

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЯХ

Докт. техн. наук, проф. КУХАРЕНКО Г. М.

Белорусская государственная политехническая академия

Определение методов совершенствования работы связано с разработкой комплексных математических моделей, позволяющих учитывать влияние конструктивных, режимных, регулировочных факторов на особенности протекания процессов в цилиндрах и системах дизелей. Основной трудностью математического моделирования является обеспечение полноты учета оценочных параметров процесса сгорания, что говорит о достоверности основных показателей эффективности и экологичности рабочего процесса. Математическое моделирование процесса сгорания – необходимый инструмент теоретического исследования при разработке основ его управления.

Процесс сгорания в дизелях, как свидетельствуют современные физико-химические концепции, складывается из взаимодействия ряда физических и химических процессов: впрыскивания топлива и образования смеси, начиная с распределения топливной струи, испарения и смешения; а также периода задержки самовоспламенения и процесса окисления.

В этой связи получили распространение математические модели процесса сгорания, основанные на некоторых общих представлениях. Такие модели или способы определения тепловыделения при сгорании можно разделить на три группы: термодинамические, формальные и физико-химические.

Термодинамический метод расчета рабочего цикла, разработанный В. И. Гриневецким и усовершенствованный Э. К. Мазингом, Н. Р. Брилингом, – основополагающий и применяется для решения определенных задач. В его основу положено первое начало термодинамики, в результате решения которого вычисляется максимальная температура цикла. Основной недостаток термодинамического метода – приближенный расчет процесса сгорания и недостаточно полный учет его влияния на протекание рабочего

процесса, что не позволяет оценить влияние конструктивных и регулировочных параметров на динамику тепловыделения.

В формальных методах анализа процесса сгорания предлагается аппроксимировать кривые изменения давления на участке сгорания различными геометрическими кривыми. Такой подход не дает возможности проведения расчетных исследований по анализу влияния различных факторов на протекание процесса сгорания.

Основоположником физико-химического метода расчета процесса сгорания является К. Нейман. Его метод основан на бимолекулярном механизме горения топлива.

Согласно работам Н. Н. Семенова, горение углеводородов в цилиндре двигателя происходит по цепному механизму, а не по бимолекулярному. Постоянные коэффициенты, входящие в бимолекулярные методы расчета, не имеют физической интерпретации, а их значения для условий работы двигателя не остаются постоянными.

В настоящее время широкое распространение получил метод расчета рабочего цикла, предложенный И. И. Вибе. Он основан на цепном механизме процесса горения углеводородов. Для описания процесса сгорания применяется уравнение

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

где m – показатель характера сгорания; φ – угол поворота коленчатого вала от начала сгорания до рассматриваемого момента времени; φ_z – продолжительность сгорания; C – постоянный коэффициент, который определяется по формуле

$$C = \ln(1 - x_z), \quad (2)$$

x_z – доля топлива, сгоревшего к моменту условного окончания процесса.

Следует отметить, что уравнение И. И. Вибе является полуэмпирическим. В нем недостаточно ясен смысл показателя « m ». Несмотря на это, уравнение хорошо работает, когда исследуется влияние на рабочий процесс различных конструктивных и режимных факторов. Поэтому математическая модель процесса сгорания, основанная на уравнении И. И. Вибе, распространена в практике расчета и анализа рабочего процесса.

Как показали проведенные экспериментальные исследования и их анализ в процессе сгорания топлива в цилиндре, в ряде случаев можно выделить два периода: начальный и основной, отличающиеся механизмом возникновения и распространения пламени. Сгорание в первом периоде зависит от степени подготовки к воспламенению смеси, образующейся за период задержки самовоспламенения вследствие протекания предпламенных химических реакций, и имеет взрывной характер. Во втором периоде происходит выгорание паров топлива, поступающих из локальных зон горения. Он имеет относительно малую скорость сгорания и протекает в условиях увеличивающегося объема цилиндра.

Наиболее совершенную математическую модель процесса сгорания, учитывающую сложный вид дифференциальной характеристики выгорания с двумя экстремумами, разработал Е. А. Лазарев. Интегральная характеристика выгорания в этом случае моделируется системой уравнений:

$$\begin{aligned} x &= 1 - e^{C \left(\frac{\varphi}{\varphi_{zn}} \right)^{m_n + 1}}, & \varphi_{zn} \geq \varphi \geq 0; \\ x &= 1 - e^{C \left(\frac{\varphi_n}{\varphi_z} \right)^{m_o + 1}}, & \varphi_z > \varphi > \varphi_n, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_n , m_o – показатели характера сгорания для начального и основного периодов процесса; φ_{zn} , φ_z – условная продолжительность процесса с характером сгорания начального периода и продолжительность всего процесса сгорания, град.; φ_n – продолжительность начального периода, град.

Общим недостатком метода расчета, основанного на уравнении И. И. Вибе, является то, что оно не учитывает влияния на сгорание процесса смесеобразования, который определяет его интенсивность и продолжительность.

