

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НЕСГОРЕВШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ

© 2016

А.П. Шайкин, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»

И.Р. Галиев, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: несгоревшие углеводороды; тепловыделение; площадь; камера сгорания; заключительная фаза сгорания; турбулентность.

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования влияния тепловыделения и формы камеры сгорания на концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах поршневой энергоустановки с искровым зажиганием. Выявлено, что с увеличением площади камеры сгорания растет концентрация несгоревших углеводородов по причине увеличения площади пристеночных слоев, образующихся у стенок камеры сгорания. При этом отмечено, что помимо формы камеры сгорания важную роль в механизме образования несгоревших углеводородов играет процесс сгорания топлива в заключительной фазе сгорания, интенсивность которого оценивалась величиной тепловыделения. Анализ экспериментальных данных показал тенденцию снижения концентрации несгоревших углеводородов с ростом тепловыделения. Также выявлена целесообразность использования комплексного влияния состава топливовоздушной смеси, конструкции камеры сгорания и процессов, происходящих в ней, на динамику несгоревших углеводородов. Предложен комплекс параметров K , учитывающий влияние на эмиссию несгоревших углеводородов массовых долей углерода, водорода и кислорода в топливовоздушной смеси, площади камеры сгорания и тепловыделения в заключительной фазе сгорания. Комплекс K характеризует плотность тепловыделения при сгорании углеводородного топлива в пристеночном слое. Ожидается, что мероприятия, направленные на увеличение плотности тепловыделения и уменьшение концентрации углерода в топливовоздушной смеси, будут снижать K , а значит, и эмиссию несгоревших углеводородов. Получена линейная зависимость между предложенным комплексом параметров K и концентрацией несгоревших углеводородов. Таким образом, применение комплекса K позволит на стадиях проектирования и доводки энергоустановки оценить эффективность применения конструкторских решений, направленных на улучшение экологических характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Недавние результаты Всемирной организации здравоохранения [1], как и ранее проведенные исследования [2], показывают, что несгоревшие углеводороды (СН), являющиеся неотъемлемой частью выхлопных газов энергоустановок, способствуют возникновению и развитию у человека респираторных и онкологических заболеваний. Поэтому вопросы сокращения выбросов выхлопных газов энергоустановок остаются актуальными. Получившие широкую популярность в зарубежной [3–5] и отечественной [5–9] литературе альтернативные экологически чистые источники энергии (например, водород), согласно прогнозу американского энергетического агентства [10], в ближайшие десятилетия, при существующих низких ценах на углеводородное топливо, не получат широкого распространения из-за огромных затрат на перестройку всего топливно-энергетического комплекса. Поэтому методы конструктивного снижения токсичности выхлопных газов энергоустановки являются востребованными. Для успешного применения этих методов необходимо знать факторы, влияющие на эмиссию СН. Основной причиной образования СН является гашение пламени у стенок камеры сгорания (КС) и в ее зазорах, образуя в этих областях «замороженные» слои топливно-воздушной смеси (ТВС) [11; 12]. В связи с этим возникла актуальная проблема изучения характеристик сгорания ТВС вблизи стенок КС (т. е. в заключительной фазе сгорания) и их влияние на концентрацию СН в отработавших газах (ОГ) энергоустановки [13; 14]. Исследования

энергоустановок с искровым зажиганием различных конструкций показали, что в процессе рабочего хода сгорает только 90 % топлива [15]. Остальные 10 % при отсутствии каталитического нейтрализатора реагируют в процессе такта выпуска, создавая дополнительные потери в выпускной системе, и около 2 % поступают в атмосферу. В связи с этим можно предположить, что факторы, влияющие на топливную экономичность и энергоэффективность энергоустановки, воздействуют и на ее характеристики токсичности, в том числе и СН. Несмотря на большое количество исследований в данной области, до сих пор нет данных о комплексном влиянии на эмиссию СН состава ТВС, тепловыделения и формы КС в заключительной фазе сгорания. Кроме этого, анализ методов расчета СН в ОГ поршневых энергоустановок выявил сильное несоответствие (более 50 %) между расчетными и экспериментальными значениями [13]. Поэтому методы расчета концентрации СН требуют серьезной доработки.

