

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СГОРАНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ОБЪЕМА

© 2019

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

*П.В. Ивагин*, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»

*И.Р. Галиев*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

*И.Н. Бобровский*, кандидат технических наук,

заместитель директора по научно-методической работе Института химии и инженерной экологии

*А.Д. Дерячев*, кандидат технических наук, инженер кафедры «Энергетические машины и системы управления»

*А.Я. Твердохлебов*, инженер кафедры «Энергетические машины и системы управления»

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** углеводородное топливо; химионизация; характеристики распространения пламени; камера сгорания переменного объема; процесс сгорания; фаза сгорания; ширина зоны химических реакций пламени; скорость распространения пламени; ионизационный датчик.

**Аннотация:** Статья посвящена изучению особенностей применения ионизационных датчиков для исследования характеристик распространения пламени (скорости распространения и ширины зоны химических реакций пламени) в камере сгорания переменного объема. Обзор современных методов исследования процесса сгорания углеводородного топлива в поршневых двигателях показал перспективность применения ионизационных датчиков. На одноцилиндровом двигателе экспериментально получены и исследованы основные параметры сгорания топлива с помощью специально разработанных ионизационных датчиков, предназначенных для определения характеристик распространения пламени при изменении в широком диапазоне за несколько миллисекунд температуры, давления, турбулентности и объема камеры сгорания. Определены изменения ионного тока, турбулентной скорости распространения пламени и ширины зоны химических реакций горения в зависимости от состава топливно-воздушной смеси при изменении ее физико-химических свойств за счет добавок водорода. Показано, что изменение турбулентной скорости распространения пламени при добавке водорода происходит в основном за счет увеличения ее нормальной составляющей, а ширина зоны турбулентного горения линейно связана с величиной ионного тока, и ее изменение отражает интенсивность протекания химических реакций горения. Обнаружено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе, скоростного режима двигателя, сохраняется линейная зависимость ширины пламени от турбулентной скорости распространения пламени во второй фазе сгорания: увеличение скорости соответствует уменьшению ширины пламени.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и энергетических установок нового поколения на альтернативных видах топлива требует глубокого изучения процесса сгорания [1]. Сгорание в поршневых ДВС происходит при изменении в широком диапазоне за несколько миллисекунд температуры, давления, турбулентности и объема камеры сгорания (КС). В этих условиях скорость распространения пламени, а также протяженность зоны горения по объему КС изменяются в широком диапазоне, что обуславливает значительные сложности не только в аналитическом описании процесса, но и в экспериментальном его исследовании [2]. Экспериментальное исследование процесса сгорания в условиях поршневого ДВС производится с использованием различных оптических и зондовых методов [3]. Несмотря на очевидные преимущества, оптические методы диагностики пламени стоят свыше 70 тыс. долларов США и сложны в применении [4]. Более простым и дешевым способом диагностики процесса сгорания является метод, основанный на явлении электропроводности пламени [5; 6]. В конце XX – начале XXI века явление химионизации пламени активно использовалось для исследования процесса сгорания при помощи одноэлектродных ионизационных датчиков [7; 8]. В ряде исследований в качестве ионизационного

датчика использовали свечу зажигания [9]. В этих экспериментах определялось влияние площади поверхности положительного электрода на величину ионного тока, связь ионного тока с отношением топлива и воздуха [10], с величиной индикаторного давления, с детонацией в цилиндре и с влиянием рециркуляции отработавших газов [11; 12]. Однако в этих экспериментах отсутствуют результаты, связывающие электропроводность пламени (ионный ток) с характеристиками распространения пламени – турбулентной скоростью распространения пламени и шириной зоны химических реакций (ЗХР). Проведение экспериментов для получения указанных взаимосвязей, особенно в пристеночных зонах КС, наиболее удаленных от свечи зажигания, где в процессе рабочего хода остается несгоревшим около 10 % топлива, потребовало разработки и изготовления специальных конструкций ионизационных датчиков.

