

УДК 621.43.019

ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕСГОРЕВШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ШИРИНОЙ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

© 2017 А.П. Шайкин¹, П.В. Ивашин¹, И.Р. Галиев¹, А.В. Бобровский¹,
А.Д. Дерячев¹, Н.А. Дурманова²

¹Тольяттинский государственный университет

²ОАО «АвтоВАЗ», г. Тольятти

Статья поступила в редакцию 13.02.2017

Представлены результаты экспериментального исследования следующих характеристик сгорания: скорости распространения и ионного тока пламени, ширины зоны турбулентного горения (ЗТГ) вблизи стенки камеры сгорания, а также времени завершения основной фазы сгорания, сгорание 90% топливно-воздушной смеси (ТВС), в зависимости от состава смеси, количества добавляемого водорода и скоростного режима работы двигателя с определением концентрации несгоревших углеводородов (СН). Получена линейная зависимость ширины ЗТГ от турбулентной скорости распространения пламени и от длительности времени основной фазы сгорания. Анализ полученных экспериментальных данных позволил разработать эмпирическую зависимость концентрации несгоревших СН от ширины ЗТГ, содержания водорода и углерода в ТВС. Показана возможность определения эффективности добавки водорода на снижение концентрации несгоревших СН.
Ключевые слова: пламя, скорость, распространение, ширина, зона турбулентного горения, ионизация, несгоревшие углеводороды.

Работа выполнена в рамках государственного заказа, проект № 394 и при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор №5729ГУ/2015.

К настоящему времени в стране остро стоит проблема обеспечения воздушных транспортных связей на региональном уровне и, особенно, для условий Сибири и Дальнего Востока, где отсутствует железнодорожное и автомобильное сообщение. Расширение диапазона применения воздушных судов для перевозки небольших партий пассажиров и грузов требует разработки поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), эксплуатирующихся в широком диапазоне по высоте и скорости полета, в условиях сложных климатических условий, что обуславливает необходимость проведения сложнейше-

го комплекса проектировочных и доводочных работ. Многочисленные экспериментальные исследования двигателей с искровым зажиганием различных конструкций показали, что в процессе рабочего хода (такт расширения) происходит сгорание только 90% топлива [1]. Остальные 10% при отсутствии нейтрализатора реагируют в процессе такта выпуска, создавая дополнительные потери, в выпускной системе и порядка 2% поступают в атмосферу. В связи с этим многие факторы, влияющие на топливную экономичность поршневых двигателей, сказываются и на его характеристиках по токсичности. Известно, что именно несгоревшие СН, являющиеся канцерогенами, способствуют возникновению у человека респираторных и онкологических заболеваний [2]. Основным источником образования несгоревших СН являются замороженные слои ТВС у стенок и в зазорах камер сгорания (КС) [3]. В связи с этим возникла актуальная проблема исследования характеристик сгорания ТВС вблизи стенок камеры сгорания и их влияние на концентрацию несгоревших СН в отработавших газах (ОГ) ДВС. Поскольку бензиновые ДВС достигли предела своего экологического совершенства, то все больше производителей обращают внимание на двигатели, использующие в качестве топлива смесь бензина или сжатого природного газа с водородом [4-6]. Несмотря на

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

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части. E-mail: ivashinpv@rambler.ru

Галиев Ильдар Ринатович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей». E-mail: sbs777@yandex.ru

Бобровский Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, директор института машиностроения. E-mail: ba838@yandex.ru

Дерячев Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской части. E-mail: proscript@mail.ru

Дурманова Надежда Александровна, магистр техники и технологии, инженер. E-mail: td@tltsu.ru

большое количество исследований в данной области, до сих пор нет данных о связи эмиссии СН с характеристиками сгорания (скоростью распространения пламени, шириной зоны турбулентного горения и длительностью основной фазы). Кроме этого, анализ методов расчета несгоревших СН в ОГ поршневых двигателей, в которых не учитываются характеристики распространения пламени, выявил сильное несоответствие (более 50%) между расчетными и экспериментальными значениями [5]. Поэтому методы расчета концентрации СН требуют серьезной доработки.

