

УДК 621.43.019.2

**В.А. Бармин**, канд. техн. наук, доц.  
**Г.М. Кухарёнок**, д-р техн. наук, проф.  
**А.Н. Петрученко**, канд. техн. наук, доц.

## ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЯХ

*Рассмотрены принципы и методы управления процессом сгорания в дизелях. Разработана система совершенствования процесса сгорания.*

*Rozглянуто принципи і методи керування процесом згорання в дизелях. Розроблено систему удосконалювання процесу згорання.*

*The principles and methods of management of process of combustion in diesel engines are considered. Is developed system of perfection of process of combustion.*

### Введение

Решение проблем совершенствования рабочего цикла в значительной степени зависит от возможностей управления выгоранием топлива в цилиндре дизеля (управления процессом сгорания) и совершенствования методов и систем управления.

Управляемость процесса сгорания в рабочем цикле является обобщающим критерием его совершенства, вскрывает резервы дальнейшей модернизации и характеризует перспективность конкретных направлений развития дизеля.

**Постановка задачи** – разработка системы совершенствования процесса сгорания на основе научно обоснованного выбора методов управления, обеспечивающих совершенствование рабочего процесса и эксплуатационных свойств, при улучшении удельных показателей дизелей.

### Решение задачи

В основе методологии и алгоритма функционирования систем управления процессом сгорания топлива лежит использование:

- математической модели процесса сгорания, учитывающей различие механизмов выгорания топлива в периодах и закономерные связи между его параметрами при дифференцированном подходе к управлению;
- результатов численного моделирования рабочего цикла дизеля при реализации принципов совершенствования процесса сгорания топлива;
- систематизации методов управления процессом сгорания топлива;
- классификации методов управления процессом сгорания топлива.

Математическая модель рабочего процесса основана на уравнении первого закона термодинамики. В результате решения первого закона термодинамики текущее давление газа в цилиндре определяется по соотношению:

$$p_i = \frac{2000B_0 H_u (\Delta x - \Delta x_w - \Delta x_{yt}) + p_{i-1} \left( \frac{k+1}{k-1} V_{i-1} - V_i \right)}{\frac{k+1}{k-1} V_i - V_{i-1}},$$

где  $B_0$  – цикловая подача топлива;

$H_u$  – теплотворность топлива;

$\Delta x$  – относительное количество выделившейся на участке теплоты;

$\Delta x_w$  – относительные потери теплоты от газов в стенке цилиндра;

$\Delta x_{yt}$  – приведенные относительные потери теплоты, вызванные утечками газов.

Сгорание в дизелях относится к очень сложным многофакторным процессам, происходящим в гетерогенной среде, содержащей капли распыленного топлива, пары топлива в воздухе, с неравномерной макро- и микроструктурой.

Как свидетельствуют современные физико-химические концепции, протекание процесса сгорания в дизелях складывается из взаимодействия физических и химических процессов:

- процесса впрыскивания топлива и образования смеси начиная с распыления топливной струи, испарения и смешения;
- периода задержки самовоспламенения;
- процесса окисления.

Процессы в цилиндре в основном осуществляются одновременно и начинаясь настолько влияют друг на друга, что достоверное их математическое моделирование с позиции фундаментальных законов до сих пор чрезвычайно затруднительно, а в ряде случаев и невозможно.

В этой связи получили распространение математические модели процесса сгорания, основанные на некоторых общих представлениях [1].

В настоящее время широкое распространение получил метод расчета рабочего цикла, предложенный И.И. Вибе [2]. Он основан на цепном механизме процесса горения углеводородов.

Для описания процесса сгорания применяется уравнение

$$x = 1 - e^{-C \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}},$$

где  $C$  – постоянный коэффициент;

$\varphi$  – угол поворота коленчатого вала от начала сгорания до рассматриваемого момента времени;

$\varphi_z$  – продолжительность сгорания;

$m$  – показатель характера сгорания.

Приведенное уравнение И.И. Вибе является полуэмпирическим. Математическая модель процесса сгорания, основанная на уравнении И.И. Вибе, получила широкое распространение в практике расчета и анализа рабочего процесса. Математическое моделирование непрерывно совершенствуется включением новых переменных и связей, отражая современные представления о физико-химической природе и механизме процесса сгорания. В работе Е.А. Лазарева [3] процесс сгорания рассматривается как состоящий из двух периодов, которые отличаются механизмом возникновения и распространения пламени: начального и основного (рис. 1).

