

**4.3.1 – ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2022_4_24

А.И. Аносова, канд. техн. наук, e-mail: a.anosova@yandex.ru
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск
Т.П. Гергенова, ст. преподаватель, e-mail: Lemex74@mail.ru
П.А. Болоев, д-р. техн. наук, e-mail: boloev.pioter.irgsh@yandex.ru
Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, г. Улан-Удэ

УДК 159. 621

СГОРАНИЕ МЕТАНА В ДИЗЕЛЯХ

В связи с ростом товароперевозок на грузовом транспорте и увеличением производства легковых автомобилей на дизельных двигателях потребность в дизельном топливе неуклонно растет. Данная обстановка повышает актуальность работы по поиску и обоснованию применения альтернативных топлив, что является актуальным для снижения стоимости горючего для техники. Один из выходов из создавшейся ситуации – использование этанола, метанола, рапсового масла и биогаза в технике [1, 2].

В данной работе рассмотрено влияние изменения теплового баланса двигателя с учетом лучистого и конвективного теплообмена, приведены зависимости, позволяющие проследить кинетику развития лучистого теплообмена в камере сгорания переменного объема, т. е. в синтезе рабочего процесса ДВС.

Ключевые слова: лучистый и конвективный теплообмен, образование сажи и рабочий процесс двигателя.

A.I. Anosova, Cand. Sc. Engineering
T.P. Gergenova, senior lecturer
P.A. Boloev, Dr Sc. Engineering, Assoc. Prof.

COMBUSTION OF METHANE IN DIESEL

The demand for diesel fuel has been steadily increasing due to the increase in freight traffic and in the production of light diesel engines. That situation made it all the more urgent to seek and justify the use of alternative fuels, which was an urgent matter of reducing the cost of fuel for equipment. One of the solutions to this situation is the use of ethanol, methanol, rapeseed oil and biogas in the technique [1, 2].

The article considers influence of change of thermal balance of the engine with consideration of lustrous and convective heat exchange, provides dependencies allowing to trace kinetics of development of radiant heat exchange in combustion chamber of variable volume, i.e. in synthesis of working process ICE.

Key words: radiant and convective heat transfer, soot formation and engine operation.

Введение

В настоящее время наблюдается постоянный рост цен на заправочных станциях: в 2021 г. подорожание бензина и дизельного топлива происходило 30 раз, что составило 8,84 % [8]. Несмотря на рост цен, потребность дизельного топлива с каждым годом увеличивается из-за возрастания количества автомобилей, работающих на дизельном топливе.

Работа дизельного двигателя сопровождается повышенной дымностью на больших нагрузках. Процесс сгорания камеры переменного объема состоит из лучистого и конвективного теплообмена. Образование сажи (дымности) рабочего процесса характеризуется лучистым теплообменом. Анализируя состояние с использованием моторных топлив, делаем вывод, что таким топливом уже в ближайшее время могут быть этанол, метанол, рапсовое масло,

биогаз. Замена традиционных источников энергии на альтернативные в настоящее время уделяется огромное внимание [1–5].

Условия и методы

При сгорании метана (CH_4) в автотракторных двигателях наблюдается снижение образования сажи (дымности), окислов азота (NO_x) и других токсичных компонентов. Объясняется это увеличением продолжительности процесса сгорания, вызывающим снижение максимальной температуры цикла и более полного окисления продуктов сгорания.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим влияние изменения теплового баланса двигателя с учетом лучистого и конвективного теплообмена. Исследованиями Л.М. Белинского [3, 5] установлено следующее:

- 1) излучение в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является сплошным в течение всего интервала свечения пламени;
- 2) коэффициент излучения пламени при сгорании топлива в цилиндре двигателя не зависит от длины волны;
- 3) температура сажистых частиц, являющихся источником теплового излучения, на 25–45 % выше температуры газа.

Светящееся пламя, образующееся в цилиндре дизеля при сгорании топлива, излучает и поглощает энергию во всех спектрах длин волн. При сгорании топлива пламя фиксируется с момента резкого нарастания давления и продолжает свечение на линии расширения [1]. Конец свечения пламени обычно соответствует положению вала 60–90° после верхней мертвой точки (ВМТ).

По данным Л.М. Белинского, температура газа достигает максимума при 30° угла поворота коленвала после ВМТ, в пламени – 30–40°. Температура пламени соответствует процессу сгорания и образования при этом сажистых частиц, а температура газа – суммарному эффекту, включающему работу газа, изменение его внутренней энергии, диссоциацию и диффузию в объеме камеры сгорания.

Расчеты, связанные с лучистым теплообменом в камере сгорания дизеля при работе на различных видах топлива, целесообразно производить не для усредненных, а для местных значений текущих параметров. Тепло, выделяющееся при сгорании топлив, идет на изменение внутренней энергии газа и совершение им внешней работы, что составляет индикаторные показатели. Остальная часть введенного тепла отдается стенкам за счет конвекции и радиации, а также расходуется на диссоциацию газа.