Эксперименты проведены в четырехтактном одноцилиндровом ДВС (УИТ-85), который был выбран из-за возможности достаточно просто измерять возникновение и величину ионного тока движущегося фронта пламени, а также из-за возможности сравнения полученных результатов с известными исследованиями, использующими другие подходы и методы. Частота вращения коленчатого вала (n) поддерживается постоянной с помощью электропривода, отсутствует дроссельная заслонка, чем обеспечивается постоянство наполнения цилиндра и постоянство скорости движения поршня, т.е. закона изменения объема КС. В КС в наиболее удаленной от свечи зажигания зоне установлен ионизационный датчик, содержащий два зонда. Ионизационный зонд представляет собой положительно заряженный проводник, изолированный от корпуса двигателя. При омывании зонда пламенем – зоной химических реакций горения, в цепи зонда течет ток, обусловленный электропроводностью пламени. Также в КС был установлен датчик давления, позволяющий оценивать скорость выгорания смеси по нарастанию давления. Для определения концентрации несгоревших СН в ОГ использовался микропроцессорный газоанализатор. Изменение

основных характеристик сгорания (скорости распространения пламени, ширины зоны турбулентного горения и длительности основной фазы) осуществлялось за счет изменения коэффициента избытка воздуха (α) и добавки в ТВС водорода в количестве (g_H) 3 и 5%.

На рис. 1 представлена осциллограмма регистрации ионного тока пламени относительно момента подачи напряжения на свечу зажигания. Обработка экспериментальных данных проводилась на основании регистрации следующих параметров: промежутков времени от подачи напряжения на свечу зажигания до появления ионного тока в цепи первого и второго зонда (τ_1 и τ_2) и до исчезновения тока в их цепи ($\tau_{1+\Delta\tau_1}$ и $\tau_{2+\Delta\tau_2}$), длительности основной фазы сгорания (τ_{Pz}), а также амплитуды ионного тока (I_1 и I_2).

Ширина ЗТГ определялась по переднему и заднему фронту прохождения пламени через чувствительные элементы ионизационного датчика. Схема размеров и границ датчика представлена на рис. 2.

Находятся турбулентные скорости распространения переднего (U_f) и заднего (U_b) фронтов пламени по формулам:

$$U_f = \frac{\delta_f}{\tau_f}, \quad (1)$$

$$U_b = \frac{\delta_b}{\tau_b}. \quad (2)$$

Вычисляется ширина зоны турбулентного горения по формуле:

$$\delta_t = L + U_b \cdot (\tau_{1b} - \tau_{2f}), \quad (3)$$

где τ_{1b} – момент времени прохождения заднего фронта пламени у первого зонда, с; τ_{2f} – момент

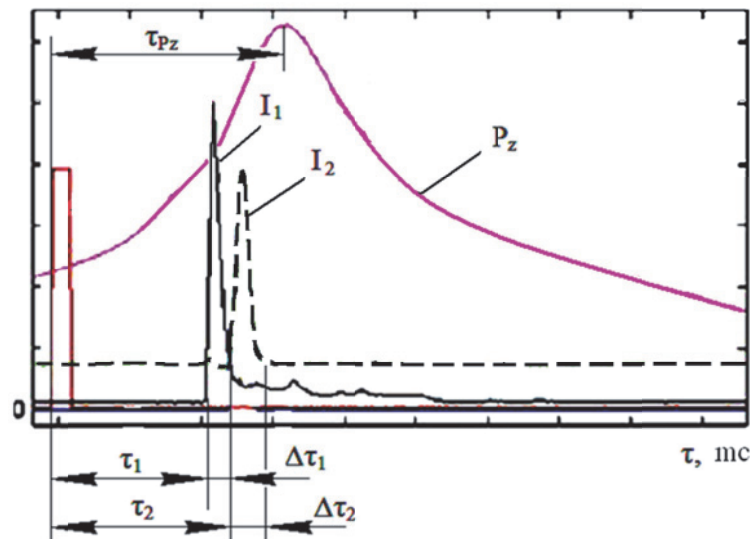


Рис. 1. Пример записи осциллограммы регистрации ионного тока и индикаторного давления

времени прохождения переднего фронта пламени у второго зонда, с.