Цель работы – изучение особенностей применения ионизационных датчиков для исследования характеристик распространения пламени (т. е. скорости распространения и ширины ЗХР пламени) в камере сгорания переменного объема.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение характеристик распространения пламени и их связи с явлением химионизации проводилось на

одноцилиндровом ДВС с искровым зажиганием [13; 14]. Для определения характеристик распространения пламени были разработаны четыре типа ионизационных датчиков (ИД): одноэлектродный заширмленный, традиционный одноэлектродный, пятиэлектродный и трехэлектродный. На рис. 1 показана схема камеры сгорания переменного объема с традиционными одноэлектродными ИД.

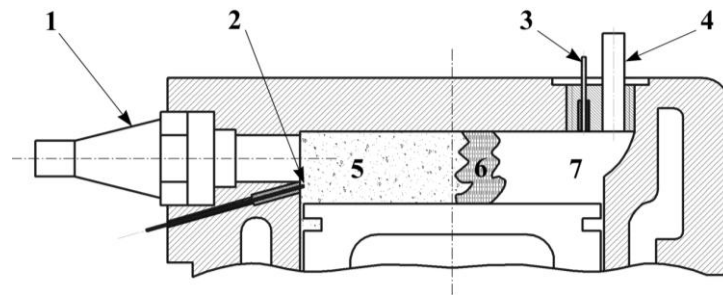
Ионизационный датчик № 1 (ИД-1) расположен на расстоянии 7 мм, ИД-2 – на расстоянии 80 мм от электродов свечи зажигания. По этим датчикам ионизации определялись характеристики распространения пламени и изменение ионного тока в первой и второй половине основной фазы сгорания. При испытаниях по определению изменения нормальной скорости распространения пламени при добавке водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС) вместо корпуса датчиков 3 и 4 устанавливался одноэлектродный ИД (рис. 2 а), для определения направления перемещения пламени и ши-

рины зоны химических реакций горения – пятиэлектродный ИД, конструкция которого показана на рис. 2 б.

Для определения местной турбулентной и нормальной скорости распространения пламени, а также ширины пламени у стенки камеры сгорания использовался трехэлектродный ионизационный датчик, фотография которого представлена на рис. 3. Изменение давления, электропроводности, скорости распространения и ширины пламени осуществлялось за счет добавления водорода в количестве 3 и 5 % по массе. В результате проведенных экспериментов были получены осциллограммы (рис. 4).

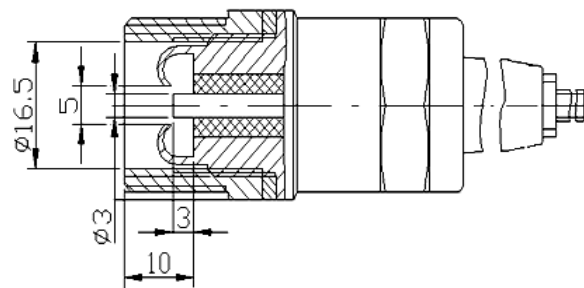
Средняя скорость углеводородного пламени в цилиндре экспериментального двигателя была найдена по формуле

$$U_{cp} = \frac{L_1}{\tau_1},$$

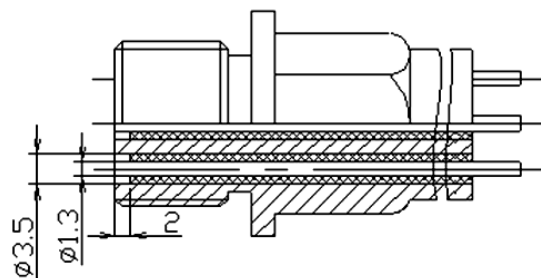


**Рис. 1.** Расположение ионизационного датчика в камере сгорания:

1 – свеча зажигания; 2 – ионизационный датчик; 3 – ионизационный датчик; 4 – датчик давления; 5 – продукты сгорания; 6 – фронт пламени; 7 – топливно-воздушная смесь



а



б

**Рис. 2.** Конструкция ионизационных датчиков:

а – одноэлектродный ионизационный датчик; б – пятиэлектродный ионизационный датчик

где  $L_1$  – расстояние от свечи зажигания двигателя до электрода ИД;

$\tau_1$  – период времени от начала подачи искры свечей зажигания до появления сигнала ионного тока, с.

