

Научная статья  
УДК 621.43

## Характеристики распространения пламени при использовании альтернативных видов топлив в камере сгорания переменного объема

Александр Петрович Шайкин<sup>1</sup>, Вячеслав Евгеньевич Епишкин<sup>2</sup>

Антон Вячеславович Семенов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Тольяттинский государственный университет (ТГУ), Тольятти, Россия

<sup>1</sup>a\_shajkin@mail.ru

<sup>2,3</sup>ts90@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментального исследования средней скорости распространения пламени в основной фазе сгорания при использовании метана и бензина и при добавке водорода в эти виды топливно-воздушной смеси. Выполнена оценка изменения средней скорости распространения пламени. Получены графические зависимости средней скорости распространения пламени, показывающие различный характер их изменения для бензина и метана по составу ТВС. Максимум скорости распространения пламени для метано-воздушной и метано-водородно-воздушной смеси достигается при коэффициенте избытка воздуха,  $\alpha$ , в районе 1,1, для бензовоздушной и бензо-водородно-воздушной смеси в области 0,85-0,9. Причём для бензина скорости пламени во всём диапазоне смеси выше.

При добавке водорода в количестве от массы 3 и 5 % для бензина, 5 и 10 % для метана скорости распространения пламени возрастают во всём диапазоне смеси с увеличением эффекта роста при обеднении смеси. Для бензовоздушной смеси добавка водорода более эффективна, чем для метана, в области  $\alpha$ , превышающей 1,0.

**Ключевые слова:** альтернативные топлива, камера сгорания, переменный объём, сгорание, фаза, пламя, распространение, скорость, водород, добавка, состав, смесь, сравнение.

**Для цитирования:** Шайкин А.П., Епишкин В.Е., Семенов А.В. Характеристики распространения пламени при использовании альтернативных видов топлив в камере сгорания переменного объема // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

## Characteristics of the flame distribution using alternative types of fuels in the combustion chamber with variable volume

Alexander P. Shaikin<sup>1</sup>, Vyacheslav E. Epishkin<sup>2</sup>, Anton V. Semenov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Togliatti State University (TSU), Togliatti, Russia

<sup>1</sup>a\_shajkin@mail.ru

<sup>2,3</sup>ts90@yandex.ru

**Abstract.** Results of an experimental research of the average velocity of the flame distribution in the main phase of combustion using methane and gasoline and with the addition of hydrogen to these types of fuel-air mixture are presented. Evaluation of changes of the average velocity of the flame distribution is executed. Graphical dependences of the average velocity of the flame distribution which show different character of their changes for gasoline and methane from the composition of fuel-air mixture are obtained. The maximum of the velocity of the flame distribution for methane-air and methane-hydrogen-air mixtures is achieved at the excess air ratio  $\alpha$  about 1,1 while for gasoline-air and gasoline-hydrogen-air mixtures in the  $\alpha$  range of 0,85-0,9. Moreover, for gasoline velocity of the flame distribution is higher for the entire range of the fuel-air mixture.

With the addition of hydrogen in an amount of 3 and 5 % by weight for gasoline and 5 and 10 % by weight for methane velocities of the flame distribution are increased for the entire range of the fuel-air mixture with the increase of the benefit with more the mixture is lean. For gasoline-air mixture the addition of hydrogen is more efficient than for methane at the range of  $\alpha$  higher than 1,0.

**Keywords:** alternative fuels, combustion chamber, variable volume, combustion, phase, flame, distribution, velocity, hydrogen, addition, composition, mixture, comparison.

**For citation:** Shaikin A.P., Epishkin V.E., Semenov A.V. Characteristics of the flame distribution using alternative types of fuels in the combustion chamber with variable volume. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2023. №2 (36).