Поскольку ширина зоны ЗТГ определяется скоростью распространения пламени, то необходимо рассмотреть, как изменялась скорость пламени в исследуемой зоне у стенки камеры сгорания, наиболее удаленной от свечи зажигания. При сгорании ТВС у стенки цилиндра местная турбулентная скорость распространения пламени чрезвычайно чувствительна к добавкам водорода. Эффективность добавки водорода возрастает при обеднении ТВС. При работе установки на скоростном режиме $n=600 \text{ мин}^{-1}$ для $\alpha=1$ добавка 5% водорода вызывает увеличение скорости распространения пламени на 12,5%, а $\alpha=1,3$ – на 34%. Аналогичная картина получена и при скоростном режиме 900 мин^{-1} . Так как при неизменных оборотах турбулентность рабочего тела не меняется, то увеличение турбулентной скорости распространения пламени происходит за счет роста нормальной составляющей.

На рис. 3 представлена ширина ЗТГ у стенки КС для двух скоростных режимов и добавках водорода, определяемая положением передней и задней границы ЗТГ относительно нахождения пика ионного тока в ЗТГ и относительной величины ионного тока (I_{rel}), т.е. текущее значение ионного тока отнесено к значению тока, полученное в опытах без добавки водорода в ТВС.

Добавка водорода приводит к заметному сокращению ЗТГ, особенно при обеднении ТВС из-за увеличения нормальной составляющей скорости распространения пламени, отражающей интенсивность переработки химическими реакциями топлива в зоне горения. Чем выше нормальная скорость распространения пламени, тем быстрее окислится топливо и сократится протяженность зоны горения. Причем эффект уменьшения ширины ЗТГ увеличивается с обеднением смеси. Так при $\alpha=1$ добавка 5% водорода приводит к сокращению ширины ЗТГ на 24%, а для $\alpha=1,3$ уменьшение ширины ЗТГ составило 36%. Рассматривая положение передней и задней границы зоны горения относительно пика ионного тока видно, что передняя граница относительно пика ионного тока изменяется незначительно, а основное изменение происходит

за пиком ионного тока, т.е. увеличение ширины происходит за счет заднего фронта пламени. Следовательно, за образование несгоревших СН будет отвечать ширина ЗТГ у стенки КС, главным образом область задней зоны горения за пиком ионного тока. На рис. 3 также видно, что добавка водорода вызывает увеличение ионного тока, возрастающего с обеднением смеси, и, следовательно, нормальной скорости распространения пламени. Увеличение ионного тока при добавке водорода сопровождается сокращением ширины ЗТГ. Причем эта связь близка к линейной. Для $\alpha=1,3$ ионный ток при добавке водорода увеличивается в 2 раза, что сопровождается уменьшением протяженности задней ЗТГ относительно пика тоже в 2 раза.

Очевидно, что на процессы, протекающие в ЗТГ, значительное влияние оказывает время завершения основной фазы сгорания ТВС, представленное на рис. 4, которое принято оценивать по промежутку времени от подачи зажигания до достижения максимального давления в цилиндре ДВС, τ_{pz} . Время завершения основной фазы сгорания определяется линейной зависимостью от ширины ЗТГ. С увеличением ширины ЗТГ время завершения основной фазы сгорания возрастает. Эта зависимость может быть использована для определения ширины ЗТГ по значению времени сгорания в основной фазе, рассчитанному по методу И.И. Вибе [7].

На рис. 5 представлены графические зависимости результатов экспериментов по изменению концентрации СН в ОГ двигателя (С) в зависимости от состава ТВС и массовой доли водорода в ней.

Результаты испытаний показывают, что концентрация несгоревших СН имеет минимум без добавки водорода в ТВС при $\alpha=1,2$. Так же видно, что при добавке водорода 3% концентрация уменьшается на 10%, а при 5% на 40%.

Рассмотрение особенностей характеристик распространения пламени у стенки цилиндра в наиболее удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания, показывает, что наиболее полно токсичность несгоревших СН определяет ширина ЗТГ. Как видно из данных, приведенных на рис. 4, интенсификация химических реакций

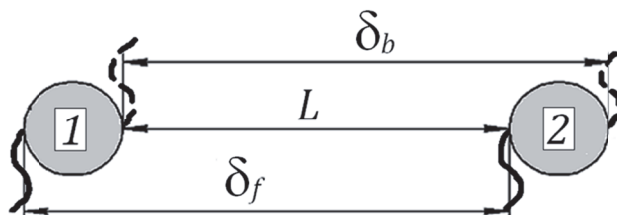


Рис. 2. Схема размеров и границ датчика для определения ширины ЗТГ:

— — передний фронт пламени; - - - - задний фронт пламени; 1 – первый зонд; 2 – второй зонд; δ_b – расстояние между задними фронтами пламени; δ_f – расстояние между передними фронтами пламени; L – расстояние между зондами

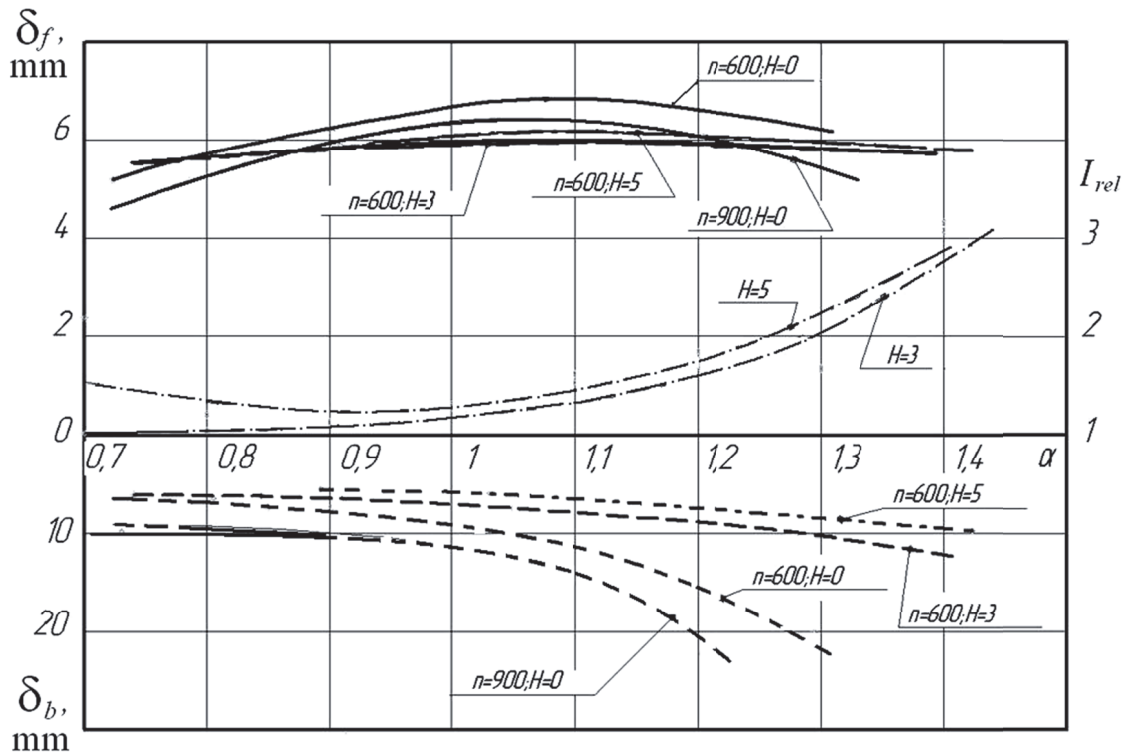


Рис. 3. Границы ЗТГ относительно пика ионного тока; ось абсцисс – положение пика ионного тока относительно передней и задней границы ЗТГ: — — передний фронт пламени; - - - задний фронт пламени; - · - · - ионный ток; *H* – добавка водорода в ТВС

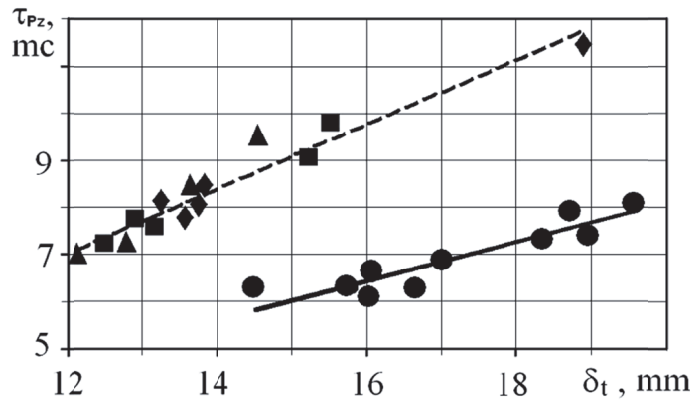


Рис. 4. Зависимость продолжительности основной фазы сгорания от ширины зоны турбулентного горения: --- $n=600 \text{ мин}^{-1}$; — — $n=900 \text{ мин}^{-1}$; ●, ◆ — $g_H=0\%$; ■ — $g_H=3\%$; ▲ — $g_H=5\%$