Коэффициент тепловыделения на основании первого начала термодинамики для элементарного участка рабочего хода двигателя запишем:

$$\Delta Q_i = (1 - \Psi_i) q_c Q_p^H \Delta x_i = \left\{ \frac{F_i C_i}{3600} \left[\left(\frac{T_{ni}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_i F_i}{3600} (T_i - T_w) \right\} \frac{\Delta Y_i}{6n}, \quad (1)$$

где Q_i – тепло, отведенное в охлаждающую среду; Ψ_i – характеристика горения по И.И. Вибе; q_c – удельная теплота сгорания в цилиндре [Дж/м³]; Q_p^H – низшая теплотворность топлива; Δx_i – относительное тепловыделение при сгорании топлива; F_i – текущая поверхность теплообмена цилиндра; C_i – приведенная текущая излучательная способность факела; α_i – текущее значение коэффициента теплоотдачи конвекцией; T_{ni} , T_i – текущие значения температур пламени и газов в цилиндре; T_w – температура стенок камеры сгорания; ΔY_i – элементарный угол поворота коленвала; n – частота вращения коленвала в минуту.

Приращение относительного тепловыделения на участке ΔY_i равно:

$$\Delta X_i = \frac{\Delta X_i}{\Delta Y_i} \Delta Y_i = 6,91 \frac{z+1}{Y_i} \left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^z e^{-6,91(Y_i/Y_z)^{z+1}} \cdot \Delta Y_i, \quad (2)$$

где z – характеристика горения; e – число Эйлера; Y_z – условная длительность процесса сгорания.

Температура сажистых частиц в рассматриваемом процессе – наибольшая температура (≈ 2500 К) в данной системе тел ($T_z \approx 1850$ К).

В связи с этим целесообразно ввести понятие относительных температур газов $Q_i = T_i / T_{ni}$ и стенок $Q_w = T_w / T_{ni}$.

После преобразования приведенные зависимости будут равны:

$$\begin{aligned} (1 - \psi_i) q_{\text{ц}} Q_p^H \cdot 6,91 \frac{z+1}{Y_i} \left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^z e^{-6,91\left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^{z+1}} = \\ = \frac{F_i}{3600} \cdot \frac{\Delta Y_i}{6n} \{C_i T_{ni}^4 \cdot 10^{-8} (1 - Q_w^4) + \alpha_i T_{ni} (\theta_i - \theta_w)\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Температура стенок камеры сгорания T_w существенно ниже температуры пламени – $Q_w < 1$, а $\theta_w \rightarrow 0$. В первом приближении не считаются и с θ_w . Далее найдем:

$$\frac{(1 - \psi_i) q_{\text{ц}} Q_p^H \cdot 6,91 \frac{z+1}{Y_i} \left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^z e^{-6,91\left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^{z+1}}}{F_i \varepsilon_i C_s T_{ni}^4 \cdot 10^{-8}} = 1 + \frac{\alpha_i \cdot 10^8}{\varepsilon_i C_s T_{ni}^3} \theta_i, \quad (4)$$

где ε_i – приведенная степень черноты системы; C_s – излучательная способность абсолютно черного тела; θ_i – относительная температура газов.

Выражение в левой части уравнения есть отношение теплосодержания газов в данный момент к теплу, переданному лучеиспусканием на стенку гильзы цилиндров, поршень и головку цилиндров, представляет собой критерий Больцмана B_0 . Отношение введенного в цилиндр А к количеству тепла, переданного лучеиспусканием Б, можно назвать критерием Больцмана для камеры сгорания двигателя:

$$B_{0i} = \frac{A}{B} = \frac{6,91 \cdot 3600 q_{\text{ц}} Q_p^H \frac{z+1}{Y_i} \left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^z e^{-6,91\left(\frac{Y_i}{Y_z}\right)^{z+1}} n}{10^{-8} \cdot 4,96 F_i \varepsilon_i C_s T_{ni}^4}. \quad (5)$$

Далее приводим к виду зависимость:

$$\theta_i = \frac{(1 - \psi_i) B_{0i} - 1}{M}, \quad (6)$$

где $M = \frac{\alpha_i 10^8}{\varepsilon_i C_s T_{ni}^3}$ – коэффициент, который зависит от угла поворота коленчатого вала, так же как и величина ψ_i . В связи с этим уравнение можно привести к виду:

$$\theta_i = a_i \cdot B_{0i} - b_i, \quad (7)$$

где a_i и b_i – коэффициенты, зависящие от типа двигателя и угла Y_i .

