

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
И ШИРИНЫ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛАМЕНИ
НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НЕСГОРЕВШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
И ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЕ
С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ**

А.П. Шайкин

a_shajkin@mail.ru

И.Р. Галиев

sbs777@yandex.ru

**Тольяттинский государственный университет,
г. Тольятти, Самарская обл., Российская Федерация**

Аннотация

Исследована взаимосвязь полноты сгорания топлива и токсичности отработавших газов (несгоревших углеводородов) с фундаментальными характеристиками распространения пламени (скоростью распространения пламени и шириной зоны химических реакций). Представлены функциональные зависимости полноты сгорания топлива и концентрации несгоревших углеводородов от фундаментальных характеристик распространения пламени, максимальной температуры пламени, температуры погасания пламени, а также толщины несгоревшего слоя топлива у стенок камеры сгорания. Сравнение полноты сгорания топлива, рассчитанной по предлагаемой формуле, с полнотой сгорания топлива, полученной с использованием экспериментальной индикаторной диаграммы, показало хорошее соответствие. Исследована взаимосвязь эмиссии несгоревших углеводородов с полнотой сгорания топлива. Выявлено, что увеличение полноты сгорания топлива приводит к снижению эмиссии несгоревших углеводородов, что объясняется сокращением доли несгоревшего топлива в пристеночном слое. Предложен новый метод расчета несгоревших углеводородов в отработавших газах двигателя. Показано, что предлагаемый метод позволяет определить химический состав топливовоздушной смеси и значения характеристик распространения пламени, обеспечивающие снижение выбросов несгоревших углеводородов. Результаты работы

Ключевые слова

Полнота сгорания, несгоревшие углеводороды, ширина, скорость, пламя

могут быть использованы при создании (совершенствовании) методов увеличения полноты сгорания композитного топлива и снижения токсичности отработавших газов в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания и других энергетических установок

Поступила 12.01.2018

© Автор(ы), 2019

Работа выполнена в рамках государственного заказа, проект № 394, при поддержке Правительства Самарской области в рамках программы назначения денежных выплат для молодых ученых и конструкторов, работающих в Самарской области, а также при поддержке Минобрнауки России в рамках программы назначения стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых

В связи с постоянным ростом цен на топливо и законодательным ужесточением концентрации токсичных компонентов в отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) становятся актуальными вопросы дальнейшего улучшения их экологических и энергетических характеристик. В настоящее время в транспортной энергетике сформировался устойчивый тренд на применение альтернативных топлив и химических регуляторов горения [1]. Научная сторона этого развития формируется в том числе исследованиями активации горения добавками водорода в традиционные углеводородные топлива. Начиная с 2000-х гг. большую популярность набирает *Hythane* — смесь природного газа с водородом [2]. *Hythane* успешно сочетает в себе преимущества природного газа (дешевизну топлива) и водорода (экологичность и высокую теплоту сгорания). Для создания новых двигателей и энергетических установок, использующих *Hythane*, необходимо глубокое изучение процесса сгорания композитного топлива и его влияние на энергетические, экономические и экологические характеристики [3].

Энергетические характеристики двигателя определяются величиной тепловыделения и, следовательно, полнотой сгорания топлива, а несгоревшие углеводороды (СН), входящие в состав ОГ, способствуют возникновению у человека респираторных и онкологических заболеваний. Настоящая работа посвящена изучению этих двух показателей двигателя. Несмотря на достигнутые успехи в увеличении полноты сгорания топлива и снижении СН, до сих пор нет понимания механизма, объясняющего комплексное влияние на них характеристик турбулентного пламени (пульсационной скорости, масштабов турбулентности, ширины зоны химических реакций (ЗХР), турбулентной скорости), формы и размера камеры сгорания (КС), состава топливовоздушной смеси (ТВС), размеров

щелей в КС и температуры погасания пламени. В результате существующие сейчас решения по улучшению полноты сгорания топлива и снижению концентрации СН в ОГ носят интуитивный характер, а модели, прогнозирующие их значения, имеют высокий уровень эмпиризма, низкую точность и работают в узком диапазоне рабочих режимов двигателя, что затрудняет их использование при проектировании малоэмиссионных и энергоэффективных КС. Таким образом, выбранная тема исследований актуальна как в теоретическом, так и в практическом плане.

