

УДК 621.43

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НЕСГОРЕВШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГАЗОВОМ ДВС

© 2013 А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 16.01.2013

Экспериментально определена взаимосвязь скорости распространения пламени и его ионизации с концентрацией несгоревших углеводородов в газовом ДВС с искровым зажиганием. Показана целесообразность использования параметра (K), отражающего отношение нормальной и турбулентной скорости распространения пламени, для оценки влияния относительного изменения скоростей сгорания на выделение несгоревших углеводородов двигателем.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, пламя, скорость, распространение, ионизация, зонд, ионный ток, концентрация, несгоревшие углеводороды, зона.

В настоящее время на долю автомобильного транспорта приходится больше половины всех вредных выбросов в окружающую среду, которые являются главным источником загрязнения атмосферы, особенно в крупных городах. В среднем при пробеге 15 тыс. км за год каждый автомобиль сжигает 2 т топлива и около 26 - 30 т воздуха, в том числе 4,5 т кислорода, что в 50 раз больше потребностей человека. При этом автомобиль выбрасывает в атмосферу: угарного газа – 700, диоксида азота – 40, несгоревших углеводородов – 230 и твердых веществ – 5 кг/год [1]. Выявлено, что именно несгоревшие углеводороды (СН), являющиеся канцерогенами, способствуют возникновению у человека онкологических заболеваний [2]. В связи с этим, постоянно, законодательно ужесточаются требования к концентрации СН в отработавших газах (ОГ), что стимулирует производителей автомобильных двигателей создавать новые, более эффективные методы снижения токсичности.

Существуют различные варианты механизмов образования несгоревших СН в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). В некоторых работах выявлен рост эмиссии СН при сильном обеднении и обогащении топливной смеси, который объясняется неполным сгоранием топлива, из-за снижения температуры и скорости распространения фронта пламени [3, 4]. Современные исследования достоверно показывают, что основным источником СН в ОГ двигателя являются

замороженные слои и зазоры у стенок цилиндра [5], в которых происходит обрыв цепных химических реакций горения вблизи охлажденных стенок камеры сгорания (КС) вследствие снижения температуры во фронте пламени. Показано, что при увеличении температуры стенок КС с 72 до 147 °С концентрация несгоревших СН уменьшится вдвое [5]. То есть, если скорость теплоотдачи будет больше скорости тепловыделения, то будет происходить гашение пламени, и, как следствие, наблюдаться рост концентрации СН в ОГ. Поскольку скорость распространения фронта пламени определяет динамику тепловыделения в процессе сгорания, то можно предположить о ее влиянии на эмиссию СН в газовых ДВС с искровым зажиганием. Тем более, известно, что для бензиновых двигателей наблюдается заметная корреляция скорости распространения пламени с концентрацией несгоревших СН [4].

Экспериментальное определение скорости распространения пламени достаточно сложная и трудоемкая задача. Однако, вполне объективные представления о характере химических процессов, протекающих в двигателях, позволяют получить методы, основанные на использовании явления ионизации пламени. Суть данного явления заключается в образовании заряженных частиц (ионов и электронов) в результате химической (во фронте пламени), при сжигании углеводородных топлив, или термической (в продуктах сгорания) ионизации [6, 7]. При хемоионизации экзотермические стадии реакции, протекающие с участием молекул (атомов), находящихся в возбужденном состоянии, приводят к выделению энергии, достаточной для появления ионизации, которая возникает в элементарном химическом акте, с образованием пары иона и электрона. Для пламени, такой процесс идет как побочная реакция между компонентами, участвующими в ос-

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления». E-mail: td@tltsu.ru

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления». E-mail: ivashinp@rambler.ru

*Галиев Ильдар Ринатович, аспирант.
E-mail: sbs777@yandex.ru*

новой реакции горения. Также, имеются данные о непосредственном участии заряженных частиц в цепном механизме горения [8, 9]. Таким образом, процесс ионизации в зоне фронта пламени неразрывно связан с химическими процессами горения и может характеризовать скорость распространения пламени.

Существуют различные способы регистрации параметров ионизации. Наиболее простым и удобным является метод ионизационных зондов. Положительным свойством метода является большой диапазон измерений, относительная дешевизна и простота использования. Учет относительной степени ионизации в пламени может быть целесообразным для определения динамики изменения скорости распространения фронта пламени и, следовательно, концентрации СН.

