

## Технологии совершенствования процесса сгорания топливно-воздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием

© 2020

*Шайкин Александр Петрович*<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»

*Галиев Ильдар Ринатович*<sup>\*2</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

*Павлов Денис Александрович*<sup>3</sup>, кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой «Энергетические машины и системы управления»

*Сазонов Михаил Вячеславович*<sup>4</sup>, аспирант кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

\*E-mail: sbs777@yandex.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9832-4753>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6226-8596>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1421-4272>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-1128>

**Аннотация:** В работе рассматривается влияние интенсивности турбулентности и химического состава топлива на скорость распространения пламени в начальной и основной фазах сгорания при изменении состава топливно-воздушной смеси. Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время улучшение характеристик работы поршневых двигателей внутреннего сгорания достигается в основном за счет совершенствования процесса сгорания горючей смеси. При этом отсутствуют данные о влиянии химических и газодинамических факторов на особенности распространения пламени в начальной и основной фазах сгорания. Объектом исследования являлся газопоршневой двигатель внутреннего сгорания, а предметом исследования – процесс сгорания топлива. Химический состав горючей смеси изменялся за счет использования промотирующей добавки водорода в природный газ и изменения коэффициента избытка воздуха. В результате проведенных экспериментов на моторной установке УИТ-85 (т. е. в условиях, максимально приближенных к условиям двигателя внутреннего сгорания) было выявлено, что промотирующая добавка водорода сильнее влияет на скорость пламени в первой фазе сгорания, по сравнению со второй фазой сгорания, так как в первой фазе очаг горения представляет собой искривленный фронт ламинарного пламени и зависит только от химических и теплофизических свойств топливовоздушной смеси. Анализ экспериментальных данных также показал двойственное влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения пламени. В частности, в начале процесса сгорания пульсационная скорость практически не оказывает влияния на скорость распространения пламени, в отличие от основной фазы сгорания, в которой обнаружено увеличение скорости распространения пламени при росте интенсивности турбулентности.

**Ключевые слова:** скорость пламени; турбулентность; пульсационная скорость; водород; камера сгорания; тип топлива; поршневой двигатель.

**Благодарности:** Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Самарской области в рамках назначения денежных выплат молодым ученым и конструкторам, работающим в Самарской области, договор № 183 от 25.05.2020 г.

**Для цитирования:** Шайкин А.П., Галиев И.Р., Павлов Д.А., Сазонов М.В. Технологии совершенствования процесса сгорания топливно-воздушных смесей в ДВС с искровым зажиганием // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 4. С. 51–57. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-51-57.

### ВВЕДЕНИЕ

Улучшение характеристик работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) достигается за счет совершенствования процесса сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС). Основными параметрами, определяющими процесс сгорания, являются скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения [1; 2]. Существует несколько видов формул для определения турбулентной скорости распространения пламени, являющихся развитием зависимостей, предложенных К.И. Щёлкиным [3] и Б. Карловичем [4]. Наиболее удобной из них для проведения качественного анализа влияния различных параметров на изме-

нение турбулентной скорости распространения пламени является формула, предложенная Д. Вейнантом [5]:

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \alpha \cdot \left( \frac{U'}{S_L} \right)^m,$$

где  $S_T$  и  $S_L$  – турбулентная и нормальная скорость распространения пламени соответственно;  
 $U'$  – пульсационная скорость.

Коэффициент  $\alpha$  и показатель степени  $m$ , как показали результаты экспериментальных исследований, определяются различными параметрами (реакционными

характеристиками топлива, масштабом турбулентности, геометрией потока, балластированием топливной смеси продуктами сгорания). Нормальная (ламинарная) скорость распространения пламени определяется по формуле, предложенной Дж. Хейвудом [6]:

$$S_L = S_{L,0} \cdot \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^\beta \cdot \left(\frac{P_0}{P_u}\right)^\gamma,$$

где  $\beta$  и  $\gamma$  – константы для данного топлива и коэффициента избытка воздуха.