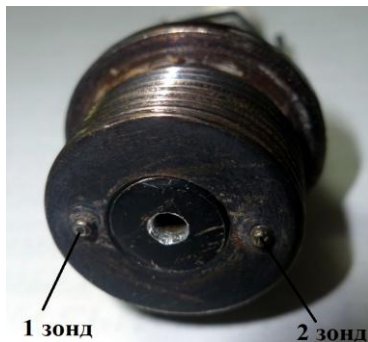


Рис. 3. Трехэлектродный ионизационный датчик

Скорость перемещения фронта пламени в области электродов ИД была найдена по формуле

$$U_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{\tau_{1-2}},$$

где  $L_{1-2}$  – расстояние между электродами ИД, м;

$\tau_{1-2}$  – разница времени возникновения ионного тока у электродов ИД, с.

Определение ширины ЗХР осуществлялось пятиэлектродным датчиком ионизации.

Представленная на рис. 5 методика определения ширины пламени с применением пятиэлектродного ионизационного датчика наиболее точна, так как учитывает возможное вихревое движение топлива у стенок КС. Основной ее недостаток в сложности обработки данных. Эксперименты показали, что с достаточной точно-

стью ширина пламени может быть определена по показаниям каждого электрода датчика по формуле

$$\delta_{ЗХР} = U_{1-2} \cdot \Delta\tau_i - D_{эл},$$

где  $\Delta\tau_i$  – период времени от начала до окончания возникновения сигнала ионного тока, с;

$D_{эл}$  – диаметр электрода ИД.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 6 а и 6 б показано изменение ионного тока в цепи ионизационного зонда № 1 и в полости трехэлектродного ИД соответственно. Максимальное значение ионного тока отмечается в богатой смеси при коэффициенте избытка воздуха,  $\alpha=0,85$ . Полученный эффект объясняется наивысшей концентрацией радикала  $CH^+$  в этой области составов смеси в процессе горения. При обеднении смеси ионный ток уменьшается практически линейно в соответствии с падением концентрации радикала  $CH$  в зоне горения. Добавка водорода в топливо приводит к росту ионного тока, особенно в области обедненной топливом смеси, несмотря на то, что концентрация радикала  $CH$  при этом падает.

Подобное поведение ионного тока свидетельствует об увеличении скорости химических реакций, которое обусловлено промотирующим влиянием добавок водорода на процесс сгорания углеводородных топлив (рис. 7). Скорости распространения пламени в полости датчика ( $U_n$ ) при сжигании бензоводородовоздушных топливных смесей не зависят от степени сжатия, что говорит о сложном механизме распространения пламени в ДВС. Предположительно у входа в полость ИД наблюдается движение турбулентного пламени, а в полости ИД движение пламени становится ламинарным. Добавление водорода в количестве 5 % увеличивает скорость пламени в полости ИД на 50 % (при  $\alpha=1,1$ ). Рост скорости пламени обусловлен увеличением ламинарной скорости, влияние которой усиливается турбулентностью.

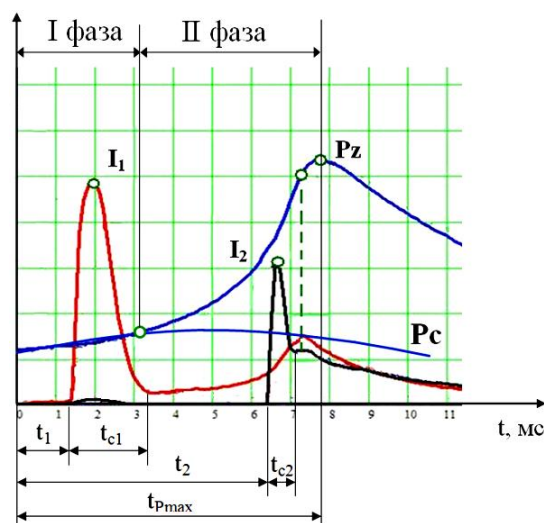


Рис. 4. Осциллограмма ионного тока и давления:

$I_1, I_2$  – ионный ток;  $Pz$  – максимальное давление в камере сгорания;  $Pc$  – давление сжатия

