственным впрыском топлива, профессором Толстовым А. И. дана полуэмпирическая формула [6]:

$$\tau_i = B \cdot 10^{-2} \sqrt{C} \sqrt{T_k / p_k} \cdot e^{EC^{n-1} / e^{RT_k}}, \quad (3)$$

где R – газовая постоянная; E – условная энергия активации; B – коэффициент, зависящий от частоты вращения коленчатого вала двигателя; C – коэффициент, зависящий от степени сжатия; p_k – давление наддува; T_k – температура нагнетаемого воздуха, сжимаемого поршнем.

Как видно из уравнения (3) кинетика процессов окисления в период индукции практически не учитывается и, главным образом, определяется температурой и давлением воздуха к моменту впрыска.

Большое значение кинетике процессов окисления при расчете периода индукции уделяет в своих работах Войнов А. Н. [1].

Пренебрегая теплоотдачей в стенки и определяя длительность индукционного периода как величину обратно-пропорциональную скорости реакций, которые идут по радикально-цепному механизму, время задержки воспламенения представляется в виде:

$$\tau_i = A_0 p^{n-1} e^{\nu \tau}, \quad (4)$$

где A_0 – предэкспоненциальный постоянный множитель; p – общее давление смеси; n – порядок реакции; τ – время, отсчитываемое от начала реакции; ν – коэффициент в значении *constant* скорости разветвленной цепной реакции; величина этого коэффициента зависит от соотношения вероятностей продолжения, разветвления и обрыва цепей.

Однако, здесь возникает огромная трудность в вычислении коэффициента ν . Вероятность обрыва, продолжения и разветвления можно лишь предположить и приближенно определить время от того момента, когда тепловыделение при протекании химических реакций будет больше количества тепла, необходимого для реакции зарождения, т. е. образования активных радикалов, которые далее будут вступать в реакции рекомбинации практически без затраты тепла, а даже и с некоторым его выделением.

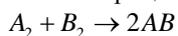
4. Расчет индукционного периода сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания

В результате проведения анализа экспериментальных данных на основе кинетики хорошо изученных модельных реакций были выведены закономерности зависимости времени запаздывания воспламенения топлива от теплового эффекта реакции, скорости самой реакции и времени теплоотвода (2).

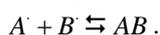
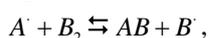
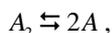
В рассмотренных выше примерах расчета периода индукционного сгорания топлива учитывалась скорость только простых реакций.

Для объяснения кинетики сложных реакций принимается, что в действительности они состоят из ряда простых реакций, причем обнаружить

образующиеся промежуточные вещества очень трудно из-за малого промежутка их жизни. Таким образом, наблюдаются только исходные реагенты и их конечные продукты, т. е. в расчетах рассматриваются только простые реакции. Например, если кинетика процесса



указывает на протекание сложной реакции, то, чтобы объяснить ее механизм можно предложить существование элементарных стадий, таких как



Для проверки принятой схемы нужно установить, согласуется ли вытекающее из этой схемы кинетическое выражение с экспериментальными кинетическими показателями. Химическая природа реагирующих веществ может предсказать свойства промежуточных соединений, образование которых следует ожидать в данном процессе.

Наблюдение за какой-либо одной реакцией в условиях индукционного периода сгорания практически невозможно, т. к. сам процесс предпламенных реакций длится около $(0,2 - 0,4) \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Поэтому кинетическое выражение реакции будем принимать как истинное, вытекающее из предложенной схемы.

В работе Ю. Г. Ищука расчет продолжительности задержки воспламенения приводится через время физических и химических превращений и времени релаксации [7], которое определяется числом столкновений.

Скорость столкновений Z_{AA} молекул в газе можно найти из кинетической теории газов. Для бимолекулярных столкновений одинаковых молекул имеем [2, 3]:

$$Z_{AA} = \sigma_A^2 n_A^2 \sqrt{4\pi kT / M_A} = r_A^2 \cdot N^2 / 10^6 \sqrt{4\pi kT / M_A \cdot C_A^2}, \quad (5)$$

где σ – диаметр молекул, см; M_A – масса 1 моль, кг/моль; N – число Авогадро; C_A, C_B – концентрация, моль/л; $n_A = N \cdot C_A / 10^{12}$ – число молекул А в 1 см³; $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ – постоянная Больцмана.