Воздействие на турбулентную скорость распространения пламени путем изменения скорости турбулентных пульсаций экспериментально подробно исследовано в работах [7; 8]. Изменение пульсационной скорости и средней скорости перемещения ТВС обеспечивалось использованием десяти различных конструкций камер сгорания, выполненных в поршне экспериментального двигателя. Положение пика пульсационной скорости в зависимости от конструкции камеры сгорания изменялось в диапазоне от –15 градусов до верхней мертвой точки (ВМТ) до 10 градусов после ВМТ. Максимальная величина пульсационной скорости во время сгорания ТВС изменялась от 1 до 3,5 м/с. Следует отметить, что у четырех камер сгорания пик максимальной пульсационной скорости совпадал с максимальной скоростью тепловыделения, у четырех этот пик совпал с началом тепловыделения, у одной пик пульсаций расположен между началом и максимумом тепловыделения и еще у одной максимальное значение пульсационной скорости сохраняется практически неизменным в диапазоне от начала и до достижения приблизительно 75 % тепловыделения. Средняя пульсационная скорость в диапазоне изменения угла поворота коленчатого вала (ПВ) от 40 градусов перед ВМТ до 40 градусов после ВМТ увеличивалась пропорционально росту скоростного режима работы установки. Анализ результатов испытаний показал с большой степенью точности взаимосвязь скорости тепловыделения и средней в диапазоне сгорания пульсационной скорости: чем больше скорости пульсаций, тем выше скорость тепловыделения. Следует отметить, что использование конструкций камер сгорания, обеспечивающих более высокий уровень турбулентности, приводит к увеличению гидравлических потерь и тем самым к снижению эффективного коэффициента полезного действия [9; 10].

Цель работы – изучение влияния интенсивности турбулентности на скорость распространения пламени в начальной и основной фазе сгорания при изменении состава топливовоздушной смеси.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Для определения влияния типа топлива на скорость распространения пламени был проведен ряд экспериментов на универсальной одноцилиндровой моторной установке. Экспериментальная установка состояла из одноцилиндровой моторной установки УИТ-85, оснащенной системами подачи воздуха, газообразных топлива и водорода, параметров работы независимого изменения, измерения и регистрации исследуемых параметров [11]. Определение видимых скоростей распространения пламени ( $U$ ) проводилось при помощи двух

ионизационных датчиков. Первый ионизационный датчик находился на расстоянии 7 мм от свечи зажигания и, таким образом, предоставлял информацию о процессах в первой фазе сгорания топлива. Вторым ионизационным датчиком был установлен на расстоянии 85 мм от свечи зажигания и предоставлял информацию о процессах в основной фазе сгорания. В процессе испытаний изменялись расходы топлива и водорода. Расход воздуха обеспечивался постоянным на данном скоростном режиме работы установки. Коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{G_{\text{возд}}}{l_{\text{н}} \cdot G_{\text{н}} + l_{\text{спг}} \cdot G_{\text{спг}}},$$

где  $l_{\text{н}}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг водорода;

$l_{\text{спг}}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг природного газа,

$G_{\text{н}}$  – расход водорода, кг/ч;

$G_{\text{спг}}$  – расход природного газа, кг/ч;

$G_{\text{возд}}$  – расход воздуха, кг/ч.

Концентрация промотирующей добавки водорода в топливе рассчитывалась по формуле

$$g_{\text{н}} = \frac{G_{\text{н}}}{G_{\text{н}} + G_{\text{спг}}}.$$

Интенсивность турбулентности изменялась в 1,5 раза за счет увеличения частоты вращения коленчатого вала с 600 до 900 об/мин. Все параметры работы установки осциллографировались. В процессе обработки осциллограмм параметров испытаний определялись промежутки времени от подачи напряжения на свечу зажигания до появления ионного тока в цепи ионизационных датчиков. Скорость пламени в исследуемых фазах сгорания рассчитывали по формуле [12]

$$U_i = \frac{L_i}{t_i},$$

где  $t_i$  и  $L_i$  – время появления сигнала датчика и расстояние от свечи зажигания до ионизационного датчика соответственно.