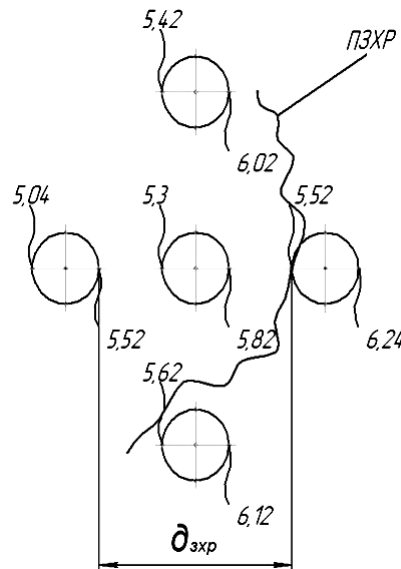


Рис. 5. Схема определения ширины зоны химических реакций пятиэлектродным ионизационным датчиком: ПЗХР – передняя граница зоны химических реакций

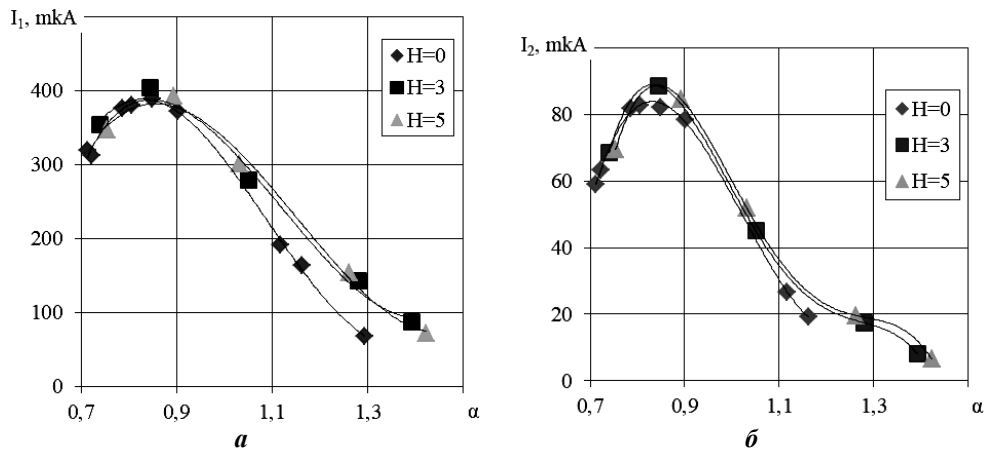


Рис. 6. Влияние состава топлива и добавок водорода на амплитуду ионного тока в цепи ионизационного зонда № 1 (а) и в полости (б) трехэлектродного ионизационного датчика

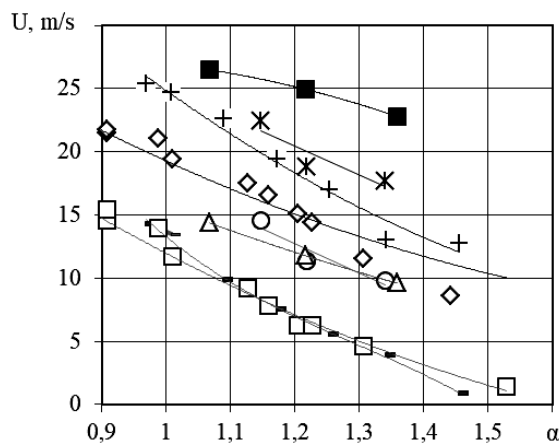


Рис. 7. Сравнение скоростей распространения пламени в полости трехэлектродного ионизационного датчика и между зондами 1 и 2:

$U_n$  – □, ○, –, Δ;  $U_{T1-2}$  – ◊, Ж, +, ■;  
 $\varepsilon=5,9$  – □, ◊, ○, Ж;  $\varepsilon=7$  – +, –, Δ, ■;  
 $g_{H_2}=0\%$  – ◊, □, –, +;  $g_{H_2}=5\%$  – ○, Δ, Ж, ■