Цель работы: изучить комплексное влияние на эмиссию СН состава ТВС, тепловыделения и формы КС в заключительной фазе сгорания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве опытных данных использовались результаты исследований, опубликованные в [16–18], которые проводились на газопоршневом двигателе Volvo TD102 при постоянном коэффициенте избытка воздуха ($\alpha=1,5$) и частоте вращения коленчатого вала, равной 1500 мин⁻¹. Форма КС двигателя менялась путем установки на пор-

шень головок различной конфигурации (рис. 1), при этом степень сжатия и объем КС оставались постоянными.

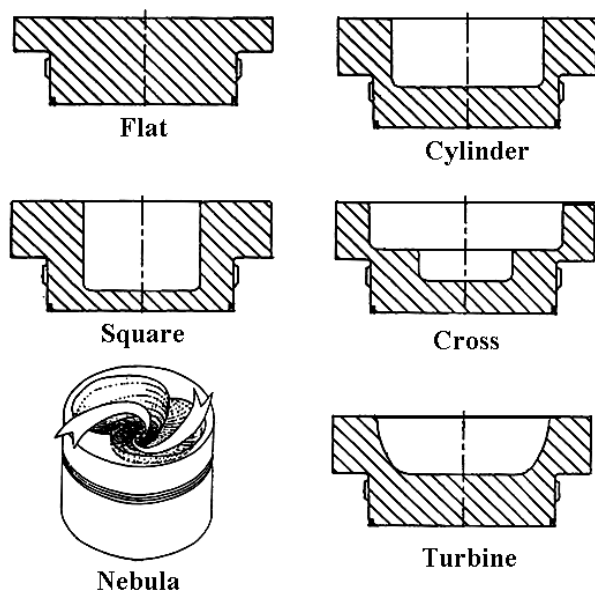


Рис. 1. Формы головок поршней, используемые в исследовании [16]

Представленные в статьях [16–18] данные позволили нам рассчитать общую площадь КС и величину тепловыделения в заключительной фазе сгорания. В настоящей работе продолжительность заключительной фазы сгорания соответствует интервалу времени от момента 90 % тепловыделения и до окончания сгорания топлива, т. е. завершения тепловыделения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 показано влияние на СН площади КС (S) в момент начала заключительной фазы сгорания. Результаты представлены в относительных величинах – отношения анализируемых значений к значениям при использовании головки поршня типа «flat».

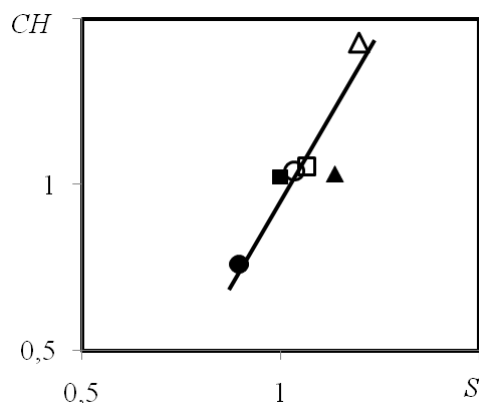


Рис. 2. Влияние относительных значений площади КС на концентрацию СН:
 ■ – flat, □ – cylinder, ▲ – square, △ – cross,
 ● – nebula, ○ – turbine

На рис. 2 видно, что с увеличением площади КС концентрация СН растет, что соответствует существующим представлениям о механизме образования СН [12; 19] и объясняется увеличением площади пристеночных слоев, образующихся у стенок КС. При этом стоит отметить равное содержание СН при использовании головок поршней типа «flat» и «square», имеющих разные площади КС. Данный факт объясняется увеличением турбулентности и, как следствие, увеличением интенсивности сгорания топлива и тепловыделения при переходе от головки поршня «flat» к «square». Это находит подтверждение на рис. 3, где в относительных значениях представлено влияние тепловыделения (Q) в заключительной фазе сгорания на концентрацию СН.