### Введение

Непрерывно возрастающие требования по снижению токсичности отработавших газов и повышению эффективности работы энергетических установок как наземного, так и воздушного транспорта потребовали проведения научных исследований и конструкторских разработок не только в области изменения и совершенствования конструкций двигателей и их систем, но и в широком применении альтернативных видов топлива. Из достаточно большой номенклатуры таких видов топлива наибольшее внимание привлекли природный газ и водород. В наземном транспорте природный газ нашёл достаточно широкое применение в разных странах, водород используется в серийных машинах в Японии. В авиации природный газ и водород применяются в опытных разработках нашей страны и в США.

Как показали исследовательские работы, широкое применение водорода в качестве основного топлива в настоящее время ограничено возможностями его производства в промышленных объёмах и наличия материалов, обеспечивающих требуемый ресурс эксплуатации двигателей.

Недостатком природного газа является ограниченность его по эффективности рабочего цикла и обеспечению ожидаемого ужесточения норм токсичности отработавших газов.

В этом отношении является перспективным использование альтернативных видов топлива, состоящих из традиционных углеводородных (бензин, природный газ) с небольшими добавками водорода. Как показали экспериментальные исследования [1–5] небольшие добавки водорода, до 5...10% от массы топлива, позволяют заметно повысить эффективность рабочего цикла и снизить токсичность отработавших газов по несгоревшим углеводородам. Так как добавка водорода в первую очередь приводит к росту скорости распространения пламени, то определение особенностей влияния добавок водорода на процесс горения ТВС применительно к камерам сгорания поршневых двигателей является актуальным.

### **Экспериментальная установка и обработка результатов испытаний**

Эксперименты по исследованию процесса сгорания альтернативных топлив с искровым зажиганием проведены на моторной одноцилиндровой установке УИТ-85 с искровым зажиганием [6, с. 98-100], которая позволяет детально изучать влияние изменения определяющих параметров на характеристики распространения пламени.

Определение характеристик распространения пламени проводилось при использовании ионизационных датчиков (ИД), устанавливаемых в наиболее удалённой от свечи зажигания зоне КС [7, с. 72-73].

При проведении экспериментов выполнялась одновременная регистрация сигналов с ИД, искры зажигания, датчика положения коленчатого вала, датчика давления и записи осциллограмм с помощью

многоканального аналого-цифрового преобразователя L-Card в память персонального компьютера [7, с. 72-73].

Осреднённые сигналы оценивались по промежутку времени от начала зажигания до возникновения импульса ионного тока в электрической цепи ИД.

Изменялись следующие параметры: состав ТВС (от 0,8 до 1,6) и доля добавляемого водорода в топливо, составляющая 3; 5 и 10 % (по массе).

Массовая доля водорода определялась по формуле:

$$g_H = \frac{G_H}{G_H + G_m},$$

где  $G_H$  – расход водорода, кг/ч;  $G_m$  – расход бензина или метана, кг/ч.

Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле, при этом стоит отметить, что  $G_{\text{возд}}$  для каждой частоты вращения КВ был постоянным, т.е. при  $n_{\text{КВ}}=900 \text{ мин}^{-1}$   $G_{\text{возд}}=14 \text{ кг/ч}$ .

$$\alpha = \frac{G_{\text{возд}}}{l_H \cdot G_H + l_m \cdot G_m},$$

где  $l_H$  – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг водорода;  $l_m$  – для сжигания 1 кг бензина или метана.

Среднее значения скорости распространения пламени ( $U$ ) определялось по результатам измерений промежутка времени ( $t$ ) от подачи искрового разряда до возникновения импульса напряжения ионного тока по формуле

$$U = \frac{L}{t},$$

где  $L$  – расстояние от свечи зажигания до электрода ИД, м.

Прирост скорости распространения пламени определялся по формуле по добавкам водорода  $\Delta U_{+H} = U_{+H} - U_{\text{без } +H}$ ;

При изменении одного из параметров работы установки, менялся и вид осредненного импульса ионного тока. Анализ осциллограмм показывает, что информация, полученная по показаниям ИД, удаленного от свечи зажигания, отражает процессы горения в основной фазе [8, с. 61-68].

