

УДК 621.43

О ВЗАИМОСВЯЗИ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА В ТОПЛИВЕ И ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ С ВЕЛИЧИНОЙ ИОННОГО ТОКА

© 2015 А. П. Шайкин, С. И. Будаев, И. Р. Галиев

Тольяттинский государственный университет

Обоснована целесообразность применения ионизационных зондов для исследования сгорания топлива в условиях поршневого двигателя. Показано, что для расширения функциональных возможностей, увеличения надёжности работы и точности обработки сигнала ионизационного зонда необходимо знать влияние на него химического состава топлива и характеристик распространения турбулентного пламени (скорости и ширины). Теоретически и экспериментально исследовано влияние скорости распространения турбулентного пламени, ширины зоны турбулентного горения, состава топливовоздушной смеси и доли в ней углерода на показания ионизационного зонда – ионного тока. Получена функциональная зависимость ионного тока от концентрации углерода в топливе и характеристик распространения турбулентного пламени. Эксперименты на двигателе показали, что при коэффициенте избытка воздуха от 0,8 до 1,1 сходимость расчётных и опытных значений ионного тока в первой и второй фазе сгорания составляет более 85%. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга ионизационным зондом скорости распространения и ширины фронта турбулентного пламени в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания.

Двигатель; ионизация; массовая доля углерода; скорость; ширина; распространение; пламя; зонд; ионный ток; взаимосвязь.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-156-163

В настоящее время все ведущие автоконцерны (Mitsubishi, Volvo, Ford, GM и др.) пришли к пониманию, что для дальнейшего улучшения экологических, экономических и энергетических показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) необходимо совершенствовать процесс сгорания топлива [1]. Поскольку теория горения до конца не построена, остаются востребованными эмпирические методы исследования процесса сгорания. Достаточно отчётливые представления о характере сгорания в ДВС позволяют получить методы, основанные на явлении ионизации пламени. Суть данного явления заключается в образовании заряженных частиц (ионов и электронов) в результате хемоионизации, которая протекает как побочная реакция между компонентами, участвующими в основной реакции горения [2]. Таким образом, процесс ионизации в зоне фронта пламени неразрывно связан как с процессами горения, так и с природой топлива. Положительным свой-

ством метода ионизационных зондов (ИЗ) является большой диапазон измерений, дешевизна, простота использования. ИЗ могут быть миниатюрными, что делает возможным их размещение в камере сгорания любой конфигурации, практически никак не нарушая условий охлаждения стенок и распространения пламени. Благодаря этому, метод ИЗ достаточно активно используется в исследованиях процесса сгорания в ДВС [3, 4]. Однако, несмотря на достигнутые успехи в использовании метода ИЗ, для дальнейшего расширения его функциональных возможностей и увеличения точности обработки сигнала необходимо знать влияние на показания ИЗ химического состава углеводородного топлива и характеристик распространения турбулентного пламени (скорости и ширины).

Целью работы является определение связи концентрации углерода в топливе и характеристик распространения пламени

(скорости и ширины) с величиной ионного тока.

Поскольку кроме рассматриваемых величин ионный ток зависит от множества других факторов (например, форма, размер и потенциал ИЗ, газодинамические характеристики и т.д.), то, чтобы исключить их влияние, анализ проводится в относительных величинах – отношения анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе топливовоздушной смеси (ТВС):

$$I' = \frac{I_{(\alpha=x)}}{I_{(\alpha=1)}}, \quad (1)$$

где $I_{(\alpha=x)}$ – значение ионного тока при произвольном составе ТВС, А; $I_{(\alpha=1)}$ – значение ионного тока при стехиометрическом составе ТВС, А; α – коэффициент избытка воздуха; x – текущее значение коэффициента избытка воздуха.

Согласно традиционным представлениям электродинамики сила тока, обусловленная движением электронов к положительно заряженному ИЗ, равна произведению площади поверхности ИЗ на концентрацию электронов, их заряд и скорость движения. Тогда с учётом ряда преобразований формула (1) примет вид:

$$I' = \frac{n_{(\alpha=x)} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=x)}}}{n_{(\alpha=1)} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=1)}}}, \quad (2)$$

где n – концентрация электронов, единиц/м³; T – адиабатическая температура пламени, К.