Для бимолекулярных столкновений неодинаковых молекул в смеси А и В находим:

$$Z_{AB} = (\sigma_A + \sigma_B / 2)^2 n_A n_B \sqrt{8\pi kT (1/M_A + 1/M_B)} = (\sigma_A + \sigma_B / 2)^2 N^2 / 10^6 \sqrt{8\pi kT (1/M_A + 1/M_B)} C_A C_B. \quad (6)$$

Если каждое столкновение между реагирующими молекулами приводит к превращению реагентов в продукт, то уравнение (6) дает скорость бимолекулярной реакции. Однако, истинная скорость обычно много ниже предсказанной вследствие того, что только малая часть всех столкновений между реагирующими молекулами вызывает реакцию. Это показывает, что лишь наиболее эффективные столкновения между

молекулами приводят к реакции или конкретнее, реакцию вызывают только столкновения, сопровождающиеся выделением избыточной энергии по сравнению с минимальной энергией активации E . Согласно закону распределения энергии молекул Максвелла, доля всех бимолекулярных столкновений, характеризующихся указанным избытком энергии, приблизительно равна $e^{-E/RT}$, если $E \gg RT$.

Поскольку рассматриваются лишь столкновения с большой энергией активации, при которых преодолеваются силы отталкивания, скорость реакции выражается уравнением:

$$-Z_A = -1/V \cdot dN_A / dt = k C_A C_B = Z_{AB} \cdot 1000 / N \cdot e^{-E/RT} = (\sigma_A + \sigma_{B/2})^2 \cdot N / 10^3 \sqrt{8\pi kT (1/M_A + 1/M_B)} \times e^{-E/RT} \cdot C_A C_B, \quad (7)$$

где $Z_{AB} 1000 / N$ – число столкновений, моль⁻¹·с⁻¹.

Исходя из теории столкновений, можно определить скорости реакций по известным кинетическим зависимостям их от концентраций реагирующих веществ. В настоящее время предсказать пути протекания реакций невозможно. Действительно, если реакция имеет несколько различных возможных путей, то она пойдет по пути наименьшего сопротивления, т. е. наискорейшему пути. Только знание энергий всех возможных промежуточных соединений позволит предсказать путь реакции и соответствующее ему выражение скорости. Поскольку такой информации пока нет, то нельзя предсказать вид зависимости реагирующих веществ. Это особенно важно сейчас с увеличением быстроходности двигателей внутреннего сгорания и расширения используемых сортов топлива. На практике форма экспериментального выражения скорости часто служит ключом при исследовании энергий промежуточных соединений реакции. Кроме того, диаметр молекул в уравнении (7) можно определить лишь для простых молекул типа Cl₂, N₂, I₂ и т. д. Для молекул углеводородов типа CH₃(CH₂)₁₄-CH₃ и др. – понятия «диаметр молекул» не существует. Расчет скоростей релаксации через число столкновений невозможен и, соответственно, нельзя рассчитать время релаксации.

Процессы самовоспламенения характеризуются переходом относительно медленного развития предпламенных реакций к очень быстрому химическому превращению, сопровождающемуся возникновением пламени.

Количественная математическая теория теплового самовоспламенения была разработана академиком Семеновым Н. Н. в 1928 г. [10].

Если горючая смесь находится в камере постоянного объема, имеющей одинаковую температуру стенок T_o , причем эта температура на протяжении опыта остается неизменной, то при отсутствии какого-либо тепловыделения за счет реакции температура смеси будет равна температуре стенок. При наличии тепловыделения в результате химических реакций температура газовой смеси

процесс окисления протекает по механизму цепной разветвленной реакции [3]. Окислению углеводородов присущ ряд характерных черт цепной разветвленной реакции. Разветвленными цепными реакциями называются такие реакции, в которых в каждом звене цепи, на исчезнувший активный центр, в среднем возникает больше одного нового центра, т. е. в которых выполняется неравенство $\varepsilon > 1$. В таких реакциях возможно выполнение условия

$$\varepsilon\alpha \geq 1, \quad (22)$$

где ε – среднее число активных центров; α – вероятность продолжения цепи.

Согласно Семенову Н. Н. [4], открывшему разветвленные реакции и разработавшему теорию этих реакций, важной величиной, характеризующей разветвленную цепную реакцию, является

$$\delta = \varepsilon - 1, \quad (23)$$

которую называют вероятностью разветвления на одном звене цепи.

Если простую цепную реакцию условно можно представить в виде зигзагообразной линии, каждый прямолинейный участок которой означает одно звено цепи, а число таких участков – число звеньев, т. е. длину цепи, то при $\delta > 0$ разветвленную цепную реакцию можно представить в виде разветвленной зигзагообразной линии. Длина цепи разветвленной реакции:

$$v_{разв} = \alpha / (\beta - \delta\alpha), \quad (24)$$

где β – вероятность продолжения и обрыва цепи.