Для ориентировочных расчетов, по данным Л.М. Белинского, можно принять зависимость

$$\theta_i = \exp[-0,106 \cdot (2B_{0i})^{0,24}]. \quad (8)$$

Эта зависимость учитывает тот факт, что при малых значениях Y_i , соответствующих началу горения, численное значение критерия B_{0i} велико и ему отвечают малые значения относительной температуры газов θ . По мере развития процесса горения, т. е. с ростом Y_i , критерий B_0 уменьшается, а θ стремится к единице.

Степень черноты светящегося пламени определяют по уравнению:

$$\varepsilon_T^1 = 1 - e^{-1,3p_i l_{\text{эф}}}, \quad (9)$$

где p_i – текущее давление в цилиндре; $l_{\text{эф}}$ – эффективная толщина излучающего слоя.

Основной величиной, определяющей силу излучения пламени, является концентрация сажистых частичек в единице объема.

Лучистый тепловой поток, согласно закону Стефана – Больцмана, определяется выражением:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_i C_s \left[\left(\frac{T_{ni}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

где $\varepsilon_i = \varepsilon_{wi} \varepsilon_{ni}$ – текущая система излучения (приведенная степень черноты).

Приведенные зависимости позволяют проследить кинетику развития лучистого теплообмена в камере сгорания переменного объема, т. е. в синтезе рабочего процесса ДВС.

Заключение

Можно сделать следующие выводы: если при работе дизельного двигателя на дизельном топливе выбросы сажи составляют 100 %, то на метане – 0 %, а окислов азота NO – 65 и 35 % соответственно, по данным ООО «ГГМТ». Это объясняется преобладающим лучистым излучением, имеющим температуру пламени от 2400 до 2500 К, приводящим к окислению азота воздуха (65 %), температура же газа на метане – от 1600 до 1850 К, что дает 35 % окисления азота воздуха и отсутствие сажи.

Библиография

1. Алексеев В.А., Ильин П.И., Болоев П.А. О возможности работ двигателя внутреннего сгорания на газовом топливе // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 45. – С. 70–74.
2. Болоев П.А., Степанов Н.В., Ильин П.И. и др. Определение влияния различных видов альтернативного топлива на образование токсичных компонентов при работе двигателей // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию образования ИрГСХА. – Иркутск, 2014. – С. 116–119.
3. Бодякина Т.В., Болоев П.А., Гергенова Т.П. Анализ технологий преобразования возобновляемых источников энергии в моторное топливо // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 3–6.
4. Болоев П.А., Хитерхеева Н.С., Гергенова Т.П. Улучшение экологических показателей альтернативных моторных топлив. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2021. – С. 36–65.
5. Ларионов Л.Б., Болоев П.А., Ильин П.И. и др. Целесообразность использования альтернативного топлива // Известия МГТУ – МАМИ. – 2015. – Т. 1, № 3 (25). – С. 76–80.
6. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. и др. Токсичность отработавших газов дизелей. – Уфа: Изд-во БГАУ, 2000. – 144 с.
7. Петриченко Р.М., Оносовский В.В. Рабочие процессы поршневых машин. – Л.: Машиностроение, 1972. – 168 с.
8. <https://www.interfax.ru/business/815068> (дата обращения: 25.08.2022).

Bibliography

1. *Alekseev V.A., Ilyin P.I., Boloev P.A.* On the possibility of operation of an internal combustion engine on gas fuel // *Vestnik IrGSKHA*. – 2011. – N 45. – P. 70–74.
2. *Boloev P.A., Stepanov N.V., Il'in P.I. et al.* Determination of the effect of various types of alternative fuels on the formation of toxic components during engine operation // *Collection of articles Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia. Materials of the III International Scientific – Practical Conference, dedicated to the 80th anniversary of the Education of the IrGSKHA* – 2014. – P. 116–119.
3. *Bodyakina T.V., Boloev P.A., Gergenova T.P.* Analysis of technologies for converting renewable energy sources into motor fuel // *Tractors and agricultural machinery*. – 2019. – N 5. – P. 3–6.
4. *Boloev P.A., Khiterheeva N.S., Gergenova T.P.* Improving the environmental performance of alternative motor fuels. – Ulan-Ude: Buryat State University Publishing House, 2021. – P. 36–65.
5. *Larionov L.B., Boloev P.A., Ilyin P.I. et al.* The feasibility of using alternative fuels // *Izvestiya MGTU MAMI*. – 2015. – Vol. 1, N 3 (25). – P. 76–80.
6. *Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. et al.* Toxicity of diesel exhaust gases. – Ufa: Bashkir State University, 2000. – 144 p.
7. *Petrichenko R.M., Onosovskiy V.V.* Working processes of reciprocating machines. – L.: Publishing House «Mechanical Engineering», 1972. – 168 p.
8. <https://www.interfax.ru/business/815068> (date of access: 28.08.2022).