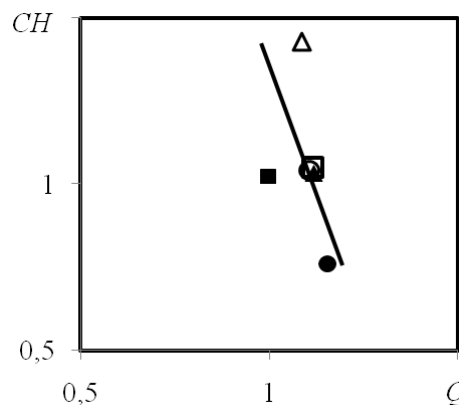


Рис. 3. Влияние относительных значений тепловыделения на концентрацию СН:
 ■ – flat, □ – cylinder, ▲ – square, △ – cross,
 ● – nebula, ○ – turbine

На рисунке видно увеличение тепловыделения и, следовательно, интенсивности сгорания топлива у стенок КС при переходе от головки поршня «flat» к «square». Рост тепловыделения объясняется ростом турбулентности потока в пристеночном слое, приводящим к интенсификации процессов тепло- и массообмена (рис. 4).

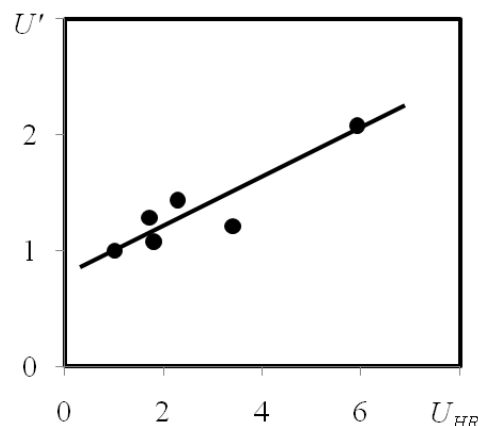


Рис. 4. Влияние относительных значений ульсационной скорости (U') на скорость тепловыделения (U_{HR}) в заключительной фазе сгорания

Влияние состава ТВС на СН представлено в ранее проведенных нами исследованиях [13; 20], в которых показана целесообразность использования соотношения массовых долей $g_c \cdot g_H / g_o$, т. к. углерод (g_c) и водород (g_H) участвуют во всех стадиях образования и развития СН, а кислород (g_o) способствует окислению и, как следствие, снижению СН. Таким образом, комплексное влияние на эмиссию СН состава ТВС, тепловыделения и площади КС в заключительной фазе сгорания топлива выражается обобщенным комплексом параметров K :

$$K = \frac{g_c \cdot g_H}{g_o} \cdot \frac{S}{Q}$$

Комплекс K характеризует плотность тепловыделения (Q/S) при сгорании углеводородного топлива в пристеночном слое. Ожидается, что мероприятия, направленные на увеличение плотности тепловыделения и уменьшение концентрации углерода в ТВС (например, при использовании промотирующих добавок водорода), будут снижать K , а значит, и эмиссию СН. На рис. 5 в относительных значениях показана связь предложенного комплекса параметров K с концентрацией СН.

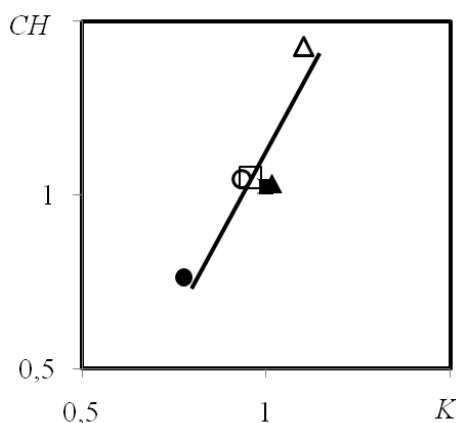


Рис. 5. Связь относительных значений концентрации СН с комплексом параметров K :

■ – flat, □ – cylinder, ▲ – square, △ – cross,
● – nebula, ○ – turbine

Выявлено наличие значительной (0,9) корреляции СН с комплексом параметров K . При этом видно, что значения K для головок поршней «flat» и «square» имеют схожие значения, т. е. большая для «square» площадь КС компенсируется более интенсивным сгоранием за счет большей, чем у «flat», турбулентности. Таким образом, предложенный комплекс параметров K определяет комплексное влияние состава ТВС, формы КС и тепловыделения на эмиссию СН. Применение комплекса K позволит на стадиях проектирования и доводки энергоустановки оценить эффективность применения конструкторских решений, направленных на улучшение экологических характеристик.

ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что с увеличением площади КС растет концентрация СН.

2. Отмечена тенденция снижения концентрации СН с ростом тепловыделения в заключительной фазе сгорания.