При увеличении степени сжатия ДВС зафиксировано увеличение  $U$  за счет возрастания интенсивности турбулентности. Особенно ярко данная тенденция проявляется при сжигании ТВС с коэффициентом избытка воздуха от 0,9 до 1,1. Это объясняется тем, что при данных коэффициентах избытка воздуха горение в ДВС описывается моделью микроламинарного пламени [15; 16]. Турбулентные вихри не проникают в ЗХР пламени, а только меняют ее конфигурацию, поэтому увеличение  $n_{квд}$  приводит к увеличению площади поверхности фронта пламени и, как следствие, росту скорости распространения пламени. С обеднением ТВС прирост скорости распространения пламени за счет прироста интенсивности турбулентности снижается. Так как при сжигании бедных ТВС ширина ламинарного пламени увеличивается [17; 18], турбулентные вихри проникают в ЗХР и влияют на кинетику химических реакций. Турбулентность потока приводит к разрыву ЗХР и снижению скорости распространения пламени. Исследование связи между местной турбулентной скоростью и скоростью распространения пламени в полости ИД показало, что разность между ними не зависит от концентрации активирующей добавки (водорода) в ТВС, а меняется с изменением интенсивности турбулентности. Таким образом, выявлено, что рост турбулентной скорости пламени обусловлен в основном только увеличением интенсивности турбулентности, т. е. разность между  $U_t$

и  $U_k$  характеризует изменение интенсивности турбулентности в КС поршневого двигателя.

На рис. 8–10 представлены результаты определения ширины зоны турбулентного горения от состава топлива, ионного тока и местной турбулентной скорости распространения пламени.

На рис. 8 видно, что ширина ЗХР имеет характерную зависимость от состава ТВС – чем ближе коэффициент избытка воздуха к 0,85, тем тоньше ширина ЗХР. Данная тенденция сохраняется при добавках водорода и смене скоростного режима ДВС. Это объясняется тем, что при  $\alpha=0,85$  скорость химических реакций имеет максимальное значение, в результате увеличивается нормальная скорость пламени и уменьшается ширина ЗХР. Также анализ рис. 8 показал, что добавление водорода приводит к сужению ширины ЗХР турбулентного пламени. Отмечено, что уменьшение ширины ЗХР пламени усиливается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Это связано с тем, что в бедных ТВС количество основного углеводородного топлива меньше, чем в богатых ТВС. Поэтому при  $\alpha>1$  влияние добавок водорода на процесс сгорания становится более заметным.

На рис. 9 представлена связь ширины ЗХР пламени с амплитудой ионного тока при изменении коэффициента избытка топлива, концентрации водорода и скоростного режима ДВС.

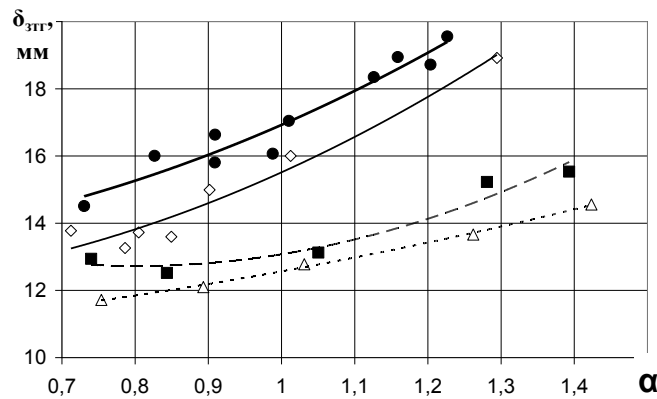


Рис. 8. Зависимость ширины зоны турбулентного горения от состава топливозоудушной смеси:  $n=600 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}=0\%$  –  $\diamond$ ,  $g_{\text{H}_2}=3\%$  –  $\blacksquare$ ,  $g_{\text{H}_2}=5\%$  –  $\Delta$ ;  $n=900 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}=0\%$  –  $\bullet$