Скорость такой цепной реакции будет выражаться следующей зависимостью [1, 2]:

$$w = A_0 \cdot e^{v\tau}, \quad (25)$$

где τ – время, отсчитываемое от начала реакции.

Период задержки воспламенения будет рассчитываться по уравнению (4). Однако мы должны отказаться от этой модели расчета периода индукции из-за отсутствия данных о коэффициенте v и невозможности получения его экспериментальным путем.

На основе анализа научной литературы можно сделать вывод о том, что в период индукции идут реакции бимолекулярных столкновений, пиролиза, рекомбинации и т. д. Принимаем ряд допущений:

- преимущественно идут реакции распада простой молекулы на радикалы;
- окисление начинается по типу цепной неразветвленной реакции.

Скорость неразветвленной цепной реакции определяется числом возникающих в единицу времени новых активных центров a' и средней длиной цепи γ . Последняя зависит от отношения вероятностей элементарных актов продолжения и обрыва цепи.

В естественных условиях обычно скорость зарождения активных центров $\alpha Ca'/d\tau$ определяется термической диссоциацией и выражается простой кинетической зависимостью [1]:

$$\alpha Ca'/d\tau = Ap^n e^{-E/RT}; \quad (26)$$

где p – давление, МПа; E – энергия активации,

$Dж/кг \cdot моль$; R – газовая постоянная, $Dж/кг \cdot моль$; T – абсолютная температура.

В соответствии с этим, общая скорость неразветвленной цепной реакции, выраженная через изменение концентрации какого-либо из исходных реагирующих веществ, например горючего, равна произведению $(\alpha Ca'/d\tau) \cdot \gamma_z$ или

$$w = dC/dt = -A\gamma p^n e^{-E/RT} = -A\gamma p^n (\exp^{-E/RT}). \quad (27)$$

Это означает, что зависимость скорости неразветвленной цепной реакции от температуры и давления аналогична зависимостям для простых реакций:

$$w_{abc} = Ap^n e^{-E/RT}, \quad (28)$$

где A – постоянный множитель, характеризующий зависимость скорости реакции от свойств смеси, а также от относительной концентрации в ней реагентов.

Обычно зависимость скорости реакций от концентраций, принимая последние неизменными, допустима лишь на ранних этапах реакции. Так как в ходе реакции происходит непрерывное изменение концентраций количество исходных веществ уменьшается. Если C_0 – начальная концентрация исходного вещества, а x – количество израсходованного вещества в какой-либо момент времени в ходе реакции, то оставшаяся концентрация равна $C_0 - x$. Соответственно, абсолютная скорость реакции в любой момент времени будет определяться выражением:

$$w_{abc} = -dz/d\tau = A(C_0 - x)^n e^{-E/RT}, \quad (29)$$

где T – текущая температура, изменяющаяся в ходе реакции.

Принимая теплоемкости исходной смеси и продуктов реакции одинаковыми и не зависящими от температуры, можно считать, что изменения температуры в ходе реакции пропорционально доле сгоревшего топлива x :

$$x/C_0 = (T - T_0)/(T_z - T_0), \quad (30)$$

где T_z – максимальная температура, достигаемая при полном сгорании, т. е. при $x = C_0$, тогда

$$C_0 - x = C_0 (T_z - T)/(T_z - T_0). \quad (31)$$

Подставив эту величину в выражение (3.38), получим [40]

$$w_{abc} = A [C_0 (T_z - T)/(T_z - T_0)]^n e^{-E/RT}. \quad (32)$$

Для неразветвленной цепной реакции общая скорость будет иметь вид

$$w = A\gamma [C_0 (T_z - T)/(T_z - T_0)]^n e^{-E/RT}. \quad (33)$$

Длина цепи γ или число звеньев, приходящихся в среднем на каждый свободный радикал, образовавшийся в результате реакции продолжения цепи, определяется соотношением скоростей процессов обрыва и продолжения цепи.

Существует некоторая вероятность β обрыва цепи на каждом ее звене. При этом вероятность

продолжения цепи равна $1 - \beta$. Вероятность того, что произойдет m повторений звена цепи, а в $(m + 1)$ звене произойдет обрыв, т.е. вероятность того, что цепь будет иметь длину m , равна [4]:

$$\xi = (1 - \beta)^m \beta. \quad (34)$$

Суммарное число звеньев во всех цепях равно

$$\sum_{m=1}^{\infty} mN\beta(1 - \beta)^m, \quad (35)$$

где N – полное число цепей, развивающихся в единице объема за единицу времени.