## Результаты экспериментов и их анализ

Рассмотрим результаты исследования изменения средней скорости распространения пламени при использовании метано-воздушной и бензовоздушной смеси при различных добавках водорода, представленные на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 показаны графические зависимости средней скорости распространения пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества газообразного водорода, добавляемого в топливно-воздушную смесь (ТВС) в основной фазе сгорания.

Качественно графические зависимости средних скоростей распространения пламени по составу смеси и при добавке водорода изменяются в виде кривых, близких по виду к эквидистантным.

Для всех составов смеси при добавке водорода скорость распространения пламени в бензовоздушной смеси выше, чем в метано-воздушной.

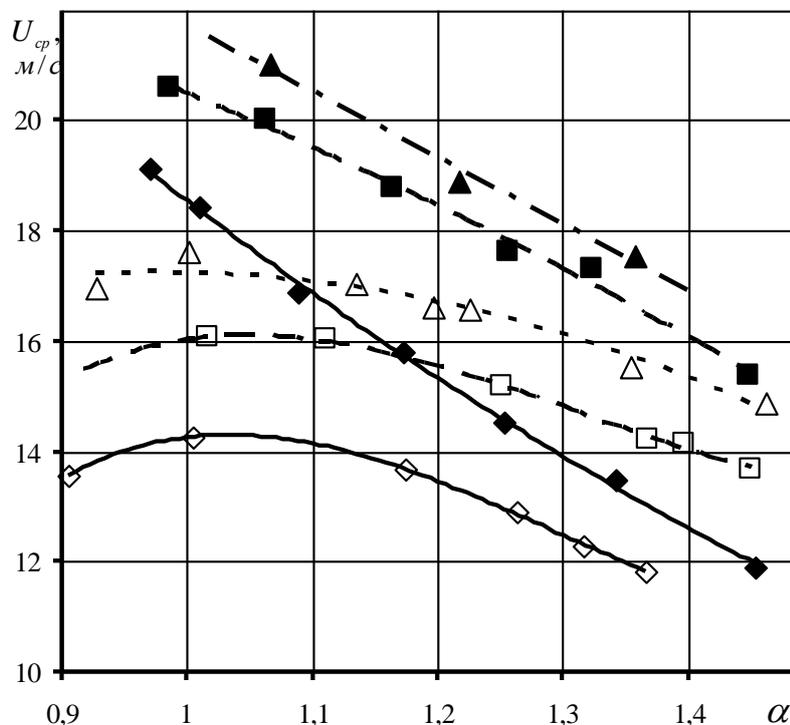


Рис. 1. Зависимость средней скорости распространения фронта пламени при добавке газообразного водорода ( $n_{квд} = 900$  об/мин,  $\varepsilon=7$ ): бензин  $\text{C}_{\text{H}_2}$ , %:  $\blacklozenge$  – 0;  $\blacksquare$  – 3;  $\blacktriangle$  – 5; метан  $\text{C}_{\text{H}_2}$ , %:  $\diamond$  – 0;  $\square$  – 5;  $\triangle$  – 10

Кроме того, отличие изменения величины средней скорости при использовании бензовоздушной смеси по сравнению со сгоранием метано-воздушной смеси заключается в том, что для бензовоздушной смеси максимум скорости достигается в районе коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,85$ , для метано-воздушной –  $\alpha = 1,1$ . Причина этого обусловлена различием коэффициента молекулярной диффузии бензина, метана и водорода. В итоге увеличение концентрации водорода в ТВС приводит к смещению максимума скорости распространения пламени в область обеднения смеси [9, с. 222-223].

На рисунке 2 показано влияние доли добавляемого водорода на прирост скорости пламени для этих видов топлива.

В основной фазе сгорания добавка водорода в ТВС при обеднении смеси обеспечивает непрерывный прирост скорости пламени. Следует отметить, что для бензовоздушной смеси этот эффект проявляется в большей мере. Так, при изменении  $\alpha$  от 1,0 до 1,3 добавка водорода в 5 % приводит к увеличению скорости пламени для бензовоздушной смеси примерно на 1,8 м/с больше, чем для метано-воздушной.