горения в ЗТГ, проявляющаяся через рост ионного тока, вызывает уменьшение ширины ЗТГ за счет ее части, находящейся за пиком ионного тока. В этой части ЗТГ происходит выгорание сложных углеводородных соединений C_xH_y , для которых интенсификация реакций горения при увеличении скорости распространения пламени в передней части ЗТГ, приводит к повышению температуры и, следовательно, улучшению условий горения.

Обработка данных представленных в данной работе, позволила получить обобщенный комплекс параметров Φ , приводящий концен-

трацию несгоревших СН при сгорании бензовоздушной или бензоводородовоздушной смеси к известной концентрации несгоревших СН для определенного режима работы ДВС с учетом изменения ширины ЗТГ (d) в виде, например при добавке водорода:

$$\Phi = C_{GH} \cdot \left(\frac{\delta_G}{\delta_{GH}} \right)^{2,5 \cdot \frac{g_H}{g_C}}, \quad (4)$$

где индекс G соответствует условиям при сгорании бензовоздушной смеси; индекс GH соответствует условиям при сгорании бензоводоро-

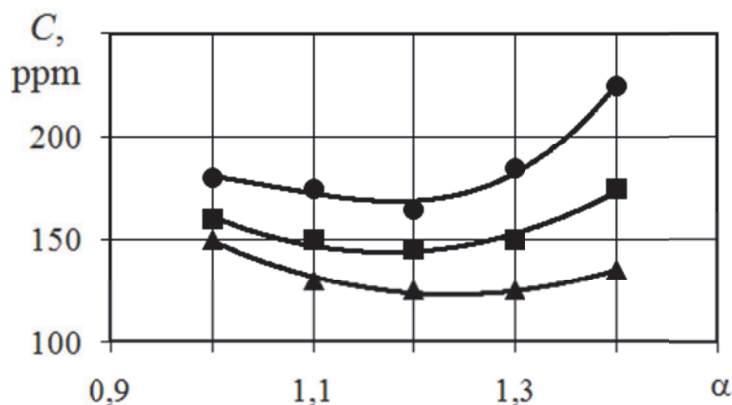


Рис. 5. Зависимость концентрации несгоревших СН от состава ТВС и доли в ней водорода ($n=600 \text{ мин}^{-1}$):
 ● – $g_H=0\%$; ■ – $g_H=3\%$; ▲ – $g_H=5\%$

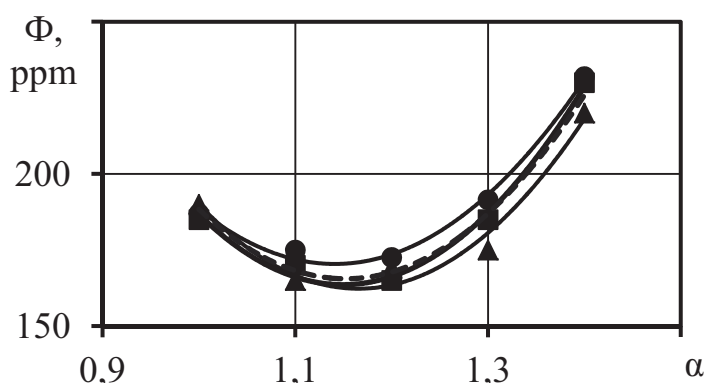


Рис. 6. Зависимость параметра Φ от состава ТВС:
 ● – $g_H=0\%$; ■ – $g_H=3\%$; ▲ – $g_H=5\%$

довоздушной смеси; g_c – массовая доля углерода в ТВС.

На рис. 6 представлена графическая зависимость параметра Φ при сгорании бензовоздушной смеси и с добавками водорода в ТВС.

Прерывистой линией показана осредненная кривая между результатами расчета по предложенной формуле. Несмотря на добавки водорода все расчетные данные аппроксимируются одной зависимостью. Отклонение результатов расчета от средней линии не превышает 5%. Показатель степени в формуле (4) приблизительно равен 0,5.