Поскольку в настоящее время, для газовых двигателей, нет данных о связи несгоревших СН со скоростью распространения фронта пламени и с его ионизацией, характеризуемой величиной ионного тока, то тема исследования является актуальной.

Таким образом, целью экспериментального исследования являлось определение взаимосвязи скоростей распространения и характеристик ионного тока пламени с концентрацией несгоревших углеводородов в ОГ газового ДВС с искровым зажиганием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты проводились на одноцилиндровой, четырехтактной установке УИТ-85, позволяющей точно исследовать влияние исследуемых факторов на процесс сгорания [4]. В качестве топлива использовался сжатый природный газ (СПГ). Испытания проводились на скоростном режиме 900 об/мин.

Для определения выделений токсичных компонентов в ОГ применялся микропроцессорный газоанализатор «Автотест-02».

Для мониторинга ионного тока был изготовлен ионизационный датчик (ИД), представляющий собой электрод, изолированный от корпуса двигателя керамическим изолятором. Фронт пламени, омывая электрод и корпус, замыкает электрическую цепь, в которой возникает импульс ионного тока, обусловленный электропроводностью пламени. На рис. 1 показано место установки ИД, который располагается на максимальном удалении от свечи зажигания (на расстоянии 85 мм). Таким образом, показание ИД, будет информировать о процессах в основной фазе сгорания.

Методика проведения экспериментов заключалась в регистрации сигналов с ИД и записи осциллограмм с помощью АЦП. Осциллограм-

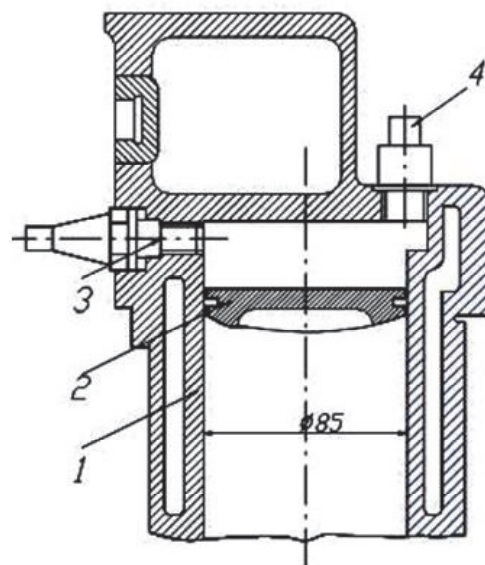


Рис. 1. Расположение ионизационного датчика в камере сгорания УИТ-85:

1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – свеча зажигания; 4 – ионизационный датчик

мы импульсов, записанных в отдельных циклах (рис. 2), усреднялись по амплитуде напряжения ионного тока и промежутку времени от искрового разряда до возникновения импульса, т.е. достижения фронта пламени ИД.

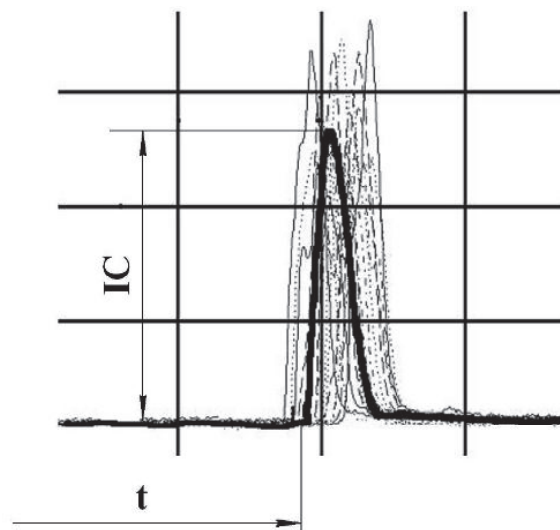


Рис. 2. Осредненная осциллограмма импульсов ионного тока

По результатам измерений промежутка времени (t) от подачи искрового разряда до возникновения импульса напряжения ионного тока, было определено среднее значение скорости распространения фронта пламени по формуле:

$$W=L/t, \quad (1)$$

где L – расстояние от свечи зажигания до ИД [мм].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 приведена зависимость концентрации СН в ОГ от скорости распространения фронта пламени для разных составов смеси. Рост значений скорости при постоянном составе смеси обеспечивался добавками водорода (в топливо) в количестве 10 и 15% по массе.

