

Рис. 5. Параметры предварительной порции топлива q_n^M :
 о – 1-сопловый распылитель;
 • – 4-сопловый распылитель;
 х – 5-сопловый распылитель

оптимизацией параметров впрыскивания, позволяющей уменьшить кинетическую энергию топливной струи, взаимодействующей с поверхностями камеры сгорания и днища поршня.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература:

Патент на полезную модель 42073 Российская Федерация, МПК⁷ F 02 M 25/022. Система питания дизеля. / А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский, Е.М. Калужный, А. Тактак (РФ) - № 2004121938/22; заявл. 19.07.2004; опубли. 20.11.04, бюл. № 32.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДВИГАТЕЛЯХ С ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ОТ СЖАТИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНЕ

Камалтдинов В.Г., Драгунов Г.Д. (Южно-Уральский государственный университет), **Марков В.А.** (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Методика расчета процесса сгорания топлива в двигателях с воспламенением от сжатия при нестационарном тепло- и массообмене базируется на моделях основных процессов нестационарного горения и тепло- и массообмена рабочего тела переменной массы в камере сгорания (КС) ДВС.

Модель процесса горения имеет следующие основные положения.

1. Процесс горения рассматривается как совокупность последовательных реакций окисления до диоксида углерода и воды групп активных молекул топлива, протекающих по закону Аррениуса и имеющих энергию, больше условной энергии активации при данной температуре.

2. Количество активных молекул топлива в группе, вступающих в реакцию, зависит от общего количества молекул топлива, текущей температуры смеси и ус-

ловной энергии активации, изменяющейся в зависимости от доли выгоревшего топлива.

3. Условная продолжительность окисления этой группы активных молекул принимается зависящей не только от общего количества молекул топлива, но и от других важных для процесса горения параметров: объема КС, количества молекул кислорода, количества молекул инертных компонентов (азота, диоксида углерода и др.) и турбулентности внутри КС.

4. Теплота, выделяющаяся при окислении каждой группы активных молекул топлива, определяется через низшую теплотворную способность топлива и расходуется на повышение температуры смеси в зоне горения.

5. В процессе расчета постоянно корректируется количество молекул всех веществ в результате выгорания топлива, расходования на это кислорода, образования диоксида углерода и воды, образования оксида углерода и кислорода при диссоциации, последующего окисления оксида углерода.

Особенностью модели является введение нового параметра, учитывающего фактор времени на молекулярном уровне, – условной продолжительности реакции окисления молекулы топлива. В качестве временного фактора обычно используется угол поворота коленчатого вала. Но при анализе процесса сгорания, когда угол поворота коленчатого вала привязан не только ко времени, но и величине объема сжатия, эта замена не всегда корректна. Изменение объема сжатия однозначно приводит к изменению температуры в цилиндре и концентрации реагирующих веществ и, следовательно, скорости реакции окисления. В этом случае не представляется возможным однозначно определить причину изменения скорости сгорания: либо это происходит в результате изменения температуры и концентрации, либо – просто с течением времени.

Выражение для определения условной продолжительности реакции окисления группы активных молекул топлива имеет вид:

$$t_y = \frac{Z_T}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q} = \frac{V}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q},$$

где Z_T – общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; $const$ – константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; K_1 – коэффициент, учитывающий влияние инертных составляющих рабочего тела и продуктов сгорания; K_2 – коэффициент, учитывающий турбулентность внутри КС, $K_2 \geq 1$; $C_T = Z_T/V$ и $C_{O_2} = Z_{O_2}/V$ – концентрации всех молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O_2} в объеме V соответственно; p, q – показатели степени, причем $p+q=n$ – кинетический порядок реакции, $n=2$.