Оценка измеряемой величины скорости распространения пламени, расчет среднего квадратического отклонения, а также исключение грубых погрешностей и промахов, проверка гипотезы о виде распределения экспериментальных данных и расчет доверительных границ погрешности измерения проводились в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений». Статистический анализ экспериментальных данных выявил наличие нормального распределения вероятности. Относительная погрешность скорости распространения пламени варьировалась от 3 % (при сжигании стехиометрической смеси) до 15 % (при сжигании сверхбедной и богатой топливовоздушной смеси). Увеличение относительной погрешности обусловлено ростом межциклового неидентичности рабочего процесса и нестабильностью сгорания топлива при работе экспериментальной моторной установки при  $\alpha < 0,9$  и  $\alpha > 1,2$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На рис. 1 представлены зависимости средней скорости распространения пламени при добавках водорода в метановоздушную смесь (в количестве 29, 47 и 58 % от объемного расхода метана) для двух скоростных режимов работы установки – 600 и 900 об/мин.

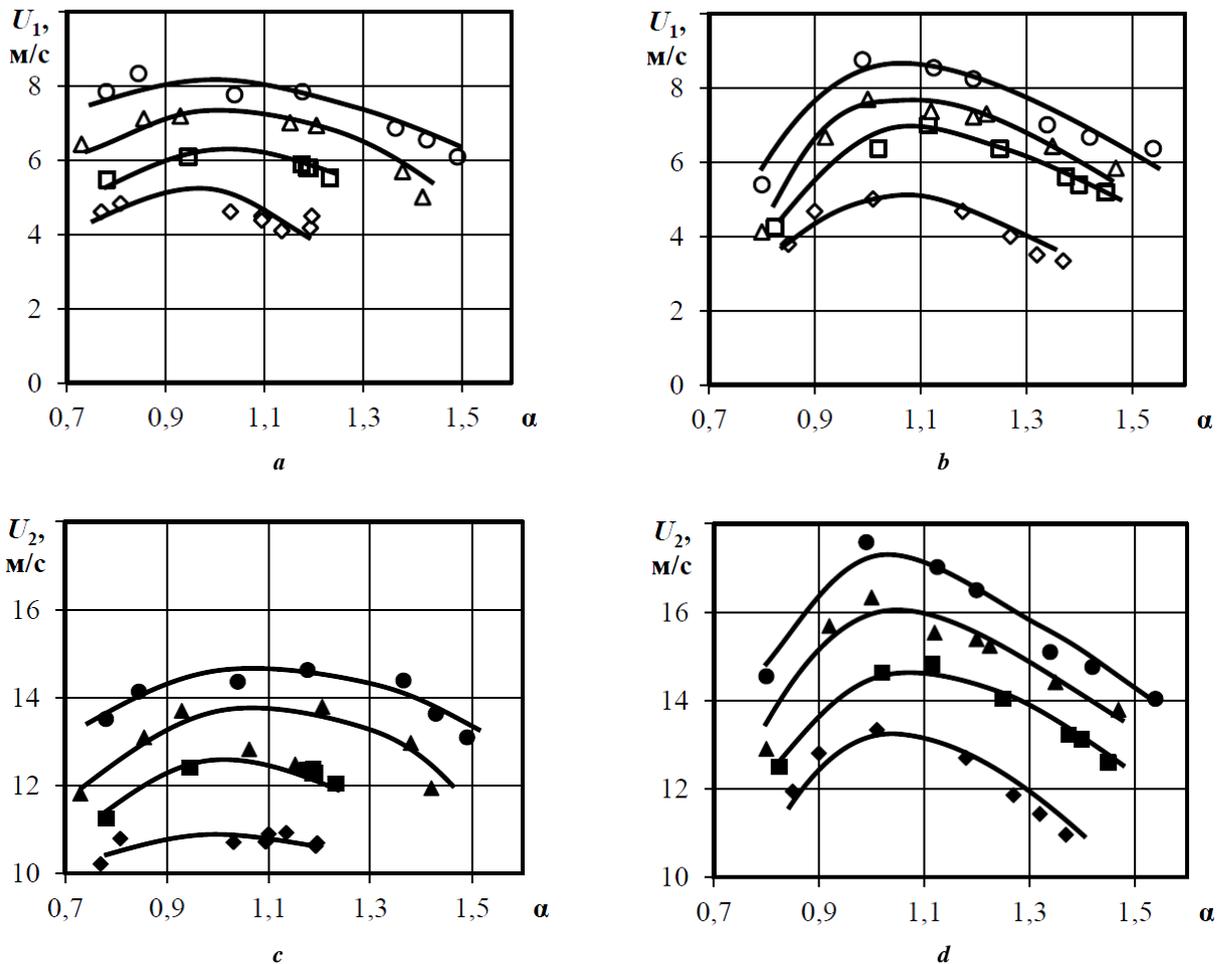
На рис. 1 видно увеличение скорости пламени при использовании промотирующей добавки водорода. При этом, чем больше была концентрация водорода в топливе, тем сильнее увеличивалась скорость пламени. Например, во второй фазе сгорания при  $n=900$  об/мин и стехиометрической смеси (рис. 1 *d*), скорость пламени увеличилась с 13,2 до 17,4 м/с (т. е. на 4,2 м/с) при 58 %-ной добавке водорода, а при  $n=600$  об/мин (рис. 1 *c*) скорость пламени увеличилась с 11 до 14,5 м/с (т. е. на 3,5 м/с). В первой фазе сгорания при  $n=900$  об/мин и стехиометрической смеси (рис. 1 *b*) скорость пламени увеличилась с 5 до 8,7 м/с (т. е. на 3,7 м/с) при 58 %-ной добавке водорода, а при  $n=600$  об/мин (рис. 1 *a*) скорость пламени увеличилась с 5,2 до 8,2 м/с (т. е. на 3 м/с).