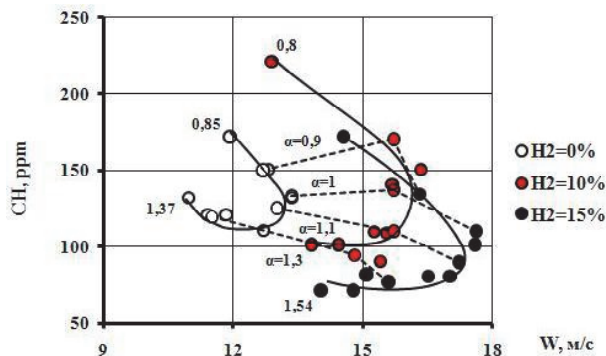


Рис. 3. Влияние скорости распространения фронта пламени (W) на концентрацию несгоревших углеводородов

Числовые значения обозначают величину коэффициента избытка воздуха (α). Штриховые линии на рис. 3 соединяют одинаковые значения α : 0,9; 1,0; 1,1; 1,3. Анализ данных зависимостей позволяет сказать, что при возрастании скорости пламени происходит снижение концентрации СН в ОГ, причем это справедливо, только для бедных смесей. Так, для $\alpha = 1,3$ увеличение скорости на 30% (при добавке $H_2=15\%$) сопровождалось снижением СН на 38%, в свою очередь, при $\alpha = 1$ изменение концентрации СН, при росте скорости пламени, незначительно и находится в пределах погрешности определения. Т.е., при обеднении смеси влияние скорости сгорания на концентрацию СН становится более интенсивным. Таким образом, при работе на бедных смесях, рост средних скоростей распространения пламени соответствует снижению концентрации СН в ОГ. Это объясняется значительной активизацией сгорания бедных смесей при добавках водорода, т.е. увеличением скорости ламинарного и, соответственно, турбулентного сгорания.

На рис. 4 в относительных величинах приведены зависимости концентрации СН и ионных токов от коэффициента избытка воздуха.

$$IC'_o = IC / IC_{(\alpha=1)}, \quad (2)$$

где $IC_{(\alpha=1)}$ – значение ионного тока, при стехиометрическом составе смеси [мкА].

$$CH'_o = CH / CH_{(\alpha=1)}, \quad (3)$$

где $CH_{(\alpha=1)}$ – значение концентрации несгоревших углеводородов, при стехиометрическом составе смеси [ppm].

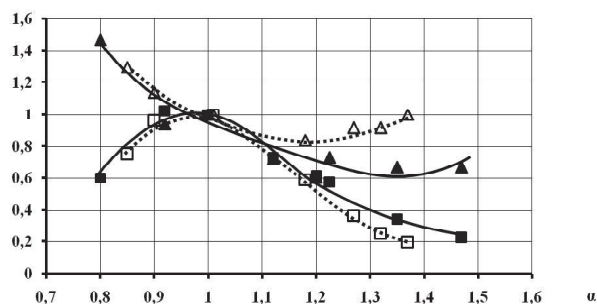


Рис. 4. Зависимость ионного тока (IC'_o) и концентрации несгоревших углеводородов (CH'_o) от коэффициента избытка воздуха (α):
 \square IC'_o , $H_2=0\%$; \blacksquare IC'_o , $H_2=10\%$;
 \triangle CH'_o , $H_2=0\%$; \blacktriangle CH'_o , $H_2=10\%$

Изменение величины силы тока в электрической цепи ИД при постоянном составе смеси обеспечивалось добавкой водорода в количестве 10% по массе. Обнаружено, что возрастание амплитуды импульса ионного тока соответствует снижению эмиссии СН. Однако эта закономерность характерна только для $\alpha > 1$. Так до $\alpha = 1,1$ и ионный ток, и концентрация несгоревших ОГ практически одинаковы. Начиная с $\alpha = 1,15$, ионный ток в цепи ИД при добавке водорода начинает расти, следовательно, в пламени увеличивается уровень ионизации, который сопровождается снижением концентрации несгоревших углеводородов. В частности, при $\alpha = 1,35$ рост IC на 42% отмечается убылью СН на 36%.