Процесс образования заряженных частиц во фронте углеводородного пламени обусловлен хемоионизацией, т.е. образованием свободного радикала СН, концентрация которого, предположительно, зависит от вероятности хемоионизации (P) и доли углерода в ТВС, определяющей потенциальный резерв образования СН. Таким образом, концентрация электронов во фронте пламени описывается следующей формулой:

$$n = G_c \cdot N \cdot P, \quad (3)$$

где G_c – массовая доля углерода в ТВС; N – начальная концентрация молекул

ТВС, единиц/м³; P – вероятность хемоионизации, $P \in [0; 1]$.

Массовая доля углерода в ТВС находится по формуле:

$$G_c = \frac{1}{1 + \alpha \cdot l_T} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_T}, \quad (4)$$

где l_T – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг; μ_c – атомная масса углерода, г/моль; μ_T – молекулярная масса топлива, г/моль.

Разделим и умножим формулу (2) на время. Тогда с учётом (3), а также при условии, что $P_{(\alpha=x)} \approx P_{(\alpha=1)}$, формула (2) примет вид:

$$\begin{aligned} I' &= \frac{G_c^{(\alpha=x)} \cdot \frac{N_{(\alpha=x)}}{\tau} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=x)}}}{G_c^{(\alpha=1)} \cdot \frac{N_{(\alpha=1)}}{\tau} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=1)}}} = \\ &= \frac{G_c^{(\alpha=x)} \cdot U_{хим}^{(\alpha=x)} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=x)}}}{G_c^{(\alpha=1)} \cdot U_{хим}^{(\alpha=1)} \cdot \sqrt{T_{(\alpha=1)}}} \end{aligned} \quad (5)$$

где τ – время протекания химических реакций, с; $U_{хим}$ – скорость химической реакции, единиц/(м³·с).

Скорость химической реакции во фронте пламени находится по формуле (6), которая получена путём преобразования начальной концентрации молекул ТВС:

$$U_{хим} = \frac{M}{V_{КС} \cdot \tau} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot l_T}{m_B} + \frac{1}{m_T} \right), \quad (6)$$

где M – суммарная масса топлива в камере сгорания, кг; m_T – масса молекулы топлива, кг; m_B – масса молекулы воздуха, кг; $V_{КС}$ – объём камеры сгорания, м³.

Время протекания химических реакций находится по формуле [5]:

$$\tau \sim \frac{\delta_n}{U_n} = \frac{\delta_t}{U_t \cdot Da} = \frac{\tau_c}{Da}, \quad (7)$$

где δ_n – ширина ламинарного фронта пламени, м; δ_t – ширина турбулентного фронта пламени, м; U_n – скорость распространения ламинарного фронта пламени, м/с; U_t – скорость распространения турбулентного фронта пламени, м/с; Da – критерий Дамкёлера; τ_c – продолжительность существования ионного тока в цепи ИЗ, с.

Если коэффициент избытка воздуха изменяется путём регулирования только подачи воздуха при неизменной подаче топлива, то $M_{(\alpha=x)} = M_{(\alpha=1)}$. Также примем, что $Da_{(\alpha=x)} \approx Da_{(\alpha=1)}$, следовательно:

$$I' \approx \frac{G_c^{(\alpha=x)} \cdot \frac{1}{\tau_c^{(\alpha=x)}} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot l_T}{m_B} + \frac{1}{m_T} \right) \cdot \sqrt{T_{(\alpha=x)}}}{G_c^{(\alpha=1)} \cdot \frac{1}{\tau_c^{(\alpha=1)}} \cdot \left(\frac{l_T}{m_B} + \frac{1}{m_T} \right) \cdot \sqrt{T_{(\alpha=1)}}} \quad (8)$$