3. Получена линейная зависимость между концентрацией СН и предложенным комплексом параметров K , учитывающим влияние на СН массовых долей углерода, водорода и кислорода в ТВС, площади КС и тепловыделения в заключительной фазе сгорания.

Статья публикуется при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, а также в рамках государственного заказа, проект № 394.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Scovronick N. Reducing global health risks. Through mitigation of short-lived climate pollutants. Switzerland: World Health Organization, 2015. 148 p.
- Галиев Р.С., Галиева С.А., Худобердиева Т.И. Особенности развития аллергической реакции в условиях воздействия выхлопных газов автотранспорта различной интенсивности // Экология человека. 2007. № 10. С. 20–23.
- Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives / ed. by D. Minic. Vienna: InTech, 2012. 386 p.
- Yuan C., Xu J., He Y. Performance characteristics analysis of a hydrogen fueled free-piston engine generator // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. P. 3259–3271.
- Jhang S., Chen K., Lin S., Lin Y., Cheng W. Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions. Fuel. 2016. Vol. 172. P. 89–95.
- Канило П.М., Костенко К.В. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта // Автомобильный транспорт (Харьков). 2008. № 23. С. 107–113.
- Федянов Е.А., Левин Ю.В., Захаров Е.А., Иткис Е.М. Теоретическое исследование процесса сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля с добавками водорода // Двигателестроение. 2014. № 4. С. 16–18.
- Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М. Экспериментальная и расчетная оценки эффективности применения водорода на автомобиле // Автомобильная промышленность. 2013. № 6. С. 33–36.
- Павлов Д.А., Бортников Л.Н. Исследование влияния добавок водорода на показатели ДВС при гетерогенном способе формирования ТВС // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 183–187.
- Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040. US: Energy Information Administration, 2015. 154 p.
- Sher E. Handbook of air pollution from internal combustion engine. Pollutant formation and control. New York: Academic press, 1998. 665 p.
- Gupta H.N. Fundamentals of internal combustion engines. Delhi: PHI Learning, 2013. 658 p.
- Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени и их влияние на концентрацию несгоревших углеводородов при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2014. 203 с.
- Шайкин А.П., Ивашин П.В., Дурманова Н.А., Галиев И.Р. Влияние ширины зоны турбулентного горения