Следовательно, при работе на бедных смесях, рост амплитуды сигнала на ИД соответствует убыли эмиссии СН, т.к. рост ионного тока говорит об увеличении интенсивности и полноты сгорания. Также было обнаружено смещение в область бедных смесей зоны минимума СН относительно пика ионного тока. Это объясняется тем, что при обеднении топливовоздушной смеси происходит увеличение в ней доли кислорода, который способствует дожиганию смеси на стенках КС. Однако дальнейшее обеднение топливовоздушной смеси ($\alpha > 1,45$) приводит к росту СН вследствие значительного ухудшения условий сгорания.

Известно [5], что одной из основных причин образования СН в цилиндре ДВС является наличие пристеночных слоев. Толщина пристеночного слоя определяется нормальной скоростью распространения фронта пламени, а плотность слоя - давлением и температурой смеси в момент замораживания, которые зависят от скорости выгорания топлива в основной фазе сгорания, т.е. турбулентной скорости. В [4] для оценки оптимального соотношения плотности и толщины пристеночного слоя, соответствующего минимальной концентрации СН, и уточнения влияния химико-физических свойств смеси на выде-

ление СН двигателем предложен параметр K , пропорциональный отношению нормальной скорости распространения пламени к турбулентной. С учетом особенностей взаимосвязи скорости распространения пламени и его ионизации при сгорании метановодородовоздушной смеси [10] параметр K определялся из условий, что отношение амплитуды сигнала на ионизационном датчике к доле углерода в топливной смеси (IC/gC) прямо пропорционально скорости ламинарного горения, а продолжительность основной фазы сгорания (φt) обратно пропорциональна турбулентной скорости пламени [4] по формуле:

$$K = \varphi t \cdot IC / gC, \quad (4)$$

где φt – продолжительность основной фазы сгорания [град. ПКВ];

IC – ионный ток [мкА];

gC – массовая доля углерода в топливовоздушной смеси.

$$\varphi t = t \cdot D, \quad (5)$$

где t – время возникновения сигнала на ионизационном датчике [мс];

D – угол поворота коленчатого вала двигателя в единицу времени [град. ПКВ/мс].

На рис. 5 показана зависимость концентрации несгоревших углеводородов от параметра K .

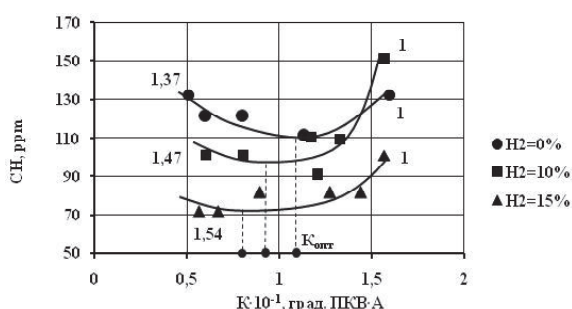


Рис. 5. Зависимость эмиссии несгоревших углеводородов от параметра K и концентрации водорода в топливовоздушной смеси

В представленном виде концентрация СН в ОГ имеет характерную зависимость от параметра K во всем изученном диапазоне составов смеси ($\alpha = 1 - 1,5$) и добавок водорода. Численными значениями обозначены коэффициенты избытка воздуха. Имеются значения K_{opt} , которые соответствуют минимальным концентрациям СН в ОГ. При этом видна тенденция уменьшения параметра K_{opt} с увеличением доли добавляемого водорода в топливовоздушную смесь. Следовательно, K_{opt} соответствует оптимальному балансу турбулентной и ламинарной скоростей пламени в данных условиях, что позволяет оценить влияние относительного изменения скоростей сгорания на выделение СН двигателем.

Сравнение влияния вида топлива на параметр K показано на рис. 6. Для сравнительного анализа использовались бензин и СПГ. Сравнение происходило в относительных величинах:

$$K' = K / K_{(\alpha=1)}, \quad (6)$$

где $K_{(\alpha=1)}$ – значение параметра K , при стехиометрическом составе смеси [град. ПКВ·А].

Цифры – значение коэффициента избытка воздуха (α).