Таким образом, видно, что влияние состава смеси на скорость пламени сильнее проявляется в первой фазе сгорания, поскольку в данной фазе очаг горения представляет собой искривленный фронт ламинарного пламени [13; 14] и зависит только от химических и теплофизических свойств топливовоздушной смеси.

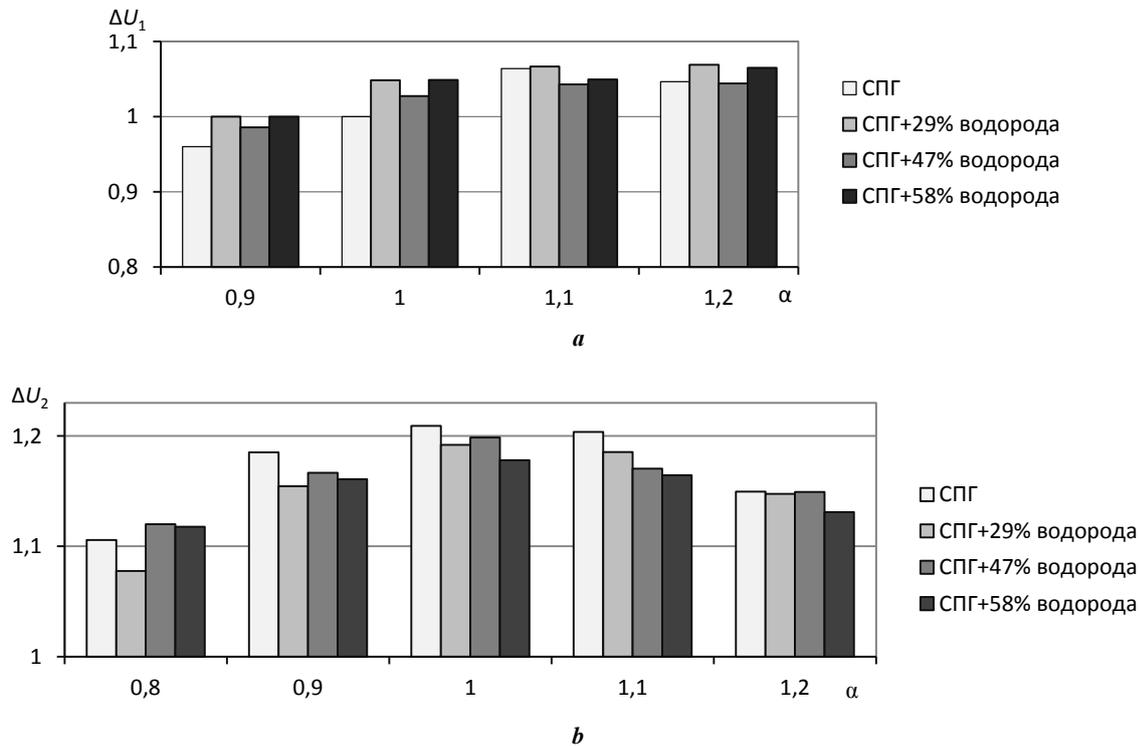
Рассмотрим влияние увеличения скоростного режима работы установки на скорость распространения пламени. Для этого построим графические зависимости (рис. 2) прироста скорости распространения пламени в первичной и вторичной фазах. Изменение скорости распространения пламени ( $\Delta U_i$ ) при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с 600 до 900 мин<sup>-1</sup> определялось по формуле

$$\Delta U_i = \frac{U_{i,900}}{U_{i,600}},$$

где  $i$  – добавка водорода, %.



**Рис. 1.** Скорость распространения пламени:  
*a, b* –  $n=600$  об/мин; *c, d* –  $n=900$  об/мин;  
 $r=0\%$ :  $\diamond, \blacklozenge$ ;  $r=29\%$ :  $\square, \blacksquare$ ;  $r=47\%$ :  $\Delta, \blacktriangle$ ;  $r=58\%$ :  $\circ, \bullet$   
**Fig. 1.** Flame propagation velocity:  
*a, b* –  $n=600$  r/min; *c, d* –  $n=900$  r/min;  
 $r=0\%$ :  $\diamond, \blacklozenge$ ;  $r=29\%$ :  $\square, \blacksquare$ ;  $r=47\%$ :  $\Delta, \blacktriangle$ ;  $r=58\%$ :  $\circ, \bullet$



**Рис. 2.** Изменение скорости распространения пламени в первой (а) и основной (б) фазе сгорания при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с 600 до 900 мин<sup>-1</sup>

**Fig. 2.** Change in the flame propagation velocity in the first (a) and the main (b) combustion phases when increasing the engine crankshaft speed from 600 to 900 min<sup>-1</sup>

На рис. 2 видно, что увеличение пульсационной скорости в 1,5 раза приводит к увеличению скорости распространения пламени во второй (основной) фазе сгорания. Например, при стехиометрическом составе топливоздушной смеси скорость пламени во второй фазе сгорания увеличилась с 11 до 13,2 м/с, а в первой фазе изменения составили от 5,2 до 5 м/с. При этом использование промотирующей добавки водорода не оказывает особого влияния на данную закономерность. Отсутствие существенного влияния пульсационной скорости на интенсивность распространения фронта пламени в первой (начальной) фазе сгорания обусловлено тем, что в данной фазе очаг горения представляет собой искривленный фронт ламинарного пламени [15; 16]. При этом размер очага горения достаточно мал, чтобы турбулентные флуктуации оказали воздействия на его структуру [17; 18].