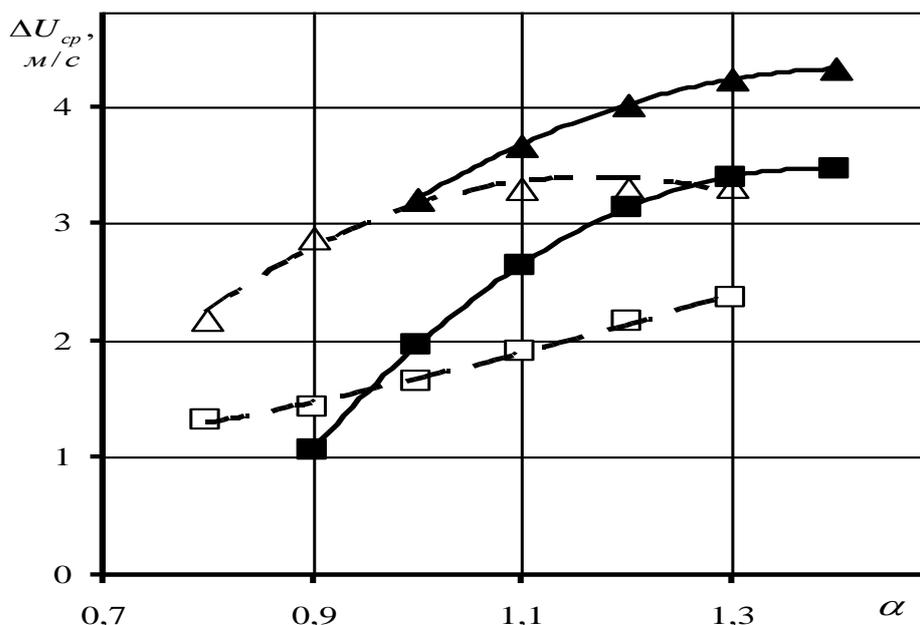


Рис. 2. Зависимость прироста средней скорости распространения фронта пламени при добавке газообразного водорода ( $n_{КВД} = 900$  об/мин,  $\varepsilon = 7$ ): бензин  $CH_2$ , %: ■ – 3; ▲ – 5; метан  $CH_4$ , %: □ – 3; Δ – 5

Турбулентную скорость распространения пламени,  $U_T$ , Варнатц и др. [10, с. 245] предложили оценивать в виде:

$$U_T = U_n + U',$$

где  $U_n$  – нормальная составляющая, а  $U'$  – пульсационная скорость распространения пламени.

В этих экспериментах изменялся только физико-химический состав смеси при сохранении постоянными остальных параметров работы установки. Следовательно, увеличение турбулентной скорости пламени происходило за счёт возрастания её нормальной составляющей.

### Выводы

1. Для всех составов смеси при добавке водорода скорость распространения пламени в бензовоздушной смеси выше, чем в метано-воздушной.
2. В метано-воздушной смеси максимум скорости распространения пламени смещается в область более бедной смеси по сравнению с бензовоздушной.
3. В основной фазе сгорания добавка водорода в ТВС при обеднении смеси обеспечивает непрерывный прирост скорости пламени. Причём для бензовоздушной смеси этот эффект проявляется в большей мере.
4. Так как в экспериментах изменялся только физико-химический состав смеси при сохранении постоянными остальных параметров работы установки, то увеличение турбулентной скорости пламени происходило за счёт возрастания её нормальной составляющей.

### Список источников

1. Бортников, Л.Н. Экспериментальная и расчетная оценки эффективности применения водорода на автомобиле / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 33-36.
2. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков, В.В. Смоленский // Естественные и технические науки. – 2013. – № 1 (63). – С. 346-350.