Для проверки правильности найденной согласно формуле (8) степени влияния концентрации углерода в топливе и характеристик распространения пламени (выраженные через τ_c) на величину ионного тока были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования и их анализ

Исследования проводились на экспериментальном стенде, основу которого составляла установка УИТ-85, представляющая собой одноцилиндровый четы-

рёхтактный ДВС. В качестве топлива использовался сжатый природный газ. Испытания проводились при частоте вращения коленчатого вала ДВС 600 мин^{-1} . Коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах устойчивого сгорания ТВС, т.е. от 0,7 до 1,3. Для мониторинга ионного тока использовались два ИЗ, один из которых располагался непосредственно у свечи зажигания, а другой – на максимальном удалении от неё (рис. 1). Таким образом, данные, полученные с ИЗ, расположенного у свечи зажигания, соответствовали первой фазе сгорания, в которой из очага горения, возникшего у электродов свечи зажигания, формируется фронт турбулентного пламени. Информация, полученная ИЗ, удалённым от свечи зажигания, соответствовала второй фазе сгорания, в которой происходит сгорание основной массы ТВС вследствие развития турбулентного пламени на большой объём камеры сгорания ДВС.

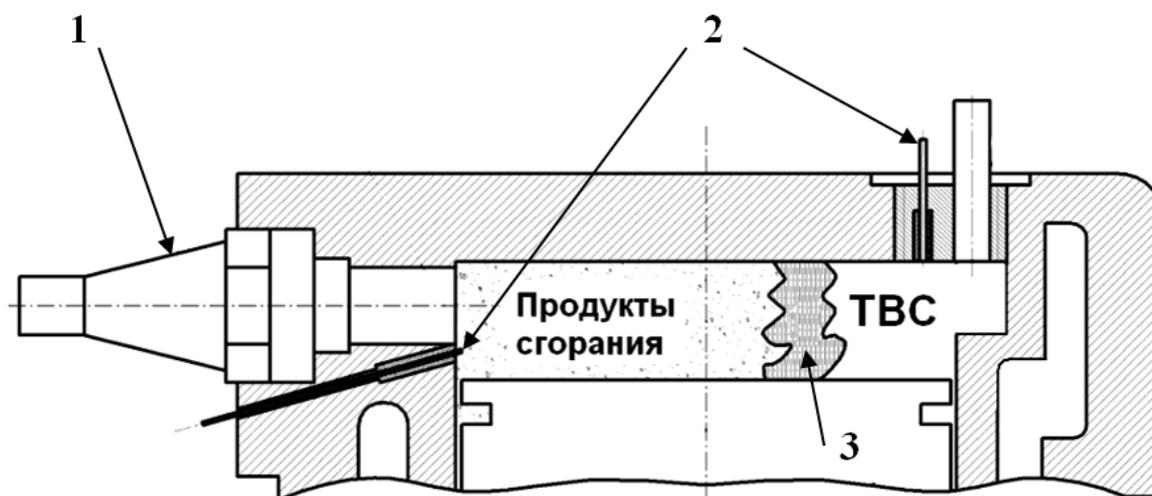


Рис. 1. Расположение ИЗ в камере сгорания УИТ-85:
1 – свеча зажигания; 2 – ИЗ; 3 – зона турбулентного горения

Методика проведения экспериментов заключалась в регистрации амплитуды напряжения ионного тока и продолжительности существования ионного тока в цепи ИЗ. Полученные данные обрабатывались в соответствии с ГОСТ 8.207 – 76 «Прямые измерения с многократными

наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений» для определения их среднего значения и оценки погрешности.

Экспериментальные значения адиабатической температуры метановоздушного пламени были взяты из [6]. Для со-

ответствия выбранных значений температуры условиям эксперимента была выполнена поправка данной температуры на величину:

$$T = T^* + (T_c - T_0^*), \quad (9)$$

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{k-1}, \quad (10)$$

где * – значения температур, взятых из [6]; T^* – адиабатическая температура пла-

мени, К; T_0^* – температура ТВС, К; T_c – температура в конце сжатия, К; T_a – температура в конце впуска, $T_a=323$ К; ε – степень сжатия, $\varepsilon=7$; k – показатель политропы сжатия, $k=1,382$.