Модель процессов сжатия-расширения включает уравнение для определения изменения давления в цилиндре рабочего тела переменной массы в условиях нестационарного тепло- и массообмена, в котором учитываются кроме общепринятых процессов (тепловыделение при сгорании топлива, теплоотдача в стенки цилиндра по закону Ньютона-Рихмана, изменение объема цилиндра) утечки через цилиндропоршневой зазор и подача дополнительного рабочего тела, а также затраты энергии на нагрев и испарение топлива и диссоциацию диоксида углерода [1].

$$dp = \frac{\frac{dQ_{\bar{n}\bar{a}} - dQ_{\bar{o}\bar{i}\bar{i}} - dQ_{\bar{a}\bar{e}\bar{n}}}{m} - pdv \frac{k}{k-1} - (i - i_{\bar{a}\bar{i}}) \frac{dm_{\bar{a}\bar{i}}}{m}}{\frac{v}{k-1}},$$

где dQ_{c2} , $dQ_{m.o.}$, dQ_{duc} – теплоты, выделившаяся при сгорании топлива, отведенная от рабочего тела (теплообмен со стенками, при нагреве и испарении топлива и другие) и расходуемая на диссоциацию продуктов сгорания, соответственно; p , v и dv – давление, удельный объем рабочего тела в цилиндре и его изменение, соответственно; $k=C_p/C_v$ – показатель адиабаты; i , i_{en} – удельные энтальпии рабочего тела, находящегося в цилиндре, массой m и дополнительно входящего компонента массой dm_{en} .

Для уточненного определения температуры в зоне горения в модели предусмотрено определение текущей теплоемкости рабочего тела в зависимости от его молекулярного состава, которая задается для каждого компонента в функции температуры по рекомендациям А.А. Равделя [2].

Модель обратимого процесса диссоциации диоксида углерода, образовавшегося при сгорании топлива в цилиндре ДВС в условиях нестационарного тепло- и массообмена, включает уравнения для определения степени диссоциации для квазиравновесного состояния по рекомендациям В.В. Померанцева [3], количества молекул диоксида углерода, распавшихся на оксид углерода и кислород, а также затрат энергии на этот процесс. При снижении температуры в зоне горения принимается, что процесс диссоциации идет в обратную сторону с выделением теплоты за счет окисления оксида углерода. Степень диссоциации α вычисляется при решении кубического уравнения:

$$a^3 + a^2 \frac{2b}{1 - K_p^2 \delta} + a \frac{(-3 - 4b)}{1 - K_p^2 \delta} + \frac{2 + 2b}{1 - K_p^2 \delta} = 0,$$

где p – давление в цилиндре; K_p – константа равновесия реакции; $b = \frac{N_{N_2} + N_{H_2O}}{N_{CO_2}}$ – отношение суммарного числа молей азота N_{N_2} и воды N_{H_2O} к суммарному числу молей углекислого газа N_{CO_2} .

Потери теплоты на диссоциацию молекул CO_2 внутри КС ДВС определяются в виде:

$$dQ_{дисс} = E_d \cdot \mu_{CO_2} \cdot A_0 \cdot \alpha \cdot dZ_{CO_2},$$

где E_d – энергия, затрачиваемая на диссоциацию 1 кг углекислого газа; μ_{CO_2} – молярная масса углекислого газа; dZ_{CO_2} – изменение количества молекул CO_2 за интервал времени dt .

Предложенная методика позволяет моделировать рабочий процесс ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия, работающего отдельно на диметиловом эфире (ДМЭ), метане и пропане. При верификации программы расчета рабочего цикла «HCCI combustion», построенной на основании указанных моделей, получено хорошее совпадение расчетных давлений в цилиндре ДВС с экспериментальными данными работы [4], в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха ДМЭ (от 4 до 10) [5].

Для моделирования процесса сгорания двухкомпонентного топлива методика дополнена моделью разделения реагирующей смеси на два условно отдельных объема для каждого из топлив (ДМЭ и метана), но с общими давлениями и температурами [6]. Полученные расчетные кривые давления хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для двигателя Yanmar Co. Ltd при различном составе топлива [7], как по углу начала сгорания, так и по величине и скорости нарастания давления (рис. 1) в исследованном диапазоне изменения коэффициентов избытка воздуха ДМЭ и природного газа ($\alpha_{ДМЭ} = 6,5 \dots 15,5$ и $\alpha_{ПГ} = 4 \dots 7,1$) (см. таблицу).