В свою очередь, увеличение скорости распространения пламени во второй (основной) фазе сгорания при полуторакратном увеличении интенсивности турбулентности объясняется тем, что в данной фазе пламя уже увеличилось в размерах [19; 20] и турбулентным флуктуациям проще повлиять на его структуру, т. е. наблюдается процесс растяжения поверхности пламени. Отметим, что при сжигании бедных и богатых топливоздушных смесей ширина пламени увеличивается, в результате всё больше турбулентных вихрей проникает во фронт пламени, что приводит к увеличению процессов тепломассопереноса и тем самым к снижению скорости химических реакций во фронте пламени.

Так, при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,2, скорость пламени увеличилась с 10,8 до 11 м/с, т. е. прирост скорости пламени с ростом пульсационной скорости значительно замедлился по сравнению с режимом, когда сжигалась стехиометрическая смесь.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, в результате проведенных экспериментов в условиях моторной установки УИТ-85 было выявлено, что интенсивность турбулентности, оцениваемая пульсационной скоростью пламени, по-разному влияет на скорость распространения пламени. В начальной фазе сгорания скорость распространения пламени в основном зависит от кинетики химических реакций и состава топливоздушной смеси. В основной фазе сгорания турбулентность оказывает значительное влияние на скорость распространения пламени.

Выявлено, что промотирующая добавка водорода сильнее влияет на скорость пламени в первой фазе сгорания по сравнению со второй фазой сгорания, поскольку в первой фазе очаг горения представляет собой искривленный фронт ламинарного пламени и зависит только от химических и теплофизических свойств топливоздушной смеси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sandalcı T., Isin O., Galata S., Karagoz Y., Guler I. Effect of hythane enrichment on performance, emission

- and combustion characteristics of an ci engine // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. № 5. P. 3208–3220. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.069.
2. Tangoz S., Kahraman N., Akansu S.O. The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. № 40. P. 25766–25780. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.076.
  3. Щёлкин К.И., Трошин Я.К. О сгорании в турбулентном потоке // *Журнал технической физики*. 1943. Т. 13. № 9-10. С. 520–530.
  4. Karlovitz B., Denniston D., Wells F. Investigation of turbulent flames // *Journal of Chemical Physics*. 1956. № 4. P. 541–552.
  5. Veynante D., Vervisch L. Turbulent Combustion Modelling // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2002. Vol. 28. № 3. P. 193–266. DOI: 10.1016/S0360-1285(01)00017-X.
  6. Subba R.K., Ganesan V., Gopalakrishnan K.V., Murthy B.S. Modelling of combustion process in a spark ignited hydrogen engine // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1983. Vol. 8. № 8. P. 931–933. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90118-0.
  7. Johansson B., Olsson K. Combustion chambers for natural gas SI engines part 1: Fluid flow and combustion // *SAE Technical papers*. 1995. № 950469. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4271/950469>.
  8. Olsson K., Johansson B. Combustion chambers for natural gas SI engines part 2: Combustion and emissions // *SAE Technical papers*. 1995. № 950517. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.4271/950517>.
  9. Li H., Gatts H., Liu S., Wayne S., Clark N., Mather D. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged Spark Ignition Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017. Vol. 140. № 9. Article number 091504. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038692>.
  10. Basshuysen R.V. *Internal Combustion Engine Handbook*. New York: SAE International, 2016. 1130 p.
  11. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the Relationship of the Width of the Turbulent Combustion Zone with the Fuel Composition, Pressure, Propagation Speed, and Electrical Conductivity of the Flame // *Technical physics*. 2020. Vol. 65. № 7. P. 1020–1023. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378422007018X>.
  12. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Исследование связи скорости распространения пламени метановодородного топлива ДВС с параметрами ионизационного тока и концентрацией водорода // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2016. № 2. С. 87–91.
  13. Verma G., Prasad R.K., Agarwal R.A., Jain S., Agarwal A.K. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.022>.
  14. Pastor J.V., Olmeda P., Martin J., Lewiski F. Methodology for Optical Engine Characterization by Means of the Combination of Experimental and Modeling Techniques // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8. № 12. Article number 2571. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122571>.
  15. Khudhair O., Shahad H.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.
  16. Giusti A., Mastorakos E. Turbulent Combustion Modelling and Experiments: Recent Trends and Developments // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2019. Vol. 103. № 4. P. 847–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-019-00072-6>.
  17. Cutcher H.C., Barlow R.S., Magnotti G., Masri A.R. Statistics of scalar dissipation and reaction progress in turbulent flames with compositional inhomogeneities // *Combustion and Flame*. 2018. Vol. 194. P. 439–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.05.030>.
  18. Giusti A., Mastorakos E., Hassa C., Heinze J., Magens E., Zedda M. Investigation of flame structure and soot formation in a single sector model combustor using experiments and numerical simulations based on the large eddy Simulation/Conditional moment closure approach // *Journal of engineering for gas Turbines and Power*. 2018. Vol. 140. № 6. Article number 061506. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038025>.
  19. Evans M.J., Sidey J.A.M., Ye J., Medwell P.R., Dally B.B., Mastorakos E. Temperature and reaction zone imaging in turbulent swirling dual-fuel flames // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2018. Vol. 37. № 2. P. 2159–2166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.076>.
  20. Shaikin A.P., Galiev I.R. Specific features of combustion of methane-hydrogen mixtures in piston power plants and engines // *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2020. Vol. 2020. № 1. P. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-1-21-25>.