Цель работы — исследование взаимосвязи полноты сгорания топлива и несгоревших углеводородов в ОГ двигателя с характеристиками пространства турбулентного пламени.

Вывод основных соотношений. Для расчета полноты сгорания топлива χ предложена формула, которая была выведена с использованием уравнения состояния и учетом равенства давлений в сгоревшей и несгоревшей зонах КС:

$$\chi = \frac{1}{\frac{R_b T_b}{R_f T_{b\min}} \frac{V_u}{V_c - V_u} + 1}, \quad (1)$$

где R_b — газовая постоянная продуктов сгорания; T_b — максимальная температура пламени; R_f — газовая постоянная ТВС; $T_{b\min}$ — температура погасания пламени; V_c — объем КС; V_u — объем несгоревшего топлива.

Поскольку смесь Нуthane с воздухом сжигается во всем объеме КС, то объем несгоревшего топлива V_u зависит от объема щелей в КС (где топливо не сгорает), толщины слоя несгоревшего топлива у стенок КС и площади КС в момент окончания сгорания:

$$V_u = \delta_u S_k + V_{cr}, \quad (2)$$

где δ_u — толщина слоя несгоревшего топлива у стенки КС; S_k — площадь КС в момент окончания сгорания топлива; V_{cr} — объем щелей в КС.

Площадь и объем КС в момент завершения сгорания зависят от размеров и формы камеры, расположения свечи зажигания и продолжительности процесса сгорания, которая была найдена по методике академика Б.С. Стечкина, т. е. по политропе расширения.

Толщину пристеночного несгоревшего слоя рассчитывали по предлагаемой формуле, которая была получена с использованием закона В.А. Михельсона и теории пределов распространения пламени Я.Б. Зельдовича [4]:

$$\delta_u = \frac{U_{\text{п}} \delta_t}{\left(S_{\text{КС}}/S_{\text{ф.п}}\right)_{\text{max}} U_t}, \quad (3)$$

где $U_{\text{п}}$ — нормальная скорость пламени; $\left(S_{\text{КС}}/S_{\text{ф.п}}\right)_{\text{max}}$ — предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС ($S_{\text{КС}}$) к площади поверхности фронта пламени ($S_{\text{ф.п}}$); δ_t — ширина зоны турбулентного горения; U_t — скорость распространения турбулентного пламени.

Нормальную скорость пламени рассчитывали по известной формуле [5] с учетом экспериментальных данных, полученных в техническом университете г. Эйндховен [6], и поправок [7], учитывающих особенности сжигания смесей метана с водородом в ДВС:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{п0}} \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^{\gamma} \left(\frac{P_u}{P_0}\right)^{\beta}, \quad (4)$$

где $U_{\text{п0}}$ — нормальная скорость пламени при температуре T_0 и давлении P_0 ; T_u и P_u — температура и давление при сгорании; γ и β — коэффициенты.

Температуру погасания пламени ($T_{b\text{min}}$) и предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС ($S_{\text{КС}}$) к площади поверхности фронта пламени ($S_{\text{ф.п}}$) определяли с использованием теории пределов распространения пламени академика Я.Б. Зельдовича [4]. В результате было выявлено, что сжигание стехиометрических смесей с добавкой водорода приводит к увеличению $\left(S_{\text{КС}}/S_{\text{ф.п}}\right)_{\text{max}}$, т. е. повышается устойчивость горения. Полученный результат соответствует ранее проведенным отечественным и зарубежным исследованиям [8], в которых зафиксировано увеличение устойчивости горения и расширение концентрационных пределов распространения пламени при добавках водорода.