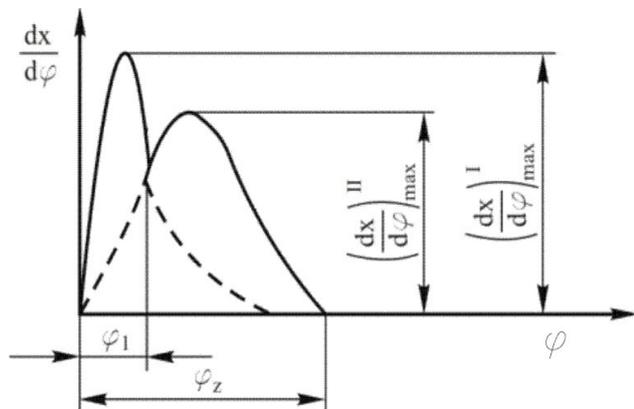


Рис. 1. Модель тепловыделения

Важной особенностью этой модели является ее преемственность, позволяющая использовать прошлый опыт совершенствования процесса сгорания.

Математическая модель процесса сгорания в виде характеристики выгорания топлива  $x = f(\varphi)$ , отражающая его современные концепции и используемая при оценке эффективности дифференцированного подхода к управлению рабочим циклом дизеля на основе вычислительного эксперимента, представляется зависимостью

$$x = 1 - e^{-C \left(\frac{\varphi}{\varphi_n}\right)^{m_n - m_0} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m_0 + 1}} \quad \text{при } \varphi > \varphi_n,$$

где  $x$  – доля топлива, выгоревшая к углу поворота коленчатого вала (ПКВ)  $\varphi$ ;

$\varphi_n, \varphi_z$  – продолжительность начального периода и всего процесса сгорания соответственно, град ПКВ;

$m_n, m_0$  – показатели характера сгорания начального и основного периодов процесса сгорания соответственно.

Математическое моделирование дает возможность оценить эффективность дифференцированного подхода к управлению процессом сгорания топлива на основе расчетно-аналитического (численного) исследования и вскрыть особенности воздействия параметров процесса сгорания топлива на индикаторные показатели рабочего цикла. Для достижения современных уровней экологических и экономических показателей необходимо увеличивать количество периодов тепловыделения до трех – шести, добиваясь этим улучшения индикаторных показателей, снижения шума, эмиссии  $NO_x$  и сажеобразования [1]. В этом случае каждая фаза рассматривается как отдельный процесс горения доли топлива с началом горения и концом сгорания, характеризующийся своим показателем процесса сгорания  $m$ .

Подбирая длительность этих фаз и крутизну кривой тепловыделения, можно осуществлять управление процессом сгорания.

Характеристика выгорания описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x = 1 - e^{-C \left(\frac{\varphi}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1 + 1}}, & \varphi_{z1} \geq \varphi \geq (\varphi_{n1} + \varphi_{z1}) \\ \vdots \\ x = 1 - e^{-C \left(\frac{\varphi}{\varphi_{zk}}\right)^{m_k + 1}}, & \varphi_{zk} \geq \varphi \geq (\varphi_{nk} + \varphi_{zk}) \end{cases},$$

где  $\varphi_{nk}, \varphi_{zk}$  – начало горения и условная продолжительность сгорания  $k$ -го периода;

$m_k$  – показатели характера сгорания  $k$ -го периода сгорания.

В случае трех периодов выгорания топлива скорость тепловыделения показана на рис. 2.

Результаты численного исследования рабочего цикла тем достовернее, чем полнее учитывается связь параметров процесса сгорания друг с другом. Целесообразность учета таких связей устанавливается на основе детального анализа математической модели.

Особое значение в этом случае имеют зависимости интенсивности выгорания и уровня тепловых потерь от продолжительности процесса сгорания. Их использование при численном моделировании рабочего цикла существенно расширяет возможности расчетно-аналитического исследования. Результаты такого исследования являются базой для определения принципов управления процессом сгорания топлива в дизелях.