## REFERENCES

1. Sandalci T., Isin O., Galata S., Karagoz Y., Guler I. Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an ci engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 5, pp. 3208–3220. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.069.
2. Tangoz S., Kahraman N., Akansu S.O. The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 40, pp. 25766–25780. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.076.
3. Shchelkin K.I., Troshin Ya.K. Combustion in turbulent flow. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1943, vol. 13, no. 9-10, pp. 520–530.
4. Karlovitz B., Denniston D., Wells F. Investigation of turbulent flames. *Journal of Chemical Physics*, 1956, no. 4, pp. 541–552.
5. Veynante D., Vervisch L. Turbulent Combustion Modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, vol. 28, no. 3, pp. 193–266. DOI: 10.1016/S0360-1285(01)00017-X.
6. Subba R.K., Ganesan V., Gopalakrishnan K.V., Murthy B.S. Modelling of combustion process in a spark ignited hydrogen engine. *International Journal of*

- Hydrogen Energy*, 1983, vol. 8, no. 8, pp. 931–933. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90118-0.
7. Johansson B., Olsson K. Combustion chambers for natural gas SI engines part 1: Fluid flow and combustion. *SAE Technical papers*, 1995, no. 950469, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4271/950469>.
  8. Olsson K., Johansson B. Combustion chambers for natural gas SI engines part 2: Combustion and emissions. *SAE Technical papers*, 1995, no. 950517, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.4271/950517>.
  9. Li H., Gatts H., Liu S., Wayne S., Clark N., Mather D. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged Spark Ignition Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, vol. 140, no. 9, article number 091504. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038692>.
  10. Basshuysen R.V. *Internal Combustion Engine Handbook*. New York, SAE International Publ., 2016. 1130 p.
  11. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the Relationship of the Width of the Turbulent Combustion Zone with the Fuel Composition, Pressure, Propagation Speed, and Electrical Conductivity of the Flame. *Technical physics*, 2020, vol. 65, no. 7, pp. 1020–1023. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378422007018X>.
  12. Shaykin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane–hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Russian Aeronautics*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 249–253. DOI: 10.3103/S106879981602015X.
  13. Verma G., Prasad R.K., Agarwal R.A., Jain S., Agarwal A.K. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.022>.
  14. Pastor J.V., Olmeda P., Martin J., Lewiski F. Methodology for Optical Engine Characterization by Means of the Combination of Experimental and Modeling Techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2018, vol. 8, no. 12, article number 2571. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122571>.
  15. Khudhair O., Shahad H.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.
  16. Giusti A., Mastorakos E. Turbulent Combustion Modeling and Experiments: Recent Trends and Developments. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2019, vol. 103, no. 4, pp. 847–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-019-00072-6>.
  17. Cutcher H.C., Barlow R.S., Magnotti G., Masri A.R. Statistics of scalar dissipation and reaction progress in turbulent flames with compositional inhomogeneities. *Combustion and Flame*, 2018, vol. 194, pp. 439–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.05.030>.
  18. Giusti A., Mastorakos E., Hassa C., Heinze J., Magens E., Zedda M. Investigation of flame structure and soot formation in a single sector model combustor using experiments and numerical simulations based on the large eddy Simulation/Conditional moment closure approach. *Journal of engineering for gas Turbines and Power*, 2018, vol. 140, no. 6, article number 061506. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038025>.
  19. Evans M.J., Sidey J.A.M., Ye J., Medwell P.R., Dally B.B., Mastorakos E. Temperature and reaction zone imaging in turbulent swirling dual-fuel flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, vol. 37, no. 2, pp. 2159–2166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.076>.
  20. Shaikin A.P., Galiev I.R. Specific features of combustion of methane-hydrogen mixtures in piston power plants and engines. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-1-21-25>.