Известно, что объемная концентрация СН, определяемая газоанализатором, равна отношению объема частиц СН к объему продуктов сгорания. Предположительно, объем частиц СН зависит от объема несгоревшего топлива (недогорание — главная причина образования СН) и доли углерода в ТВС (именно углерода в ТВС недостаточно и поэтому его количество определяет концентрацию СН). Таким образом, для расчета концентраций СН предлагаются формулы:

$$\text{СН} = \text{СН}_{\text{max}} \frac{V_u}{V_c}, \quad (5)$$

$$CH_{\max} = g_C \frac{M_T}{M_{CH}} \cdot 10^6, \quad (6)$$

где g_C — массовая доля углерода в ТВС; M_T — молекулярная масса топлива; M_{CH} — средняя молекулярная масса несгоревших углеводородов.

На рис. 1 приведена расчетная зависимость максимальной концентрации СН от коэффициента избытка воздуха α и доли добавляемого в топливо водорода. Видно, что обеднение ТВС и добавление водорода снижает значения CH_{\max} , что объясняется уменьшением доли углерода в ТВС.

Таким образом, использование CH_{\max} позволяет на этапе проектирования и доводки ДВС определить необходимый состав ТВС и вид топлива, обеспечивающие требуемый уровень СН в ОГ.

Для определения связи полноты сгорания топлива с концентрацией СН в ОГ предложена формула, которая получена с использованием уравнения состояния идеального газа, учетом равенства давлений в сгоревшей и несгоревшей зонах КС и зависимости концентрации СН от объема несгоревшего топлива (V_u):

$$\chi = \frac{CH_{\max} - CH}{CH_{\max} + CH \left(\frac{R_b T_b}{R_f T_{b\min}} - 1 \right)}. \quad (7)$$

Полученная формула позволяет рассчитать необходимую полноту сгорания топлива, а значит, и энергетические характеристики ДВС, обеспечивающие требуемый экологическим законодательством уровень токсичности СН в ОГ.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для проверки предлагаемых методов расчета полноты сгорания топлива и концентрации СН, учитывающих характеристики распространения пламени, были экспериментально найдены величины, входящие в формулы (1)–(7). Исследования проводились на экспериментальном стенде. Основу стенда

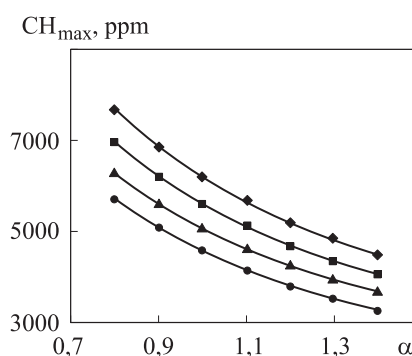


Рис. 1. Зависимость CH_{\max} от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода:

◆ — $r_H = 0\%$; ■ — $r_H = 29\%$; ▲ — $r_H = 47\%$; ● — $r_H = 58\%$

составляла установка УИТ-85, представляющая собой одноцилиндровый четырехтактный ДВС с искровым зажиганием. Работа ДВС осуществлялась при угле опережения зажигания, равном 13° , и частоте вращения коленчатого вала двигателя $n_{квд} = 900 \text{ мин}^{-1}$. В качестве топлива использовался Нуthane с объемным содержанием водорода $r_n = 29, 47$ и 58% . Фундаментальные характеристики распространения пламени (скорость распространения и ширина зоны химических реакций) и максимальную температуру пламени определяли экспериментально, используя метод ионизационных зондов [9, 10]. Концентрацию СН в ОГ определяли газоанализатором «АВТОТЕСТ-02 СО-СО₂-СН-О₂-NO_x- α -Т».

Методика эксперимента заключалась в параллельной регистрации сигналов ионизационных зондов, искры зажигания, датчиков положения коленчатого вала, расхода воздуха и давления, а также в записи осциллограмм с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя в память ПК. В результате проведенных исследований получены значения максимального давления в КС, максимальной температуры пламени, ширины зоны химических реакций, скорости распространения турбулентного пламени и концентрации СН во время работы экспериментальной установки при разных добавках водорода в Нуthane и коэффициентах избытка воздуха.