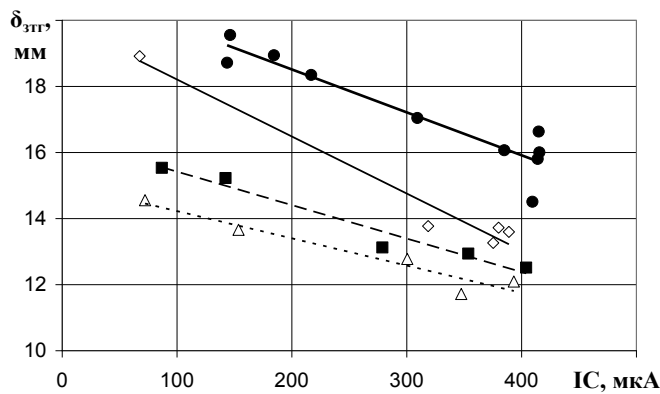
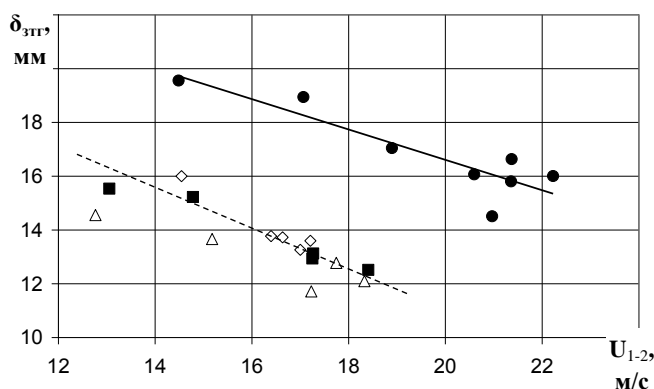


Рис. 9. Зависимость ширины зоны турбулентного горения от максимума ионного тока:  $n=600 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}=0\%$  –  $\diamond$ ,  $g_{\text{H}_2}=3\%$  –  $\blacksquare$ ,  $g_{\text{H}_2}=5\%$  –  $\Delta$ ;  $n=900 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}=0\%$  –  $\bullet$



**Рис. 10.** Связь ширины с локальной скоростью пламени:  
 $n=600 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{H_2}=0\%$  –  $\diamond$ ,  $g_{H_2}=3\%$  –  $\blacksquare$ ,  $g_{H_2}=5\%$  –  $\Delta$ ;  $n=900 \text{ min}^{-1}$ ,  $g_{H_2}=0\%$  –  $\bullet$

Экспериментально обнаружена линейная зависимость ширины ЗХР от электропроводности пламени, оцениваемой амплитудой ионного тока: увеличение ионного тока соответствует уменьшению ширины ЗХР. Это объясняется тем, что значение ионного тока характеризует интенсивность химических реакций в ЗХР пламени: чем выше ток, тем выше скорость химических реакций, а значит, тоньше ширина ЗХР пламени.

На рис. 10 представлена связь ширины ЗХР пламени со скоростью распространения фронта пламени во второй фазе сгорания при изменении коэффициента избытка топлива, концентрации водорода и скоростного режима ДВС.

Выявлена линейная связь ширины пламени с его локальной скоростью, которая сохраняется при варьировании в эксперименте химического состава ТВС и интенсивности турбулентности. При этом увеличение  $U$  соответствует уменьшению  $\delta$ , т. е. чем выше скорость пламени, тем тоньше ширина ЗХР. Также на рис. 10 видно, что при снижении скорости пламени ширина ЗХР стремится к максимуму, т. е. когда режим горения приобретает черты реактора идеального перемешивания, отсутствуют четкие границы между зонами сгоревшей и несгоревшей ТВС и весь процесс сгорания представляет собой одну сплошную ЗХР. С другой стороны, анализ графика показывает, что как бы ни была высока скорость распространения пламени, ширина ЗХР никогда не будет равна нулю. Полученные результаты полностью соответствуют современным представлениям [19; 20] теории турбулентного горения в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием и подтверждают их.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработанные конструкции ионизационных датчиков, предназначенных для установки в различные зоны камеры сгорания переменного объема, позволяют определять в широком диапазоне по составу смеси, ее физико-химическим свойствам и режимам работы двигателя следующие характеристики сгорания: среднюю и местную турбулентную скорость распространения пламени, величину ионного тока пламени, ширину зоны турбулентного горения.

2. Выявлено, что электропроводность углеводородного пламени, оцениваемая амплитудой ионного тока пламени, характеризует изменение турбулентной скорости

распространения пламени в камере сгорания переменного объема.

3. Показано, что при добавке водорода в топливо увеличение турбулентной скорости распространения пламени в основном определяется за счет ее нормальной составляющей.

4. Полученные результаты исследования позволили определить взаимосвязь ширины зоны турбулентного обмена с ионным током пламени и интенсивностью протекания химических реакций горения.