Таблица. Коэффициенты избытка воздуха на экспериментальных режимах работы ДВС с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия при работе на смеси природного газа и ДМЭ

№ режима работы	$\alpha_{\text{ДМЭ}}$	$\alpha_{\text{пр.г}}$
1	6,5	7,1
2	10,3	7,1
3	14,7	7,1
4	11,9	4,0
5	14,3	4,0
6	15,5	4,0

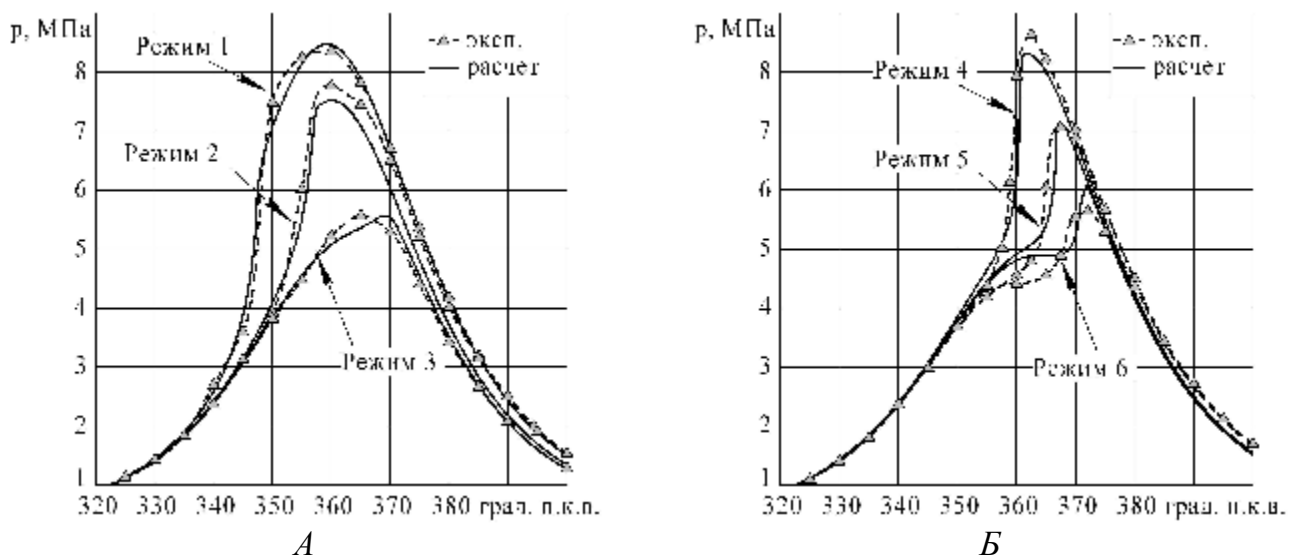


Рис. 1. Экспериментальные данные работы [7] и расчетные кривые давления в цилиндре НССИ двигателя производства Yanmar Co. Ltd на соответствующих режимах (коэффициенты избытка воздуха на экспериментальных режимах работы ДВС соответствуют данным таблицы)

При анализе влияния состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания установлено, что для удовлетворительного воспроизведения особенностей диаграммы давления при меньшей доле ДМЭ в смесевом топливе приходится увеличивать условную энергию активации ДМЭ, чтобы смоделировать снижение способности к самовоспламенению ДМЭ в присутствии метана. В результате флегматизирующее влияние метана описано графической зависимостью начальной условной энергии активации ДМЭ ($E_{\text{АН ДМЭ}}$) от массовой доли ДМЭ ($\varphi_{\text{ДМЭ}}$) в смесевом топливе (рис. 2).