3. Шайкин, А.П. Влияние фундаментальных характеристик распространения пламени на полноту сгорания топлива / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев, А.В. Бобровский // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 2. – С. 78-89.
4. Шайкин, А.П. Влияние скорости распространения и ширины зоны турбулентного горения пламени на концентрацию несгоревших углеводородов и полноту сгорания топлива в двигателе с искровым зажиганием / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев // Вестник Московского государственного университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2019. – № 4 (127). – С. 111-123.
5. Шайкин, А.П. О связи ширины зоны турбулентного горения с составом топлива, давлением, скоростью распространения и электропроводностью пламени / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 9. – вып. 7. – С. 1064-1067.
6. 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: монография / А.П. Шайкин, П.В. Ивагин, И.Р. Галиев, А.Д. Дерячев. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016. – 259 с.
7. Дерячев, А.Д. Эмпирическая модель оценки концентрации оксидов азота при добавке водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием: специальность 05.04.02 "Тепловые двигатели": диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Дерячев Александр Дмитриевич. – Тольятти, 2015. – 150 с.
8. Максимальное давление сгорания и его связь с характеристиками сгорания в двигателях с искровым зажиганием / А.П. Шайкин, А.Д. Дерячев, М.В. Сазонов, С.С. Хлопоткин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2019. – № 3 (49). – С. 61-68.
9. Кузнецов, В.Р. Турбулентность и горение / В.Р. Кузнецов, В.А. Сабельников. – Москва: «Наука», 1986. – 288 с.
10. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл ; перевод с англ. Г.Л. Агафонова ; под ред. П.А. Власова. – М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2006. – 352 с.

### References

1. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2013, no. 6, pp. 33-36.
2. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Smolenski V.V. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2013, vol. 1 (63), pp. 346-350.
3. Shaikin A.P., Galiev I.R., Bobrovski A.V. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2019, no. 2, pp. 78-89.
4. Shaikin A.P., Galiev I.R. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie*, 2019, vol. 4 (127), pp.111-123.
5. Shaikin A.P., Galiev I.R. *Zhurnal tehicheskoi fiziki*, 2020, vol. 9, no. 7, pp.1064-1067.

6. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. *Harakteristiki rasprostraneniya plameni i ih vliyanie na obrazovanie nesgorevshih uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshih gazah pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnuyu smes energeticheskikh ustanovok s iskrovim zazhiganiem* (Characteristics of the flame distribution and their influence on formation of unburned hydrocarbons and nitrogen oxides in exhaust gases with addition of hydrogen in fuel-air mixture of energy machines with spark ignition), Samara, Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2016, 259 p.
7. Deryachev A.D. *Empiricheskay model ocenki koncentracii oksidov azota pri dobavke vodoroda v TVS dvigatelei s iskrovim zazhiganiem* (Empirical model of evaluation of nitrogen oxides concentration with addition of hydrogen in fuel-air mixture of spark ignition engines), Candidate's thesis, Togliatti, TSU, 2015, 150 p.
8. Shaikin A.P., Deryachev A.D., Sazonov M.V., Hlopotkin S.S. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, vol. 3 (49), pp. 61-68.
9. Kuznecov V.R., Sabelnikov V.A. *Turbulentnost i gorenje* (Turbulence and combustion), Moscow, Nauka, 1986, 288 p.
10. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Goreniye. Fizicheskiye i khimicheskiye aspekty, modelirovaniye, eksperimenty, obrazovaniye zagryaznyayushchikh veshchestv* (Combustion. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants), Moscow, FIZMATLIT, 2006, 352 p.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ

### *Информация об авторах*

**Шайкин Александр Петрович**, д-р техн. наук, проф., ТГУ.

**Епишкин Вячеслав Евгеньевич**, ст. преподаватель, ТГУ.

**Семенов Антон Вячеславович**, аспирант, ТГУ.

### *Information about the authors*

**Shaikin Alexander P.**, Dr. Sc., professor, TSU.

**Epishkin Vyacheslav E.**, senior lecturer, TSU.

**Semenov Anton V.**, postgraduate, TSU.

*Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».*

*Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.*

*The article was submitted 03.03.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 06.06.2023.*