*Статья публикуется при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы назначения стипендии Президента РФ для молодых ученых.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Li H., Gatts H. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged SI Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2017. № 9. P. 35–42.
- Basshuysen R.V. Internal Combustion Engine Handbook. New York: SAE International, 2016. 1130 p.
- Verma G., Prasad R.K., Agarwal R.A. Experimental investigations of combustion, performance and emission characteristics of a hydrogen enriched natural gas fuelled prototype spark ignition engine // Fuel. 2016. Vol. 178. P. 209–217.
- Pastor J., Olmeda P., Lewiski F. Methodology for Optical Engine Characterization by Means of the Combination of Experimental and Modeling Techniques // Applied Sciences. 2018. № 8. P. 2–17.
- Gürbüz H. Experimental Evaluation of Combustion Parameters with Ion-Current Sensor Integrated to Fast Response Thermocouple in SI Engine // Journal of Energy Engineering. 2017. Vol. 143. № 2. P. 04016046.
- 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. Vol. 35. № 23. P. 12918–12929.
- Calcote H. F., King I. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes // Symposium (International) on Combustion. 1955. Vol. 5. № 1. P. 423–434.
- Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическом поле. М.: Металлургия, 1968. 312 с.

9. Butt R.H., Chen Y., Mack J.H. Improving ion current of sparkplug ion sensors in HCCI combustion using sodium, potassium, and cesium acetates: Experimental and numerical modeling // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. № 3. P. 3107–3115.
10. *Flow and Combustion in Reciprocating Engines* / eds. C. Arcoumanis, T. Kamimoto. Verlag: Springer, 2009. 427 p.
11. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin A.P. On the turbulent propagation of a flame in a closed volume // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 58. № 11. P. 1587–1591.
12. Shaikin A.P., Galiev, I.R. Use of Chemi-Ionization to Calculate Temperature of Hydrocarbon Flame // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2018. Vol. 63. № 4. P. 612–614.
13. Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane–hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration // *Russian Aeronautics*. 2016. Vol. 59. № 2. P. 249–253.
14. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д. 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: Изд-во СНЦ РАН, 2016. 259 с.
15. Zhou J.X., Moreau B., Foucher F. Combustion, Performance and Emission Analysis of an Oxygen-Controlling Downsized SI Engine // *Oil and Gas Science and Technology*. 2016. Vol. 71. № 4. P. 49.
16. Morones A. Laminar and turbulent flame speeds for natural gas/hydrogen blends // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2014. Vol. 4B. P. 108941.
17. Khudhair O., Shahad A.K. A Review of Laminar Burning Velocity and Flame Speed of Gases and Liquid Fuels // *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 183–197.
18. Halter F. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005. Vol. 30. № 1. P. 201–208.
19. Barot M., Kolhar S., Tripathi A. Combustion modeling of S.I. engine for prediction of turbulent flame speed // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013. Vol. 2. № 4. P. 1465–1472.
20. Tripathi A.M., Panchal P., Chaudhari V. Turbulent flame speed prediction for S.I. engine using methane as fuel // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2013. Vol. 3. № 4. P. 248–254.
3. Verma G., Prasad R.K., Agarwal R.A. Experimental investigations of combustion, performance and emission characteristics of a hydrogen enriched natural gas fuelled prototype spark ignition engine. *Fuel*, 2016, vol. 178, pp. 209–217.
4. Pastor J., Olmeda P., Lewiski F. Methodology for Optical Engine Characterization by Means of the Combination of Experimental and Modeling Techniques. *Applied Sciences*, 2018, no. 8, pp. 2–17.
5. Gürbüz H. Experimental Evaluation of Combustion Parameters with Ion-Current Sensor Integrated to Fast Response Thermocouple in SI Engine. *Journal of Energy Engineering*, 2017, vol. 143, no. 2, p. 04016046.
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, vol. 35, no. 23, pp. 12918–12929.
7. Calcote H. F., King I. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes. *Symposium (International) on Combustion*, 1955, vol. 5, no. 1, pp. 423–434.
8. Stepanov E.M., Dyachkov B.G. *Ionizatsiya v plameni i elektricheskom pole* [Ionization in flame and electric field]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 312 p.
9. Butt R.H., Chen Y., Mack J.H. Improving ion current of sparkplug ion sensors in HCCI combustion using sodium, potassium, and cesium acetates: Experimental and numerical modeling. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, no. 3, pp. 3107–3115.
10. Arcoumanis C., Kamimoto T., eds. *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*. Springer, 2009. 427 p.
11. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin A.P. On the turbulent propagation of a flame in a closed volume. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 58, no. 11, pp. 1587–1591.
12. Shaikin A.P., Galiev, I.R. Use of Chemi-Ionization to Calculate Temperature of Hydrocarbon Flame. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 612–614.
13. Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane–hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Russian Aeronautics*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 249–253.
14. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. *Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyanie na obrazovanie nesgorevshikh uglevodородov i oksida азота v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdušnuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiem* [Characteristics of flame propagation and their influence on the formation of unburned hydrocarbons and nitric oxide in the exhaust gases with the addition of hydrogen to the fuel-air mixture of spark-ignition power plants]. Samara, SNTs RAN Publ., 2016. 259 p.
15. Zhou J.X., Moreau B., Foucher F. Combustion, Performance and Emission Analysis of an Oxygen-Controlling Downsized SI Engine. *Oil and Gas Science and Technology*, 2016, vol. 71, no. 4, p. 49.
16. Morones A. Laminar and turbulent flame speeds for natural gas/hydrogen blends. *Proceedings of ASME Turbo*