Зависимость ширины пристеночного несгоревшего слоя и полноты сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе приведена на рис. 2.

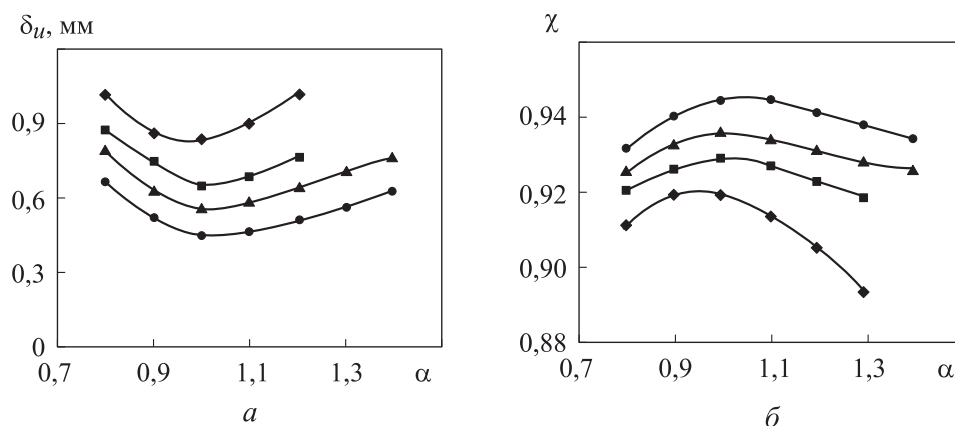


Рис. 2. Зависимость ширины пристеночного несгоревшего слоя (*a*) и полноты сгорания топлива (*б*) от коэффициента избытка воздуха и доли водорода:

◆ — $r_n = 0$; ■ — $r_n = 29 \%$; ▲ — $r_n = 47 \%$; ● — $r_n = 58 \%$

Из рис. 2, а следует, что использование стехиометрических смесей и добавок водорода приводит к сужению пристеночного несгоревшего слоя. Так, например, при $\alpha = 1$ добавка водорода в количестве 58 % приводит к уменьшению ширины пристеночного несгоревшего слоя на 52 %. Данный эффект объясняется промотирующим влиянием водорода на процесс сгорания, в результате уменьшается ширина ЗХР пламени и увеличивается интенсивность сгорания топлива у стенки КС.

На рис. 2, б видно, что с увеличением доли водорода в топливе растет полнота сгорания топлива, что объясняется ростом скорости сгорания топлива в пристеночном слое и уменьшением ширины ЗХР пламени. К подобным результатам пришли английские ученые из Бирмингемского университета [11] и ученые из корейского университета Ёнсе, проводившие исследования влияния добавок водорода на полноту сгорания топлива [12]. Сравнение полноты сгорания топлива, рассчитанной по предлагаемой формуле (1) и полученной на основе анализа экспериментальной индикаторной диаграммы с применением первого закона термодинамики, уравнения состояния и двухзонной модели сгорания показало сходимость между данными более 85 %.

Зависимость экспериментальной и расчетной концентрации СН от состава ТВС и доли водорода в топливе приведена на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что расчетная концентрация СН близка к концентрации СН, полученной экспериментально при варьировании коэффициентом избытка воздуха и долями водорода в топливе. Расчетные и экспериментальные значения СН показывают, что для богатых ТВС добавка водорода в количествах, предлагаемых в настоящей работе, не приводит к заметному снижению токсичности выхлопа. В свою очередь, при обеднении ТВС происходит убыль концентрации СН в ОГ при тех же концентрациях добавляемого водорода. Причем уменьшение тем интенсивнее, чем беднее ТВС. К подобным результатам пришли исследователи из Гентского университета [13], университета Цинхуа [14] и Лундского университета при изучении влияния добавок водорода в количестве 10 %, 20 % ($n_{\text{квд}} = 3800 \text{ мин}^{-1}$), 30 %, 55 % ($n_{\text{квд}} = 800 \text{ мин}^{-1}$) и 25 % ($n_{\text{квд}} = 1200 \text{ мин}^{-1}$)