На основании выполненных работ можно сделать следующие выводы:

- в разработанных моделях учитываются не только основные физико-химические свойства топлива, кислорода, но и инертных компонентов (азота, диоксида углерода и др.), условная энергия активации, которая в процессе сгорания увеличивается в степенной функции, а также затраты энергии на диссоциацию продуктов сгорания, тепло- и массообмен в течение всего цикла;
- качественное согласование результатов расчетного моделирования рабочего цикла двигателей с воспламенением от сжатия с известными теоретическими и экспериментальными данными доказывает, что методика хорошо описывает сгорание различных топливно-воздушных смесей;

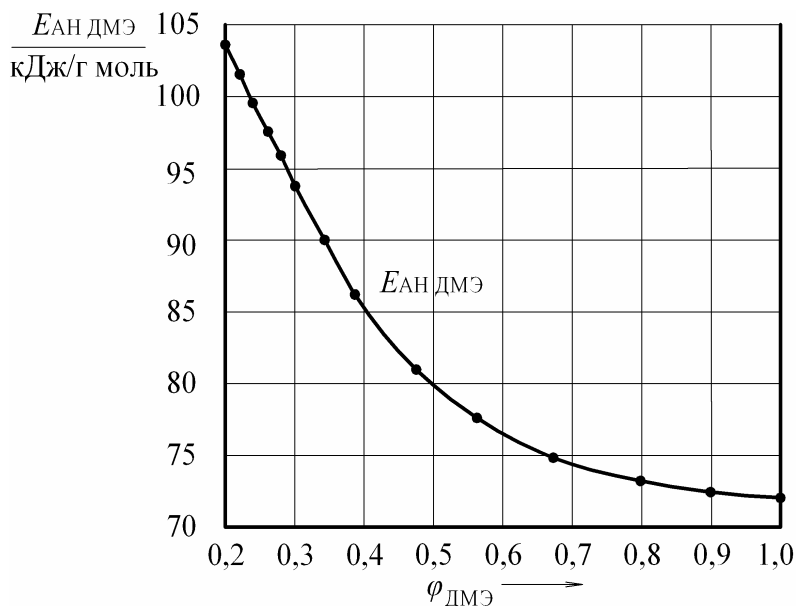


Рис. 2. Зависимость величины условной начальной энергии активации ДМЭ от массовой доли ДМЭ в смеси топлива

– разработанные модели и методика расчета процесса сгорания в двигателях с воспламенением от сжатия при нестационарном тепло- и массообмене позволяют производить поисковые исследования рабочего цикла НСЦИ двигателей при работе на двухкомпонентном топливе, состоящем из ДМЭ и природного газа, и рабочих процессов других двигателей с воспламенением от сжатия.

Литература:

1. Камалтдинов В.Г. Уточненная методика расчета параметров рабочего тела на пусковых режимах дизеля // Двигателестроение. 2008. №2. С. 31–34.
2. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. 232 с.
3. Основы практической теории горения: Учебное пособие / Под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973. 263с.
4. HCCI Combustion: Analysis and Experiments / S.M. Aceves, D. Flowers, J. Martinez-Frias et al. // SAE Technical Paper Series. 2001. № 2001-01-2077. P. 1-10.
5. Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В., Терехов А.С. Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. 2007. Вып. 10. № 25. С. 44–47.
6. Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В. Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. 2008. Вып. 12. № 23. С. 46–53.
7. Chen Z., Konno M., Oguma M. et al. Experimental Study of CI Natural-Gas / DME Homogeneous Charge Engine // SAE Technical Paper Series. 2000. № 2000-01-0329. P. 1-10.

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Марков В.А., Стремяков А.В., Мизев К.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Девянин С.Н. (МГАУ им. В.П. Горячкина), Поздняков Е.Ф. (НЗТА)

Удовлетворение современных жестких требований к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей невозможно без дальнейшего совершенствования процессов распыливания топлива и последующе-