## THE TECHNOLOGIES OF IMPROVING THE PROCESS OF AIR-FUEL MIXTURE COMBUSTION IN SPARK IGNITION ENGINES

© 2020

**Aleksandr P. Shaikin**<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,  
professor of Chair “Power Machines and Control Systems”

**Ildar R. Galiev**<sup>\*2</sup>, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Design and Operation of Cars”

**Denis A. Pavlov**<sup>3</sup>, Phd (Engineering), of Chair “Power Machines and Control Systems”

**Mikhail V. Sazonov**<sup>4</sup>, postgraduate student of Chair “Power Machines and Control Systems”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

\*E-mail: [sbs777@yandex.ru](mailto:sbs777@yandex.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9832-4753>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6226-8596>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1421-4272>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-1128>

**Abstract:** The paper considers the turbulence intensity and the fuel chemical composition impact on the flame propagation velocity at the initial and main combustion phases when changing the air-fuel mixture composition. The relevance of the study is caused by the fact that currently, the improvement of conventional engine operation characteristics is mainly achieved through the improvement of the fuel mixture combustion process. However, there are no data on the influence of chemical and gas-dynamic factors on the peculiarities of flame propagation at the initial and main combustion phases. The gas reciprocating internal combustion engine was the object of the research, and the subject of the study was the fuel combustion process. Fuel chemical composition changed due to the promoting addition of hydrogen to the natural gas and

variations of the excess-air coefficient. The experiments carried out on the UIT-85 power plant (i.e. under the simulated internal combustion engine conditions) show that the promoting addition of hydrogen stronger influences the flame velocity in the initial combustion phase compared to the second combustion phase, as a combustion source in the first phase is a laminar flame bent front and depends only on chemical and thermo-physical properties of the fuel-air mixture. The analysis of experimental data showed the dual impact of turbulence intensity on the flame propagation velocity. In particular, at the beginning of the combustion process, the fluctuating velocity scarcely influences the flame propagation velocity, as opposed to the main combustion phase, where the flame propagation velocity increases at the increase of turbulence intensity.

**Keywords:** flame velocity; turbulence; fluctuating velocity; hydrogen; combustion chamber; fuel type; reciprocating engine.

**Acknowledgements:** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Samara region as a part of the monetary benefits assignment to young scientists and engineers who work in the Samara region, contract No.183 of May 25, 2020.

**For citation:** Shaikin A.P., Galiev I.R., Pavlov D.A., Sazonov M.V. The technologies of improving the process of air-fuel mixture combustion in spark ignition engines. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 4, pp. 51–57. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-51-57.