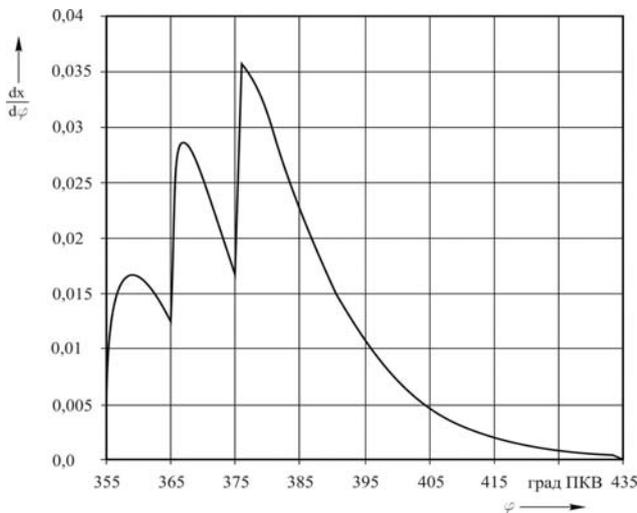


Рис. 2. Скорость выгорания при трех периодах сгорания

В результате анализа опытных данных была получена зависимость для определения продолжительности сгорания топлива в дизелях [1]:

$$\varphi_z = \varphi_{zopt} + b \frac{K_o - K}{K^3} \left( \frac{n_{ном}}{n} \right)^{0,92},$$

где  $\varphi_z$ ,  $\varphi_{zopt}$  – соответственно продолжительность процесса сгорания и ее оптимальное значение, град ПКВ;

$b$  – коэффициент, определяемый условиями смесеобразования;

$K$ ,  $K_o$  – соответственно коэффициенты эффективности использования воздушного заряда и смесеобразования;

$n$ ,  $n_{ном}$  – соответственно частота вращения коленчатого вала дизеля и ее номинальное значение,  $\text{мин}^{-1}$ .

На основе предложенных моделей разработана программа расчета рабочего процесса дизеля с учетом характеристики выгорания топлива по методикам И.И. Вибе, Е.А. Лазарева, многопериодного выгорания топлива.

Оптимизация параметров выгорания топлива проведена с использованием пакета MathCad. Ее результаты приведены в таблице.

Начальный период выгорания топлива определяет динамические показатели рабочего цикла, такие, как максимальное давление цикла и скорость нарастания давления. При этом практически никакому изменению не подвергаются экономические и экологические показатели работы дизеля. Следовательно, роль начального периода – формирование динамических показателей рабочего цикла, определяющих механическую нагрузку деталей.

Интенсивность выгорания топлива во втором периоде своего развития оказывает существенное влияние на продолжительность сгорания и уровень тепловых потерь и, как следствие, на экономические и мощностные показатели рабочего цикла.

При ограничении интенсивности выгорания топлива на начальном периоде повышение интенсивности во втором незначительно отобразится на динамической нагруженности деталей дизеля, однако ограничивающим фактором в этом случае будет максимальная температура цикла.

Второй период выгорания топлива формирует эффективные и мощностные показатели цикла, значительное улучшение которых ограничивается термической нагруженностью дизеля.

Интенсификация процесса выгорания топлива в третьем периоде развития оказывает влияние на продолжительность сгорания и тепловые потери, определяя тем самым экономические и эффективные показатели рабочего цикла, тепловую напряженность двигателя.

При ограничении интенсивности выгорания топлива на начальном и втором периодах повышение интенсивности выгорания в третьем оказывает незначительное влияние на экономические показатели, сдвигая их в сторону уменьшения. При этом снижается максимальная температура цикла.

## Выводы

Основные принципы управления процессом сгорания топлива в дизелях можно сформулировать следующим образом. Совершенствование процесса сгорания заключается в сокращении его продолжительности. При одностадийном сгорании оптимальная продолжительность сгорания составляет 60 град ПКВ, двухстадийном – 65 град ПКВ, трехстадийном 70 град ПКВ. Изменение интенсивности выгорания топлива в начальном периоде процесса сгорания в условиях ее ограничения во втором и третьем при неизменной продолжительности выгорания топлива дает возможность управлять динамическими показателями рабочего цикла при сохранении высокой экономичности дизеля и стабильно высоких значениях максимальной температуры цикла.