Авторы ряда работ пытаются учесть процесс смесеобразования, используя законы теплопере-

дачи, диффузии и химической кинетики. Наиболее совершенным среди этих работ является метод Н. Ф. Разлейцева.

Модель Н. Ф. Разлейцева удобна для анализа влияния на процесс сгорания характеристик топливоподачи и условий использования воздушного заряда, а также для разработки обобщенной математической модели этого процесса. Однако действительная сложность физико-химических явлений в цилиндре дизеля затрудняет применение общей теории тепломассообмена и химической кинетики к процессам смесеобразования и сгорания, поэтому такие методы еще недостаточно разработаны и требуют использования большого количества эмпирических коэффициентов.

Практика моделирования рабочих процессов двигателей показывает, что совершенствование расчетных моделей связано с повышением достоверности определения продолжительности сгорания с учетом особенностей организации процесса смесеобразования. Рядом авторов предложены зависимости для расчета процесса сгорания [1]. Однако все они получены с допущениями, и возможности их применения ограничиваются рамками конкретных двигателей. Поэтому были проведены исследования по определению зависимости продолжительности сгорания топлива τ_z в высокооборотных дизельных двигателях производства Минского моторного завода и Гомельского завода пусковых двигателей с полуразделенными камерами сгорания от режимных факторов: частоты вращения коленчатого вала и коэффициента избытка воздуха, а также от параметров, характеризующих эффективность использования воздушного заряда [2].

Для комплексной оценки эффективности использования воздушного заряда введен параметр

$$K_v = \frac{V_k}{V_c} P, \quad (4)$$

где P – коэффициент равномерности распределения топлива в объеме камеры сгорания; V_k/V_c – отношение объема камеры в поршне к объему камеры сгорания.

Он является одним из оценочных параметров совершенства конструкции двигателя. Его применение позволяет осуществить принцип оптимизации при доводке камеры сгорания в поршне и выборе количества и расположения топливных факелов.

В полуразделенных камерах сгорания с организованным тороидальным воздушным вихрем (типа ЦНИДИ) эффективность использования воздушного заряда определяется совместным влиянием отношения объема камеры в поршне к объему камеры сгорания и равномерности распределения топлива в пространстве камеры сгорания. Распределение топлива в пространстве камеры сгорания ЦНИДИ оценивалось по степени охвата топливной пленкой боковой поверхности камеры

$$P = \frac{\sum F_{\phi}}{F_{\text{ст}}}, \quad (5)$$

где $\sum F_{\phi}$ – суммарная площадь поверхности топливной пленки на стенке камеры сгорания; $F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности боковой стенки камеры сгорания.

Распределение топлива в пространстве камеры сгорания ЯМЗ с организованным осевым воздушным вихрем оценивалось по степени равномерности распределения топлива в объеме камеры

$$P = \frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_{\text{т}}}, \quad (6)$$

где $\omega_{\text{в}}$ – угловая скорость воздушного вихря в камере сгорания; $\omega_{\text{т}}$ – угловая скорость, обеспечивающая поворот воздушного вихря за время впрыска на угол, равный углу между осями топливных факелов.

После преобразований соотношение (6) представлено в виде

$$P = \frac{H \phi_{\text{впр}}}{360 / i_{\text{струй}}}, \quad (7)$$

где H – вихревое отношение, равное отношению угловых скоростей вихря и коленчатого вала, $H = \omega_{\text{в}}/\omega$; $\phi_{\text{впр}}$ – продолжительность впрыска топлива; $i_{\text{струй}}$ – число топливных факелов.

Для оценки процесса смесеобразования предложен параметр K , представляющий собой произведение коэффициента эффективности использования воздушного заряда на коэффициент избытка воздуха:

$$K = \alpha P V_{\text{к}}/V_{\text{с}}, \quad (8)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

Этот параметр учитывает величину коэффициента избытка воздуха, относительного объема камеры сгорания и равномерности распределения топлива в камере. По существу он является эффективным коэффициентом избытка воздуха.

Были проведены экспериментальные исследования по определению влияния рассматриваемых факторов на продолжительность сгорания, которая находилась путем обработки индикаторных диаграмм.

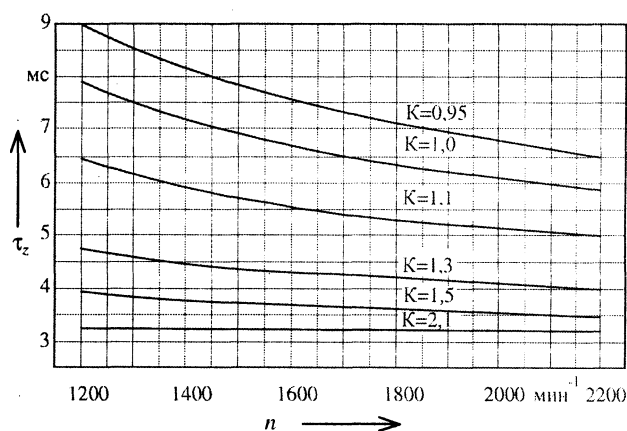


Рис. 1. Зависимость продолжительности сгорания топлива от частоты вращения коленчатого вала

Чтобы найти τ_z , вначале определяем влияние на продолжительность сгорания в исследуемом дизеле коэффициента избытка воздуха при трех значениях отношения объема камеры в поршне к объему камеры сгорания $V_{\text{к}}/V_{\text{с}} = 0,74; 0,77; 0,79$.