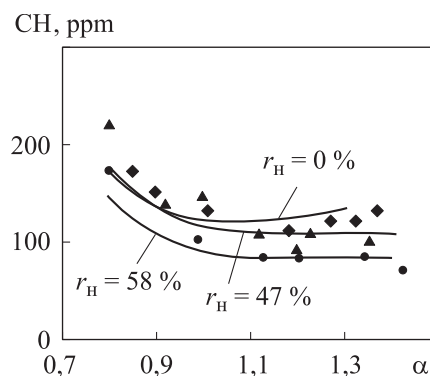


Рис. 3. Зависимость концентрации СН от коэффициента избытка воздуха и доли водорода:

— — расчет; \diamond , \blacktriangle , \bullet — эксперимент;
 \diamond — $r_H = 0$; \blacktriangle — $r_H = 47$ %; \bullet — $r_H = 58$ %

соответственно на динамику СН в ОГ ДВС. Таким образом, предложенный метод расчета СН, основанный на использовании химико-физических свойств ТВС и характеристик распространения пламени, может быть использован для прогнозирования и расчета содержания СН в ОГ поршневого двигателя.

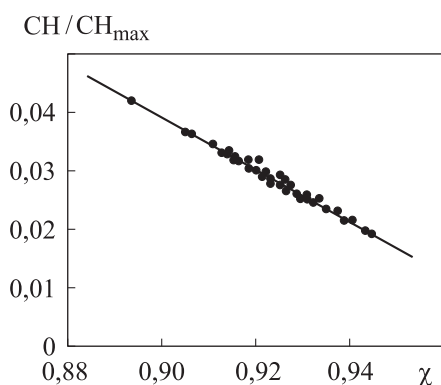


Рис. 4. Зависимость полноты сгорания топлива от отношения $\text{СН}/\text{СН}_{\text{max}}$

Связь полноты сгорания топлива с отношением $\text{СН}/\text{СН}_{\text{max}}$ показана на рис. 4.

Отношение концентрации СН к максимально возможной концентрации СН_{max} показывает долю СН, источником которых является недогорание топлива, т. е. $\text{СН}/\text{СН}_{\text{max}}$ зависит только от процесса сгорания. На рис. 4 видно, что увеличение полноты сгорания топлива приводит к линейному снижению отношения $\text{СН}/\text{СН}_{\text{max}}$, что объясняется сокращением доли несгоревшего топлива в пристеночном слое, который является основным источником образования СН в ДВС.

Результаты экспериментального и теоретического исследований характеристик распространения пламени в КС ДВС с искровым зажиганием и их влияние на полноту сгорания *Nu*thane и токсичность отработавших газов позволяют сделать следующие выводы.

Заключение. Результаты экспериментального и теоретического исследований характеристик распространения пламени в КС ДВС с искровым зажиганием и их влияние на полноту сгорания *Nu*thane и токсичность отработавших газов позволяют сделать следующие выводы.

1. Теоретически и экспериментально показано, что связь характеристик распространения пламени с полнотой сгорания композитного топлива имеет сложный, нелинейный характер, который зависит от химического состава горючей смеси и температуры в КС.

2. Выявлено, что предложенная формула, использующая фундаментальные характеристики распространения пламени, позволяет с требуемой точностью рассчитать полноту сгорания композитного топлива. Это говорит о целесообразности применения данной формулы на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных КС двигателей и энергоустановок.

3. Изучен механизм комплексного влияния химико-физических свойств топлива, температуры погасания пламени, полноты сгорания топлива и характеристик распространения турбулентного пламени на эмиссию СН в ДВС.