Изменение интенсивности выгорания топлива во втором периоде процесса сгорания в условиях ее ограничения в начальном и третьем при неизменной продолжительности выгорания топлива дает возможность управлять экономическими показателями рабочего цикла при сохранении удовлетворительных значений динамических показателей и высоких значениях максимальной температуры цикла.



Результаты оптимизации параметров выгорания топлива при  $\alpha = 1,8$ ;  $P_i \geq 0,9$  МПа

Условия	Методика И.И. Вибе	Методика Е.А. Лазарева	Три периода сгорания
$g_i \rightarrow \min$ $T_{\max} < 2100$ К $P_{\max} < 9$ МПа $dP/d\varphi < 0,9$ МПа/град	$g_i = 170$ г/кВт·ч $m = 0,59$ $\varphi_z = 60$ град ПКВ	$g_i = 169$ г/кВт·ч $m_n = 0,06$ $m_o = 0,16$ $\varphi_n = 16$ град ПКВ $\varphi_z = 65$ град ПКВ	$g_i = 167$ г/кВт·ч $m_1 = 0,01$ $m_2 = 0,09$ $m_3 = 0,09$ $\varphi_{n2} = 5$ град ПКВ $\varphi_{n3} = 10$ град ПКВ $\varphi_{z1} = 50$ град ПКВ $\varphi_{z2} = 50$ град ПКВ $\varphi_{z3} = 60$ град ПКВ $\varphi_z = 70$ град ПКВ
$T_{\max} \rightarrow \min$ $P_{\max} < 9$ МПа $g_i < 172$ г/кВт·ч $dP/d\varphi < 0,9$ МПа/град	$T_{\max} = 2023$ К $m = 0,47$ $\varphi_z = 74$ град ПКВ	$T_{\max} = 2020$ К $m_n = 0,06$ $m_o = 0,31$ $\varphi_n = 4$ град ПКВ $\varphi_z = 65$ град ПКВ	$T_{\max} = 1978$ К $m_1 = 0,01$ $m_2 = 0,48$ $m_3 = 0,18$ $\varphi_{n2} = 5$ град ПКВ $\varphi_{n3} = 15$ град ПКВ $\varphi_{z1} = 45$ град ПКВ $\varphi_{z2} = 60$ град ПКВ $\varphi_{z3} = 60$ град ПКВ $\varphi_z = 75$ град ПКВ
$P_{\max} \rightarrow \min$ $T_{\max} < 2000$ К $g_i < 172$ г/кВт·ч $dP/d\varphi < 0,9$ МПа/град	$P_{\max} = 7,2$ МПа $m = 0,58$ $\varphi_z = 70$ град ПКВ	$P_{\max} = 7,1$ МПа $m_n = 0,11$ $m_o = 0,31$ $\varphi_n = 4$ град ПКВ $\varphi_z = 65$ град ПКВ	$P_{\max} = 7,0$ МПа $m_1 = 0,03$ $m_2 = 0,08$ $m_3 = 0,28$ $\varphi_{n2} = 8$ град ПКВ $\varphi_{n3} = 16$ град ПКВ $\varphi_{z1} = 42$ град ПКВ $\varphi_{z2} = 40$ град ПКВ $\varphi_{z3} = 60$ град ПКВ $\varphi_z = 76$ град ПКВ

Изменение интенсивности выгорания топлива в третьем периоде процесса сгорания в условиях ее ограничения в начальном и втором при неизменной продолжительности выгорания топлива дает возможность управлять максимальной температурой цикла при сохранении высокой экономичности дизеля и удовлетворительных динамических показателей. Изменение интенсивности выгорания топлива в трех периодах необходимо осуществлять плавным переходом одной стадии выгорания в другую, добиваясь при этом оптимальной продолжительности сгорания. Показанная на рис. 3 схема иллюстрирует методы управления процессом выгорания топлива в цилиндре дизеля и призвана облегчить их выбор применительно к решаемым задачам и имеющимся возможностям.

В последнее десятилетие широкое развитие получили новые компоненты электронного регулирования и микропроцессорной техники. В этой связи появилась возможность эффективной реализации разновидностей систем управления процессом выгорания топлива, в частности, аккумулирующих систем впрыскивания топлива [4].