Эффективность добавки водорода на снижение несгоревших СН определяется из параметра Φ по формуле:

$$C_{GH} = C_G \cdot \left(\frac{\delta_{GH}}{\delta_G} \right)^{2,5 \cdot \frac{g_H}{g_c}} \quad (5)$$

Сравнение рассчитанных по формуле (5) концентраций СН с экспериментальными показало, что их сходимость превышает 90% в исследуемом диапазоне коэффициентов избытка воздуха и добавок водорода. Следовательно, при введении конструктивных мероприятий, позво-

ляющих уменьшить ширину ЗТГ, концентрация несгоревших СН в ОГ снизится пропорционально корню квадратному из отношения ширины ЗТГ с мероприятиями по ее сокращению к ширине ЗТГ в конструкции прототипа. Оценка ширины ЗТГ для проектируемого ДВС и прототипа может быть получена по длительности времени сгорания в основной фазе (взаимосвязь этих параметров представлена на рис. 4), определенного расчетным путем по методу И.И. Вибе. Таким образом, разработанная формула может быть использована при проектировании и доводке авиационных поршневых ДВС с искровым зажиганием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arcoumanis C., Kamimoto T. Flow and Combustion in Reciprocating Engines. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 420 p.
2. Sher E. Handbook of air pollution from internal combustion engine. Pollutant formation and control. New York: Academic press, 1998. 665 p.
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
4. Влияние добавок водорода в топливо на характеристики газопоршневого двигателя при изме-

- нении угла опережения зажигания / Ю.Ф. Гортышов, В.М. Гуреев, Р.Ш. Мисбахов, И.Ф. Гумеров, А.П. Шайкин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 4. С. 73-74.
5. Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени в метановодородовоздушной смеси и концентрация несгоревших углеводородов в отработавших газах газопоршневых двигателей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 17 с.
 6. Hydrogen enriched compressed natural gas – a futuristic fuel for internal combustion engines / K. Nanthagopal, R. Subbarao, T. Elango, P. Baskar // Thermal science. 2011. № 4. P. 1145-1154.
 7. Вубе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя. Свердловск: Машгиз. 1962. 271 с.

**RELATIONSHIP CONCENTRATION UNBURNED HYDROCARBONS
WITH WIDTH ZONE TURBULENT COMBUSTION
BY COMBUSTION FUEL ADDITIVE HYDROGEN**

© 2017 A.P. Shaykin¹, P.V. Ivashin¹, I.R. Galiev¹, A.V. Bobrovskiy¹,
A.D. Deryachev¹, N.A. Durmanova²

¹Togliatti State University

²«AvtoVAZ», Togliatti

An experimental study combustion characteristics: speed flame propagation, flame of the ion current, width of the zone turbulent combustion near wall combustion chamber, time of the completion combustion main phase, in depending fuel composition, amount added hydrogen and speed engine operation with definition concentration of unburned hydrocarbons (HC). The obtained linear dependence width zone turbulent combustion from turbulent velocity flame propagation and time main phase combustion. Developed empirical relation concentration unburned hydrocarbons from width zone turbulent combustion, concentration hydrogen and carbon in fuel. Show opportunity to definition effectiveness supplement hydrogen on reduction concentration unburned hydrocarbons.

Keywords: flame velocity distribution, width zone turbulent combustion, ionization, unburned hydrocarbons.

Alexander Shaykin, Doctor of Technics, Professor at the Energy Machines and Systems Management Department.
E-mail: a_shajkin@mail.ru

Pavel Ivashin, Candidate of Technics, Senior Research Fellow at the Scientific-Research Part.
E-mail: ivashinpv@rambler.ru

Ildar Galiev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Design and Operation of vehicles Department.
E-mail: sbs777@yandex.ru

Alexander Bobrovskiy, Candidate of Technics, Associate Professor, Director of Institute of Engineering.
E-mail: ba838@yandex.ru

Alexander Drachev, Candidate of Technics, Associate Research Fellow at the Scientific-Research Part.
E-mail: proscript@yandex.ru

Nadezhda Durmanova, Master of Engineering and Technology, Engineer. E-mail: td@tltsu.ru