Средняя длина цепи тогда равна

$$\gamma = 1/N \sum_{m=1}^{\infty} mN\beta(1 - \beta)^m = \sum_{m=1}^{\infty} m\beta(1 - \beta)^m, \quad (36)$$

после преобразований (36)

$$\gamma = -\beta(1 - \beta)d/d\beta(1/\beta), \quad (37)$$

или окончательно

$$\gamma = 1 - \beta/\beta. \quad (38)$$

Таким образом, длина цепи равна отношению вероятностей продолжения и обрыва цепи на данном звене. При достаточно малом β

$$\gamma \approx 1/\beta. \quad (39)$$

Скорость неразветвленной цепной реакции принимает вид:

$$w = -A \cdot 1/\beta [C_o(T_z - T)/(T_z - T_o)]^n e^{-E/RT}. \quad (40)$$

Но, как уже говорилось выше, из-за отсутствия данных о вероятности продолжения и обрыва цепи нельзя точно определить скорость реакции.

Кинетика цепной химической реакции, ее скорость и средняя длина цепи, естественно, находится в прямой связи с условиями протекания реакции и, в первую очередь, с условиями зарождения и обрыва цепей.

5. Апробация результатов исследований

Рассматривая вопрос о скорости стационарной реакции, ограничимся только случаем, когда цепи зарождаются в объеме, но допуская обрыв цепей, как в объеме, так и на поверхности. При этом принимают, что объемный обрыв цепей следует линейному закону и что реакция протекает в диффузионной области. В этом случае для плоского реакционного сосуда при установившемся режиме простой цепной реакции выполняется следующее дифференциальное уравнение [3]:

$$pd^2n/dx^2 - gn + w_o = 0. \quad (41)$$

Первый член в этом уравнении определяет изменение концентрации активных центров вследствие диффузии D их к стенке, второй член – скорость объемного обрыва цепей, т.е. число активных центров, гибнущих в 1 м^3 за 1 с , а третий член – скорость термической генерации активных центров.

Решение уравнения (19) для плоского случая при справедливом для диффузионной области граничном условии – равенстве нулю концентрации активных центров у поверхности реакционного сосуда – имеет вид:

$$n = w/g \left[1 - \left(\text{ch} \sqrt{g/p} \right) (x - d/2) / \text{ch} \sqrt{g/4Dd} \right], \quad (42)$$

где d – расстояние между стенками сосуда.

Полное число активных центров в объеме реакционного сосуда –

$$N = S \int_0^d n(x) dx = \omega_o S d / g \left(1 - \text{th} \sqrt{g/4Dd} / \sqrt{g/4Dd} \right), \quad (43)$$

где S – площадь стенок.

Разделив N на среднее время развития одного звена цепи τ , получим скорость реакции:

$$\omega = N/\tau_1, \quad (44)$$

Скорость реакции еще можно представить как

$$\omega = \omega_o v S d. \quad (45)$$

Подставляя уравнение (42) и (43) в (45) и решая относительно v , получим [3]:

$$v = 1/g\tau_1 \left[1 - \left(\text{th} \sqrt{g/4Dd} / \sqrt{g/4Dd} \right) \right]. \quad (46)$$

В случае, когда цепи обрываются в объеме, g имеет большое значение и величина $\text{th} \sqrt{g/4Dd} / \sqrt{g/4Dd}$, которая может быть равна нулю, тогда:

$$v = 1/g\tau_1. \quad (47)$$

В случае, когда цепи обрываются преимущественно на стенках, коэффициент g должен быть мал. После разложения величины $\text{th} \sqrt{g/4Dd} / \sqrt{g/4Dd}$ в ряд по степеням малой величины $d(\sqrt{g/4D})$ получается:

$$v = d^2/12\tau_1 D. \quad (48)$$

Избавляясь от неизвестного в знаменателе τ_1 – среднего времени развития одного звена цепи:

$$\tau_1 = q\lambda/c, \quad (49)$$

где λ – средняя длина пробега; c – средняя скорость молекул; $q = Z^*/Z$ – отношение эффективного и полного числа соударений, а коэффициент диффузии равен:

$$D = \lambda c/3, \quad (50)$$

получено отношение [3]:

$$v = 1/4g (d/\lambda)^2. \quad (51)$$

Из уравнения (51) видно, что индукционный период сгорания топлива

зависит от изменения концентрации активных центров вследствие диффузии, скорости объемного обрыва цепей, т.е. числа активных центров и скорости термической генерации активных центров.