Экспериментальная зависимость амплитуды ионного тока и продолжительности его существования в цепи ИЗ от состава ТВС представлена на рис. 2.

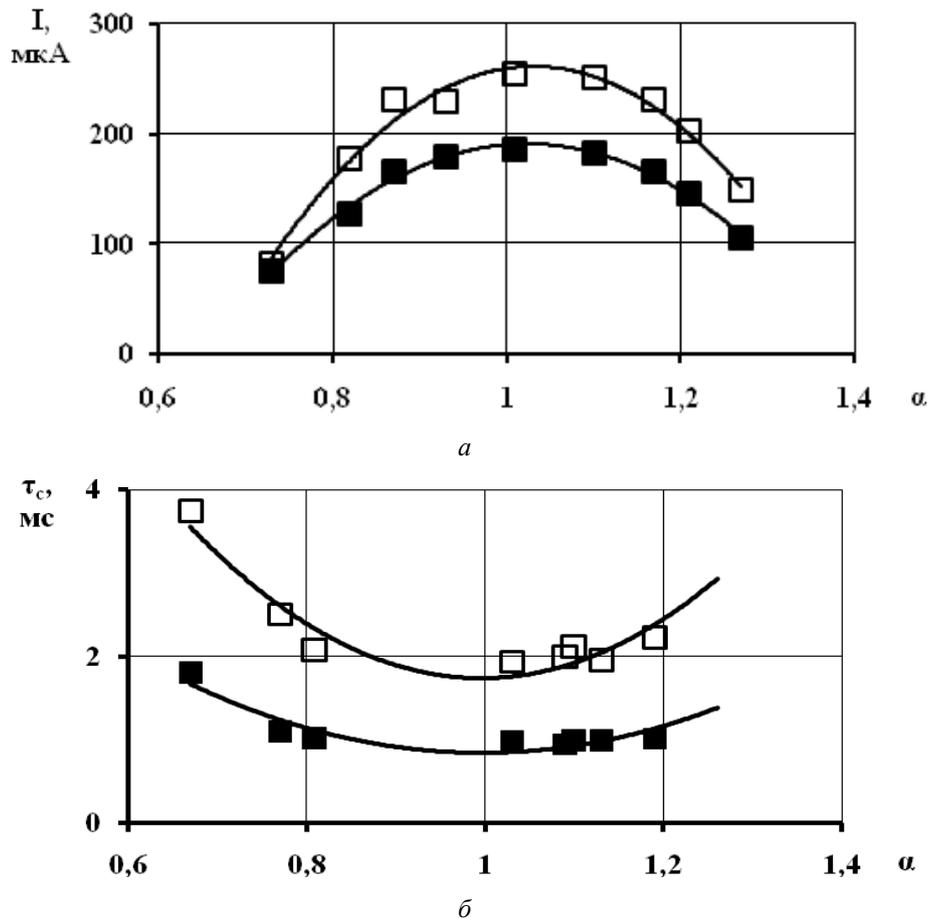


Рис. 2. Экспериментальная зависимость амплитуды ионного тока (а) и продолжительности (б) его существования от состава ТВС: □ – первая фаза сгорания; ■ – вторая фаза сгорания

Из рис. 2 видно, что зависимости ионного тока и его продолжительности существования в цепи ИЗ от состава ТВС имеют экстремумы в области стехиометрии. Поскольку смена состава ТВС влечёт изменение скорости химических реакций за счёт изменения концентрации реагентов, участвующих в реакции, то сходство рис. 2, а и 2, б свидетельствует об определяющем влиянии на них кинетики хими-

ческих реакций, что подтверждается известными работами [4, 7].

В результате проведённых испытаний была получена графическая зависимость ионного тока во второй фазе сгорания от ионного тока в первой фазе. Сравнение экспериментальных данных с данными, рассчитанными по формуле (8), представлено на рис. 3.