В результате выявлено, что относительная величина K'_{opt} имеет с достаточной степенью точности схожие значения для обоих топлив ($K'_{opt} \approx 0,7$). Это говорит об универсальности данного параметра, то есть о возможности его использования в бензиновых и газовых двигателях.

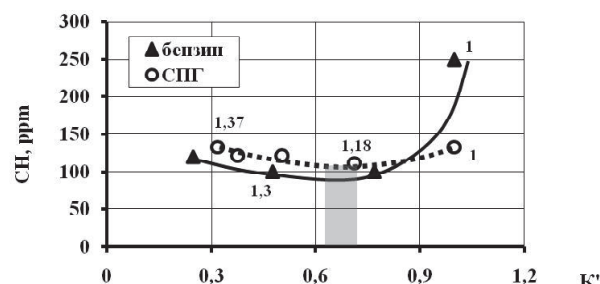


Рис. 6. Зависимость эмиссии несгоревших углеводородов от параметра K' для газо- и бензовоздушных смесей

Таким образом, результаты экспериментального определения средних скоростей распространения и уровня ионизации, определяемого по величине ионного тока, фронта пламени и анализа их воздействия на концентрацию несгоревших СН в ОГ позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Определено значительное влияние скорости распространения фронта пламени на образование несгоревших углеводородов при работе газового ДВС на бедных смесях.
- 2) Выявлена динамика снижения концентрации СН с ростом ионизации пламени, определяемой по ионному току, при обеднении ТВС относительно стехиометрического состава. При этом, чем сильнее происходит увеличение ионного тока, тем интенсивнее снижается эмиссия СН.
- 3) Показана возможность использования предлагаемого параметра K , пропорционального отношению нормальной и турбулентной скорости распространения пламени в бензиновых и газовых ДВС с искровым зажиганием, для оценки влияния относительного изменения скоростей распространения пламени на выделение СН при сгорании ТВС в двигателе.

Данная работы выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК № 14.B37.21.0152 и ГК № 14.B37.21.0308.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луканин В. Н., Трофименко Ю. В. Экологическое воздействие автомобильных двигателей на окружающую среду // Итоги науки и техники. 1993. С. 11–36.
2. Прохоров Б. Б. Экология человека : учеб. для вузов. М.: Академия, 2010. 320 с.
3. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1981. 154 с.
4. Ивашин П.В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока: Автореф. дис. канд. техн. наук. Тольятти, 2004.
5. Heywood J. Internal combustion engine fundamentals. N.Y.: Mc.Graw-Hill, 1988.
6. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическом поле. М.: Metallurgy, 1968.
7. Gao Z., Wu X., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends with BSS de-noising method // International journal of hydrogen energy. 2010. P. 12918 – 12929.
8. Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976. 296 с.
9. Проскудин В.Ф., Бережко П.Г. [и др.] Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени // Водородный транспорт: безопасность, экономика. 2004. № 2(10). С. 21–27.
10. Шайкин, А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Влияние добавок водорода в метановоздушную смесь на связь электропроводности со скоростью распространения фронта пламени // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии». 2012. С. 6–11.

INFLUENCE THE VELOCITY PROPAGATION AND FLAME IONIZATION ON CONCENTRATIONS UNBURNED HYDROCARBONS IN THE CNG ENGINE

© 2013 A. P. Shaykin, P. V. Ivashin, I. R. Galiev

Togliatti State University

Experimentally determined the relationship flame propagation velocity and ionization with concentration of unburned hydrocarbons in the gas combustion engine with spark ignition. The expediency of the use of the parameter (K), which reflects the ratio of the normal and turbulent flame propagation velocity, to evaluate the effect of the relative velocity changes in the allocation of the combustion of unburned hydrocarbons engine.

Keywords: internal combustion engine, flame, speed, distribution, ionization, probe, ion current, concentration, unburned hydrocarbons, zone.

Alexander Shaikin, Doctor of Technics, Professor at the Energy Machines and Control Systems Department.

E-mail: td@tltu.ru

Pavel Ivashin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Energy Machines and Control Systems Department.

E-mail: ivashinpv@rambler.ru

Ildar Galiev, Graduate Student of Togliatti state university.

E-mail: sbs777@yandex.ru