В процессе исследований увеличение отношения $V_{\text{к}}/V_{\text{с}}$ достигалось одновременным увеличением объема $V_{\text{к}}$ и уменьшением объема, образованного надпоршневым зазором и подклапанной выточкой при сохранении неизменной величины степени сжатия.

С ростом $V_{\text{к}}/V_{\text{с}}$ продолжительность сгорания топлива уменьшается, что связано с увеличением количества воздуха, заключенного в объеме $V_{\text{к}}$ и эффективно используемого в процессе сгорания. Однако с увеличением α влияние $V_{\text{к}}/V_{\text{с}}$ на продолжительность сгорания уменьшается и при $\alpha = 2,5 \dots 3$ для исследуемых значений $V_{\text{к}}/V_{\text{с}}$ продолжительность τ_z практически одинакова, т. е. при этих α для исследуемого дизеля обеспечиваются наивыгоднейшие условия протекания процесса сгорания.

Для определения влияния скоростного режима двигателя на продолжительность сгорания были обработаны индикаторные диаграммы, полученные при работе по нагрузочным характеристикам в диапазоне $n = 1200 \dots 2200 \text{ мин}^{-1}$. По результатам этих исследований построены графики зависимостей $\tau_z = f(n)$ при постоянных значениях параметра K (рис. 1), из которых видно, что при малых значениях K с ростом частоты вращения уменьшается τ_z . С увеличением K влияние частоты вращения на τ_z снижается. При значениях $K = 2,1$ продолжительность сгорания достигает оптимальной величины 3,2 мс и практически не зависит от частоты вращения коленчатого вала.

Путем математической обработки зависимостей, представленных на рис. 1, получено функциональное уравнение для определения продолжительности сгорания топлива в дизелях

$$\tau_z = \tau_o + b \left(\frac{K_o - K}{K^3} \right) \left(\frac{n_{\text{ном}}}{n} \right)^{0,92}, \quad (9)$$

где τ_o – оптимальная продолжительность сгорания; K_o – значение параметра, соответствующее

τ_o ; b – постоянный коэффициент, зависящий от условий смесеобразования; $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения коленчатого вала.

Для дизеля 4Ч 11/12,5 с камерой сгорания ЦНИДИ: $\tau_o = 3,2 \text{ мс}$; $K_o = 2,1$; $b = 2,4$; $n_{\text{ном}} = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

Для малогабаритного дизеля 1Ч 8,2/7,5 с камерой ЯМЗ: $\tau_o = 2,4 \text{ мс}$; $K_o = 2,1$; $b = 2,6$; $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Предложенные параметры эффективности использования воздушного заряда и уравнение для определения продолжительности сгорания в дизелях позволяют осуществить принцип оптимизации при совершенствовании конструкций камер сгорания и улучшении условий взаимодействия воздушного заряда и топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разлейцев Н. Ф., Касита А. М. Кинетические особенности процессов сгорания в форсированных дизелях и методы приближенного их описания // Двигатели внутреннего сгорания. – 1989. – Вып. 49. – С. 48–56.

2. Кухаренок Г. М., Петрученко А. Н. Повышение эффективности использования воздушного заряда дизеля // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в БГПА: Матер. междунар. 51-й НТК БГПА. – Мн., 1995. – С. 77–78.

УДК 62-85

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ТОРМОЗНОГО КРАНА

Кандидаты техн. наук АВТУШКО В. П., ГИЛЬ С. В.

Белорусская государственная политехническая академия

При проектировании и исследовании систем автоматического регулирования различного назначения широко используется частотный метод анализа качества систем [1]. Известно [2], что между вещественной частотной характеристикой (ВЧХ) замкнутой системы $P(\omega)$ и ее переходной функцией $h(t)$ существует однозначная связь вида

$$h(t) = (2/\pi) \int_0^{\infty} ((P(\omega) \sin \omega t) / \omega) d\omega.$$

На практике часто нет необходимости вычислять приведенный интеграл и определять кривую переходного процесса. О качестве системы (длительность переходного процесса, перерегулирование) можно судить по свойствам ВЧХ. Установлено [2], что достаточно близким переходным процессам соответствуют близкие ВЧХ. При исследовании систем обычно ограничиваются интервалом существенных частот $\omega_{\text{сч}}$, который определяется по ВЧХ при использовании условия $P(\omega_{\text{сч}})/P(0) < 0,05 \dots 0,20$ (где $P(\omega_{\text{сч}})$ –