6. Выводы

Таким образом, нами математически доказана связь физико-химических свойств углеводородов топлива с продолжительностью индукционного периода. По предложенной математической модели можно определить не только продолжительность индукционного периода сгорания, но и скорость сгорания отдельной реакции.

Нами доказано, что основные и промежуточные реакции окисления компонент

факела определяют его динамику формирования, развития и выгорания. Продолжительность указанных динамических процессов зависит от химического состава топлива и условий в камере сгорания, при этом основную роль играет время индукционного периода, которое определяется теплофизическими свойствами отдельных компонент – теплотой парообразования, поверхностным натяжением, энергетическим уровнем межмолекулярных связей, энергии активации отдельных молекулярных связей и энергией активации отдельных молекул с кислородом.

По молекулярному составу и уравнениям реакций окисления в индукционный период горения

Литература

1. Воинов, А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А. Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.
2. Левиншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов [Текст] / О. Левиншпиль. – М.: Химия, 1969. – 620 с.
3. Кондратьев, В. Н., Никитин, Е. Е. Кинетика и механизм газофазных реакций [Текст] / В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. – М.: Наука, 1974. – 558 с.
4. Семенов, Н. Н. Цепные реакции [Текст] / Н. Н. Семенов. Строганов. – Л.: ЛХТИ, 1934. – 555 с.
5. Эмануэль, М. М., Кнорре, Д. Г. Курс химической кинетики [Текст] / А. И. Строганов, Г. Н. Сергеев и др. – М.: Металлургия, 1972. – 288 с.
6. Портнов, Д. А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия технологии [Текст] / Д. А. Портнов. – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.
7. Ищук, Ю. Г. Использование теории РРКМ в расчетах периода задержки воспламенения технологии [Текст] / Ю. Г. Ищук // Труды ЛИВТ, Судовая энергетика и топливоиспользование, 1984. – С. 30–42.
8. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 490 с.
9. Злотин, Г. Н. Использование газоконденсата в дизеле Д-21 при комбинированном смесеобразовании технологии [Текст] / Г. Н. Злотин // Двигателестроение. – 1986. – № 3. – С. 7–10.
10. Астахов, И. В. Подача и распыливание топлива в дизелях [Текст] / И. В. Астахов. – М.: Машиностроение, 1972. – 359 с.

Кнауб Людмила Владимировна, доктор технических наук, профессор, кафедра технического обеспечения, Одесская военная академия, Фонтанская дорога 10, г. Одесса, Украина, 65000
E-mail: knaubludmila@gmail.com

определяется скорость образования активных радикалов с учетом условий термодинамического состояния факела, т.е. его компонент, как в механической смеси воздуха с углеводородами. Вначале индукционного периода частично протекают эндотермические процессы (испарение и смешение) за счет доли тепла сжатого воздуха. При появлении активных радикалов и первых очагов открытого горения, когда выделяющаяся тепловая энергия больше затраченной теплоты, создаются условия и для детонационного сгорания. Путем использования рециркуляции отработавших газов с помощью уравнений (9-21) нами доказана возможность предупреждения детонационного сгорания.

References

1. Voinov, A. N. (1977). Combustion in high-speed reciprocators. Moscow, USSR: Engineer, 277.
2. Levinshpil, O. (1969). Engineering registration of chemical processes. Moscow, USSR: Chemistry, 620.
3. Kondratiev, V.N., Nikitin, E. E. (1974). Kinetics and mechanism of gasphase reactions. Moscow, USSR: Science, 558.
4. Semenov, N. N. (1934). Chain reactions. Leningrad, USSR: LHTI, 555.
5. Emanuel, M. M., Knorre, D. G. (1972). Course of chemical kinetics. Moscow, USSR: Metallurgy, 288.
6. Portnov, D. A. (1963). High-speed turbine-reciprocators with a self-ignition from the compression of technology. Moscow, USSR: MachGis, 640.
7. Ischuk, U. G. (1984). The use of theory of RRKM is in the calculations of period of delay of self-ignition of technology. Leningrad, USSR: Ship energy and fuel is the use, 30-42.
8. Frank-Kameneckiy, D. A. (1987). Diffusion and heat transfer is in chemical kinetics. Moscow, USSR: Science, 490.
9. Zlotin, G. N. (1986). Use of gas runback in the diesel of D-21 at combined mixture formation of technology. Moscow, USSR: Propulsion engineering, 7 – 10.
10. Astshov, I. V. (1972). A serve and nebulization of fuel in diesels. Moscow, USSR: Engineer, 359