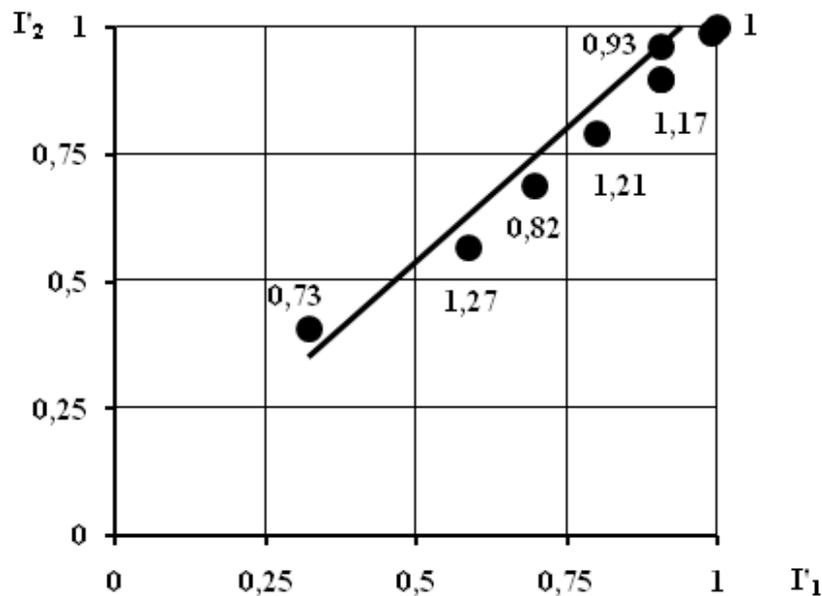


Рис. 3. Зависимость ионного тока (I_2') во второй фазе сгорания от ионного тока (I_1') в первой фазе сгорания: ● – экспериментальные значения; — расчётные значения; цифры – значения коэффициента избытка воздуха

Для исключения влияния формы, размеров и потенциала ИЗ на величину ионного тока сравнительный анализ проводился в относительных величинах согласно формуле (1). Из рис. 3 видно наличие хорошей сходимости экспериментальных данных с расчётными. Это свидетельствует об определяющей роли концентрации углерода в топливе и характеристик распространения пламени на величину ионного тока. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга характеристик распространения пламени по амплитуде и продолжительности импульса ионного тока, что приведёт к расширению функциональных возможностей, увеличению точности обработки сигнала, упрощению и удешевлению существующей методики исследования процесса сгорания ионизационными зондами.

Таким образом, в результате проведённых исследований:

1. Предложено теоретическое и экспериментальное подтверждение связи концентрации углерода в топливе и ха-

рактеристик распространения пламени (скорости и ширины) с величиной ионного тока.

2. Показано, что сила тока на ИЗ отражает физико-химические свойства ТВС, влияющие на процесс сгорания и, следовательно, на экологические и экономические показатели двигателя. Поэтому в дальнейшем возможно использование информации с ИЗ для регулирования и управления рабочим процессом ДВС.

3. Выявлено, что по относительным изменениям амплитуды и продолжительности сигнала ионного тока, регистрируемого ИЗ, могут быть оценены характеристики распространения турбулентного пламени (скорость и ширина).

Данная работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 0010547, а также в рамках государственного заказа, проект № 394.

Библиографический список

1. Аравин Г.С., Семёнов Е.С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени // Физика горения и взрыва. 1979. № 5. С. 40-46.
2. Calcote H.F., King I. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes // Symposium (International) on Combustion. 1955. V. 5, Iss. 1. P. 423-434. doi.org/10.1016/s0082-0784(55)80056-2
3. Воинов А.Н. Сгорание в быстрородных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
4. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическом поле. М.: Металлургия, 1968. 312 с.
5. Хайк Н. Возможность использования ионизационных датчиков в системах управления рабочим процессом ДВС: автореф. дис. канд. тех. наук. Волгоград, 1991. 16 с.
6. Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fuelled with natural gas hydrogen blends with BSS de-noising method. // International journal of hydrogen energy. 2010. V 35, no 23. P. 12918–12929. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.129.
7. Ивашин П.В., Коломиец П.В. Использование ионизационного датчика, установленного в удалённой от свечи зажигания зоне камеры сгорания ДВС, для контроля сгорания // Вектор науки ТГУ. 2010. № 3(13). С. 82-86.