## REFERENCES

1. Li H., Gatts H. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged SI Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, no. 9, pp. 35–42.
2. Basshuysen R.V. *Internal Combustion Engine Handbook*. New York, SAE International, 2016. 1130 p.

- Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2014, vol. 4B, p. 108941.
17. Khudhair O., Shahad A.K. A Review of Laminar Burning Velocity and Flame Speed of Gases and Liquid Fuels. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 183–197.
18. Halter F. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 201–208.
19. Barot M., Kolhar S., Tripathi A. Combustion modeling of S.I. engine for prediction of turbulent flame speed. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 1465–1472.
20. Tripathi A.M., Panchal P., Chaudhari V. Turbulent flame speed prediction for S.I. engine using methane as fuel. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 248–254.

### THE STUDY OF SPECIAL ASPECTS OF COMBUSTION IN A VARIABLE VOLUME COMBUSTION CHAMBER

© 2019

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

**P.V. Ivashin**, PhD (Engineering), Associate Professor,  
assistant professor of Chair “Power Machines and Control Systems”

**I.R. Galiev**, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Design and Operation of Cars”

**I.N. Bobrovsky**, PhD (Engineering),

Deputy Director for Scientific and Methodological Work of the Institute of Chemistry and Environmental Engineering

**A.D. Deryachev**, PhD (Engineering), Engineer of Chair “Power Machines and Control Systems”

**A.Ya. Tverdokhlebov**, Engineer of Chair “Power Machines and Control Systems”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** hydrocarbon fuel; chemiionization; flame propagation characteristics; variable volume combustion chamber; combustion process; combustion phase; width of flame chemical reactions area; flame propagation velocity; ionization sensor.

**Abstract:** The paper covers the study of special aspects of the application of ionization sensors intended for determining the characteristics of flame propagation (flame propagation velocity and the width of chemical combustion reactions area) in the variable volume combustion chamber. The review of contemporary methods of study of the process of hydrocarbon fuel combustion in piston engines showed the perspective of ionization sensors application. On a single-cylinder engine, the authors experimentally obtained and studied the main parameters of fuel combustion using the specially developed ionization sensors designed for identifying the characteristics of flame propagation when changing temperature, pressure, turbulence, and the combustion chamber volume in a wide range within several milliseconds. The variance of ion current, flame propagation turbulent velocity and the width of combustion chemical reactions area are determined depending on the fuel-air mixture composition when changing its physical and chemical properties due to the addition of hydrogen. It is shown that the change in the flame propagation turbulent velocity when adding hydrogen is caused by the increase in its normal component, and the width of turbulent combustion area is linearly related to the ion current value and its variance reflects the intensity of chemical combustion reactions. It is identified that despite the change in the excess air factor, the hydrogen concentration in fuel, and the engine speed rate, the linear dependence of flame width on the flame propagation turbulent velocity in the second combustion phase remains: the velocity increase corresponds to the flame width narrowing.