## Литература

1. Кухарёнок Г.М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования. – Минск: БГПА, 1999. – 180 с.
2. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. – М.; Свердловск: Машгиз, 1962. – 272 с.
3. Лазарев Е.А. Основные принципы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных двигателей. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 360 с.
4. BOSCH. Системы управления дизельными двигателями: пер. с нем. – М.: КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.



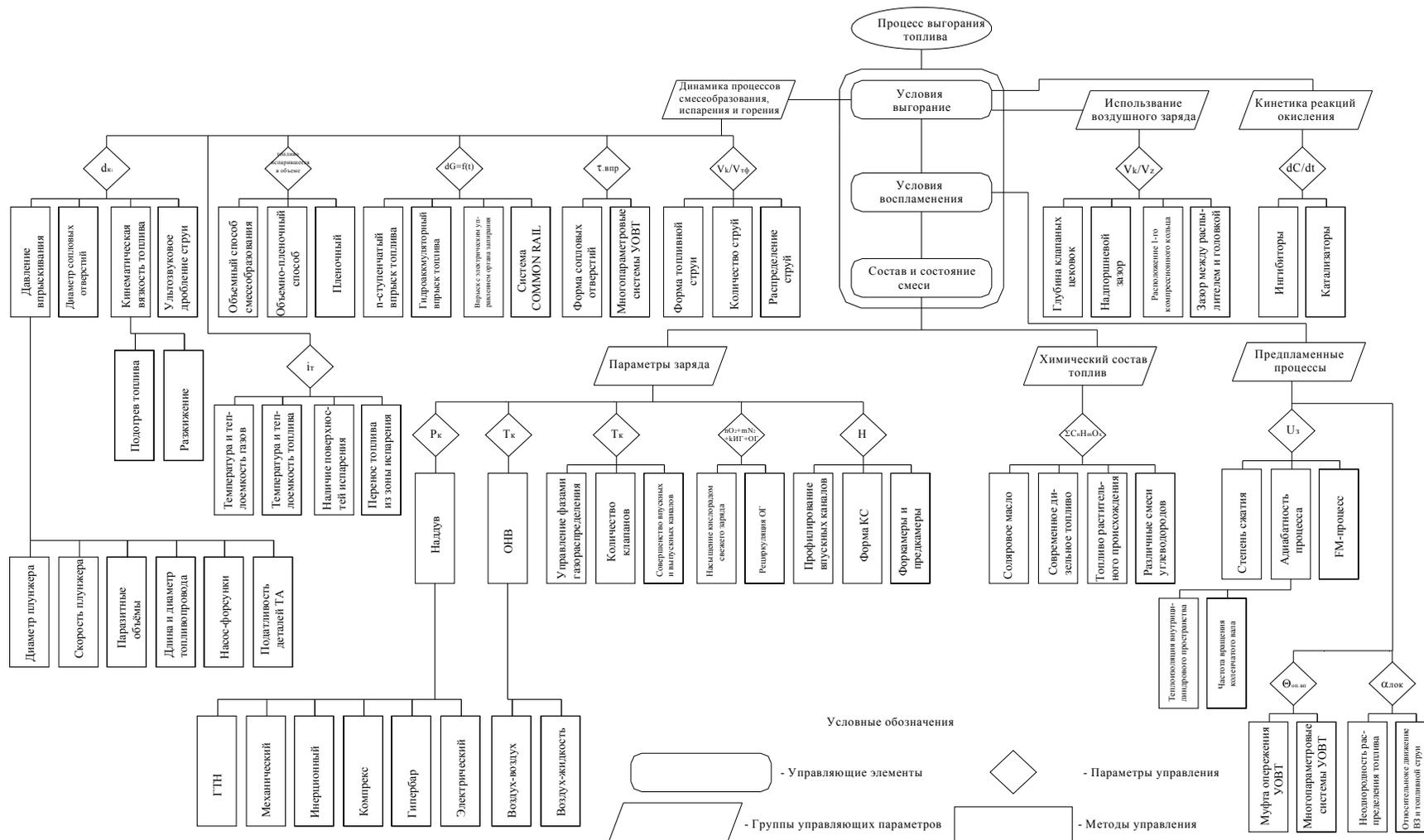


Рис. 3. Структурная схема системы управления процессом сгорания в двигателе