3. Изучен механизм комплексного влияния химико-физических свойств топлива, температуры погасания пламени, полноты сгорания топлива и характеристик распространения турбулентного пламени на эмиссию СН в ДВС.

4. Предложен новый метод расчета СН в ОГ двигателя. Показано, что предлагаемый метод позволяет определить химический состав топливо-воздушной смеси и значения характеристик распространения пламени, обеспечивающие снижение СН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., et al. Hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG): a futuristic fuel for internal combustion engines. *Therm. Sci.*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 1145–1154. DOI: 10.2298/TSCI100730044N
- [2] Rakopoulos C.D., Scott M.A., Kyritsis D.C., et al. Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines. *Energy*, 2008, vol. 33, no. 2, pp. 248–255. DOI: 10.1016/j.energy.2007.05.009
- [3] Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane–hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Russ. Aeronaut.*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 249–253. DOI: 10.3103/S106879981602015X
- [4] Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., et al. The mathematical theory of combustion and explosions. Consultants Bureau, 1985.
- [5] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. McGraw–Hill, 1988.
- [6] Hermanns R.T. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. Doctoral thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [7] Verhelst S., Woolley R., Lawes M., et al. Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen–air mixtures at engine-like conditions. *Proc. Combust. Inst.*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 209–216. DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.042
- [8] Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М., Физматлит, 2008.
- [9] Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1206–1208. DOI: 10.1134/S1063784216080247
- [10] Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. и др. Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара, Самарский научный центр РАН, 2016.
- [11] Chang W. An improved method of investigation of combustion parameters in a natural gas fuelled SI engine with EGR and H₂ as additives. Doctoral thesis. University of Birmingham, 2002.
- [12] Park J., Cha H., Song S. A numerical study of a methane–fueled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 5153–5162. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.019

- [13] Sierens R. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 135–140. DOI: 10.1115/1.483191
- [14] Ma F., Naeve N., Wang M., et al. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines. *Natural Gas*. IntechOpen, 2010, pp. 307–332.

Шайкин Александр Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета (Российская Федерация, 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14).

Галиев Ильдар Ринатович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Тольяттинского государственного университета (Российская Федерация, 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шайкин А.П., Галиев И.Р. Влияние скорости распространения и ширины зоны турбулентного пламени на концентрацию несгоревших углеводородов и полноту сгорания топлива в двигателе с искровым зажиганием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 111–123.
DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-111-123

EFFECT OF TURBULENT FLAME PROPAGATION VELOCITY AND ZONE WIDTH ON THE UNBURNT HYDROCARBON CONCENTRATION AND COMBUSTION EFFICIENCY IN A SPARK-IGNITION ENGINE

A.P. Shaykin
I.R. Galiev

a_shajkin@mail.ru
sbs777@yandex.ru

Togliatti State University, Togliatti, Samara Region, Russian Federation

Abstract

The investigation considers how combustion efficiency and exhaust gas (unburnt hydrocarbon) toxicity are linked to the fundamental flame propagation characteristics (flame propagation velocity and reaction zone width). We present combustion efficiency and unburnt hydrocarbon concentration as functions of fundamental flame propagation characteristics, maximum flame temperature, flame failure temperature and thickness of the unburnt fuel layer adjacent

Keywords

Combustion efficiency, unburnt hydrocarbons, width, velocity, flame

to the combustion chamber walls. Comparing combustion efficiency computed according to the equation proposed to combustion efficiency derived by using an experimentally obtained indicator diagram showed that the data are in good agreement. We studied the connection between unburnt hydrocarbon emission and combustion efficiency. We detected that increasing combustion efficiency leads to lower unburnt hydrocarbon emission, which is explained by reduction of the unburnt fuel ratio in the layer adjacent to the wall. We propose a new technique for calculating unburnt hydrocarbon amount in engine exhaust gases. We show that our technique makes it possible to determine the chemical composition of the air-fuel mixture and the values of flame propagation characteristics that ensure a decrease in unburnt hydrocarbon emission. The results of our study may be used to develop or refine methods of increasing combustion efficiency of composite fuels and reducing exhaust gas toxicity in combustion chambers of internal combustion engines and other power plants