Информация об авторах

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: td@tltsu.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

Будаев Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», Тольяттинский государствен-

ный университет. E-mail: S.Budaev@tltsu.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

Галиев Ильдар Ринатович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Тольяттинский государственный университет. E-mail: sbs777@yandex.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

RELATIONSHIP BETWEEN CARBON CONCENTRATION IN A FUEL AND CHARACTERISTICS OF FLAME PROPAGATION WITH A MAGNITUDE OF ION CURRENT

© 2015 A. P. Shaykin, S. I. Budaev, I. R. Galiev

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

The practicability of using ionization probes for the investigation of fuel consumption in a piston engine is proved in the paper. It is shown that in order to expand the functionality, to increase the reliability of operation and accuracy of the processing of the ionization probe signal it is essential to know the influence of the fuel chemical composition and characteristics of turbulent flame propagation (velocity and width). In this connection, the paper presents theoretical and experimental research of the influence of turbulent flame propagation velocity, the width of the turbulent burning zone, the composition of the fuel-air mixture and the content of carbon in it on the indications of the ionization probe – the ion current. The work carried out resulted in obtaining functional dependence of ion current on carbon concentration in the fuel and characteristics of turbulent flame propagation. Experiments on the engine showed that if the excess air factor is in the range of 0.8 to 1.1 the agreement between the design and experimental values of the ion current in the first and second phases of combustion is over 83 per cent. The results of the work can be used to predict and monitor the propagation velocity and the width of the turbulent flame front in the combustion chamber of an internal combustion engine with the help of an ionization probe.

Engine; ionization; hydrocarbon fuel; mass content of carbon; speed; width; distribution; flame; probe; ion current; relationship.

References

1. Aravin G.S., Semenov E.S. Connection between rates of chemical ionization and the combustion reaction in a laminar flame. *Combustion, explosion and shock waves*. 1979. No. 5. P. 589-593.
2. Calcote H.F., King I. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes. *Symposium (International) on Combustion*. 1955. V. 5, Iss. 1. P. 423-434. doi.org/10.1016/s0082-0784(55)80056-2
3. Voinov A.N. *Sgoranie v bystrokhodnykh porshnevnykh dvigatelyakh* [Combustion in high-speed piston engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 277 p.
4. Stepanov E.M., Diachkov B.G. *Ionizatsiya v plameni i elektricheskoy pole* [Ionization in flame and electric field]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1968. 312 p.
5. Hike N. *Vozmozhnost' ispol'zovaniya ionizatsionnykh datchikov v sistemakh upravleniya rabochim protsessom DVS: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [The possibility of using ionization detectors in systems of internal combustion engine work process management. Synopsis of dissertation]. Volgograd, 1991. 16 p.
6. Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends with BSS denoising method. *International journal of hydrogen energy*. 2010. V 35, no 23. P. 12918–12929. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.129.
7. Ivashin P.V., Kolomiets P.V. Application of distant from spark plug ionization sensor for combustion control in ICE. *Vektor nauki TGU*. 2010. No. 3(13). P. 82-86. (In Russ.)

About the authors

Shaikin Alexander Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Energy Machines and Control Systems, Togliatti State University. E-mail: td@tltsu.ru. Area of Research: combustion processes, working processes in heat engines.

Budaev Sergey Ivanovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics, Togliatti State University. E-mail: S.Budaev@tltsu.ru.

Area of Research: combustion processes, working processes in heat engines.

Galiev Ildar Rinatovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Design and Operation

of Vehicles, Togliatti State University. E-mail: sbs777@yandex.ru. Area of Research: combustion processes, working processes in heat engines.