- на концентрацию несгоревших углеводородов // ELPIT-2015: материалы междунар. научно-техн. конференции. Самара, 2015. С. 99–101.
15. Flow and Combustion in Reciprocating Engines / eds. C. Arcoumanis, T. Kamimoto. Verlag: Springer, 2009. 420 p.
 16. Johansson B., Olsson K. Combustion chambers for natural gas Si engines part I: Fluid flow and combustion // SAE Technical Papers. 1995. Code 950469.
 17. Olsson K., Johansson B. Combustion chambers for natural gas Si engines part 2: combustion and emissions // SAE Technical Papers. 1995. Code 90411.
 18. Ting D.S.-K., Checkel M., Johansson B. The importance of high-frequency, small-eddy turbulence in spark ignited, premixed engine combustion // SAE Technical Papers. 1995. Code 90271.
 19. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
 20. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Расчет концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах газобаллонного автомобиля // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1-7. С. 1939–1942.
- REFERENCES**
1. Scovronick N. *Reducing global health risks. Through mitigation of short-lived climate pollutants*. Switzerland, World Health Organization, 2015. 148 p.
 2. Galiev R.S., Galieva S.A., Khudoberdieva T.I. Peculiarities of hypersensitivity reaction development in environment of vehicles exhaust gases of different intensity. *Ekologiya cheloveka*, 2007, no. 10, pp. 20–23.
 3. Minic D., ed. *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives*. Vienna, InTech, 2012. 386 p.
 4. Yuan C., Xu J., He Y. Performance characteristics analysis of a hydrogen fueled free-piston engine generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, pp. 3259–3271.
 5. Jhang S., Chen K., Lin S., Lin Y., Cheng W. Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions. *Fuel*, 2016, vol. 172, pp. 89–95.
 6. Kanilo P., Kostenko K. Aspects of formation of hydrogen power engineering and transport. *Avtomobilny transport (Kharkov)*, 2008, no. 23, pp. 107–113.
 7. Fedyanov E.A., Levin Yu.V., Zakharov E.A., Itkis E.M. Basic research of combustion in Wankel engine with hydrogen injection. *Dvigatellestroenie*, 2014, no. 4, pp. 16–18.
 8. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M. Experimental and accounting estimations of the efficiency of hydrogen application on board the car. *Avtomobilnaya promyshlennost'*, 2013, no. 6, pp. 33–36.
 9. Pavlov D.A., Bortnikov L.N. Research the performance engine at hydrogen additive in heterogeneous formation FAM. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 183–187.
 10. *Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040*. US, Energy Information Administration, 2015. 154 p.
 11. Sher E. *Handbook of air pollution from internal combustion engine. Pollutant formation and control*. New York, Academic press, 1998. 665 p.
 12. Gupta H.N. *Fundamentals of internal combustion engines*. Delhi, PHI Learning, 2013. 658 p.
 13. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.P. *Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyanie na kontsentratsiyu nesgorevshikh uglevodov pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiem* [Characteristics of flame propagation and their influence on the unburned hydrocarbons concentration when adding hydrogen to the fuel-air mixture of electric power plants with electric ignition]. Samara, SNTs RAN Publ., 2014. 203 p.
 14. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Dyrmanova N.A., Galiev I.P. The influence of turbulent combustion area width on the unburned hydrocarbons concentration. *Materialy mezhdunar. nauchno-tekhn. konferentsii "ELPIT-2015"*. Samara, 2015, pp. 99–101.
 15. Arcoumanis C., Kamimoto T., eds. *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*. Verlag, Springer, 2009. 420 p.
 16. Johansson B., Olsson K. Combustion chambers for natural gas Si engines part I: Fluid flow and combustion. *SAE Technical Papers*, 1995, code 950469.
 17. Olsson K., Johansson B. Combustion chambers for natural gas Si engines part 2: combustion and emissions. *SAE Technical Papers*, 1995, code 90411.
 18. Ting D.S.-K., Checkel M., Johansson B. The importance of high-frequency, small-eddy turbulence in spark ignited, premixed engine combustion. *SAE Technical Papers*, 1995, code 90271.
 19. Warnatz J., Maas U., Dibble R. *Gorenie. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv* [Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003. 352 p.
 20. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R. Calculate the concentration of unburnt hydrocarbons in the exhaust gas natural gas vehicles. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 1-7, pp. 1939–1942.

**THE INFLUENCE OF HEAT RELEASE AND THE COMBUSTION CHAMBER SHAPE
ON THE CONCENTRATION OF UNBURNED HYDROCARBONS IN THE EXHAUST GASES**

© 2016

A.P. Shaikin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Energy Machines and Control Systems”

I.R. Galiev, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Cars design and operation”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: unburned hydrocarbons; heat release; area; combustion chamber; combustion final phase; turbulence.

Abstract: The paper presents the results of experimental studies of the influence of heat release and the combustion chamber shape on the concentration of unburned hydrocarbons in the exhaust gases of reciprocating electric power plants with spark ignition. The authors determined that the increase in the combustion chamber area causes the increase in the unburned hydrocarbons concentration due to the increase in the area of near-wall layers formed on the combustion chamber walls. Moreover, it was noted that, except the combustion chamber shape, the process of fuel combustion in the final phase of combustion, the intensity of which was estimated by the heat release value, played the important role in the mechanism of unburned hydrocarbons formation. The analysis of experimental data showed the tendency of reduction of the unburned hydrocarbons concentration with the heat release increase. The authors also revealed the reasonability of application of complex influence of fuel-air mixture composition, the combustion chamber design, and the processes in it on the unburned hydrocarbons dynamics. The authors proposed using the K parameter complex considering the influence of carbon, hydrogen and oxygen mass fractions in the fuel mixture, the combustion chamber area, and the heat release during combustion final phase on the unburned hydrocarbon emission. It is expected that the measures aimed to increase thermal power density and to reduce carbon concentration in the fuel-air mixture will reduce K, and the unburned hydrocarbons concentration as well. The authors received the linear relationship between the proposed K parameter complex and the unburned hydrocarbons concentration. Thus, the use of K complex during the stages of design and operational development of power plants will allow evaluating the effectiveness of design solutions aimed to improve environmental performance.