Received 12.01.2018

© Author(s), 2019

The study was conducted as part of a government order, project no. 394, supported by the Government of Samara Region as part of the monetary benefit program for young scientists and designers of Samara Region, as well as by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the program providing young scientists with scholarships of the President of the Russian Federation

REFERENCES

- [1] Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., et al. Hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG): a futuristic fuel for internal combustion engines. *Therm. Sci.*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 1145–1154. DOI: 10.2298/TSCI100730044N
- [2] Rakopoulos C.D., Scott M.A., Kyritsis D.C., et al. Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines. *Energy*, 2008, vol. 33, no. 2, pp. 248–255. DOI: 10.1016/j.energy.2007.05.009
- [3] Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane–hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Russ. Aeronaut.*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 249–253. DOI: 10.3103/S106879981602015X

- [4] Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., et al. The mathematical theory of combustion and explosions. Consultants Bureau, 1985.
- [5] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. McGraw–Hill, 1988.
- [6] Hermanns R.T. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. Doctoral thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [7] Verhelst S., Woolley R., Lawes M., et al. Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen–air mixtures at engine-like conditions. *Proc. Combust. Inst.*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 209–216. DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.042
- [8] Gel'fand B.E., Popov O.E., Chayvanov B.B. Vodorod: parametry goreniya i vzryva [Hydrogen: the parameters of combustion and explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008.
- [9] Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1206–1208. DOI: 10.1134/S1063784216080247
- [10] Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., et al. Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyanie na obrazovanie nesgorevshikh uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnyuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiem [Characteristics of flame propagation and its influence on formation of unburned hydrocarbons and nitric oxide in the exhaust gases with addition of hydrogen to fuel-air mixture of power plants with spark ignition]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAS Publ., 2016.
- [11] Chang W. An improved method of investigation of combustion parameters in a natural gas fuelled SI engine with EGR and H₂ as additives. Doctoral thesis. University of Birmingham, 2002.
- [12] Park J., Cha H., Song S. A numerical study of a methane–fuelled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 5153–5162. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.019
- [13] Sierens R. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 135–140. DOI: 10.1115/1.483191
- [14] Ma F., Naeve N., Wang M., et al. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines. *Natural Gas*. IntechOpen, 2010, pp. 307–332.

Shaykin A.P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Power Engineering and Control Systems, Togliatti State University (Belorusskaya ul. 14, Togliatti, Samara Region, 445020 Russian Federation).

Galiev I.R. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vehicle Design and Operation, Togliatti State University (Belorusskaya ul. 14, Togliatti, Samara Region, 445020 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shaykin A.P., Galiev I.R. Effect of turbulent flame propagation velocity and zone width on the unburnt hydrocarbon concentration and combustion efficiency in a spark-ignition engine. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 4, pp. 111–123 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-111-123

	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография авторов Э.Л. Макарова, Б.Ф. Якушина</p> <p>«Теория свариваемости сталей и сплавов»</p> <p>Рассмотрены теоретические и практические аспекты свариваемости конструкционных сталей и сплавов. Приведены экспериментальные методы оценки показателей свариваемости с использованием сварочных технологических проб и специализированных машинных испытаний. Показана возможность применения расчетных методов, реализуемых с помощью компьютерных технологий на базе специализированного программного обеспечения. На основе анализа металлургических процессов в сварочной ванне, кристаллизации металла шва, фазовых и структурных превращений в твердом металле в процессе сварочного термического цикла трактуются результаты оценки свариваемости. Представлены принципиальные металлургические, технологические и конструктивные способы обеспечения достаточной свариваемости сталей и сплавов.</p> <p>Для разработчиков свариваемых материалов и инженеров-проектировщиков технологических процессов сварки конструкций, студентов и аспирантов, изучающих теорию сварочных процессов.</p> <p>По вопросам приобретения обращайтесь: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru http://baumanpress.ru</p>
--	---