

**К ВОПРОСУ О ВЗАИМОСВЯЗИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ**

© 2015

*А.П. Шайкин*, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»*П.В. Ивахин*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»*И.Р. Галиев*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»*А.Д. Дерячев*, аспирант*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** хемоионизация; турбулентная скорость пламени; углерод; хитан; поршневой двигатель.

**Аннотация:** Обосновано применение нового альтернативного топлива – хитана (смеси метана с водородом) в транспортных и стационарных установках. Показано, что для определения оптимального состава предлагаемого топлива на разных режимах работы двигателя необходимо знать его влияние на процесс сгорания. В связи с этим в работе были исследованы характеристики турбулентного пламени предварительно перемешанной смеси метана с водородом. Результаты экспериментов, полученные в условиях поршневого двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием, показали, что турбулентная скорость распространения пламени определяется поступательным движением фронта пламени, зависящим как от турбулентности топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя, так и от кинетики химических реакций горения. Выявлено увеличение тока ионизации метано-водородного пламени с ростом интенсивности его турбулентности, достигаемым увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя, и массовой доли углерода в горючей смеси за счет изменения в ней концентрации водорода и коэффициента избытка воздуха. Дана интерпретация полученных результатов на основе современных представлений теории горения. По результатам исследований разработан новый расчетно-эмпирический метод определения турбулентной скорости распространения метано-водородного пламени посредством показаний ионизационного датчика. Сравнение скоростей распространения пламени, найденных экспериментально и рассчитанных по предлагаемому методу при сжигании бедных и стехиометрических топливных смесей выявило наличие между ними 5 % расхождения, а во время сжигания богатой смеси расхождение возрастало до 10 %. Это подтверждает целесообразность использования изложенного в статье метода на стадии проектирования газопоршневого двигателя внутреннего сгорания.

Усугубляющиеся вследствие роста автотранспорта энергетические и экологические проблемы актуализируют использование в качестве автомобильного топлива хитана (смеси метана с водородом) как наиболее перспективного способа улучшения экологических и энергетических характеристик автомобильного двигателя [1; 2]. Для определения оптимального состава смесового топлива на разных режимах работы двигателя необходимо знать его влияние на процесс сгорания, характеризующийся скоростью распространения пламени [3]. Это обуславливает необходимость в ее определении и учете при конструировании новых моделей двигателей. Наиболее простым и дешевым способом определения скорости пламени является метод ионизационных зондов [4]. Так как хемоионизация, являющаяся основным механизмом образования заряженных частиц во фронте углеводородного пламени [5], неразрывно связана с процессом сгорания топлива [6], то изменение ионного тока говорит об изменении кинетики химических реакций во фронте пламени и, предположительно, характеризует динамику турбулентной скорости распространения пламени. В ранее проведенных исследованиях [7] было выявлено, что ионный ток взаимосвязан с массовой долей углерода в топливовоздушной смеси (ТВС) и турбулентной скоростью распространения пламени. Количество углерода в ТВС определяет потенциальный резерв образования радикала СН, концентрация которого обуславливает степень ионизации фронта пламени, а скорость распространения пламени характеризует интенсивность образования СН во время сгорания топлива. Таким образом, по отношению величины амплитуды ионного тока к доле углерода в ТВС возможно определение скорости распространения пламени.

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению и развитию известных представлений о взаимосвязи турбулентной скорости распространения и электропроводности метано-водородного пламени.

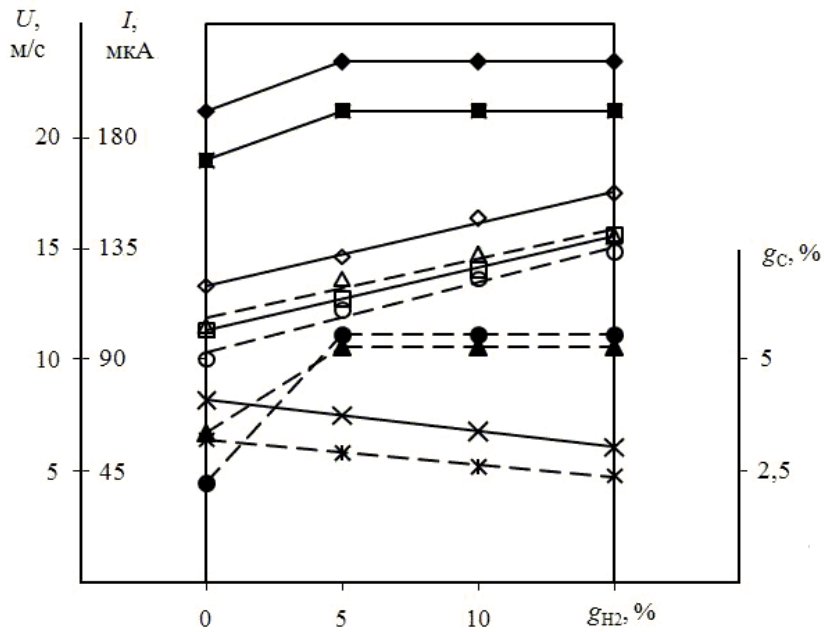
Исследование проводилось на основе ранее экспериментально полученных значений турбулентной скорости распространения и амплитуды ионного тока метано-водородного пламени [8].

Анализ турбулентной скорости распространения пламени ( $U$ ) показал, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя ( $n_{\text{КВД}}$ ) с 600 до 900 мин<sup>-1</sup> происходит возрастание исследуемых величин, что объясняется ростом турбулентности. Также было экспериментально обнаружено увеличение скорости распространения пламени при добавке водорода в ТВС ( $g_{\text{H}_2}$ ), при этом, чем больше добавка водорода, тем интенсивнее рост (рис. 1) (приведенные на рисунке зависимости характерны для всех составов ТВС, используемых в исследовании).

Причиной этому является то, что увеличение доли водорода в ТВС приводит к росту активных центров химических реакций, способствующих увеличению скорости пламени [9]. Следовательно, скорость пламени характеризует интенсивность химических реакций, а значит, и скорость образования радикала СН.

Таким образом, анализ опытных данных выявил, что турбулентная скорость распространения пламени определяется поступательным движением фронта пламени, зависящим как от турбулентности смеси в цилиндре, так и от интенсивности химических реакций горения ТВС.

Результаты экспериментального исследования зависимости амплитуды ионного тока от состава ТВС и величины добавляемого в нее водорода показали, что

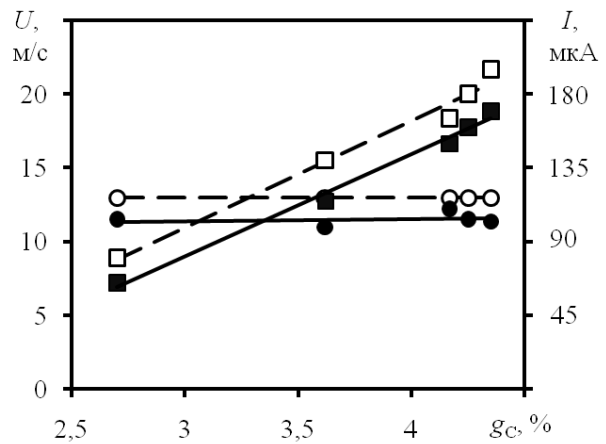


**Рис. 1.** Влияние скоростного режима двигателя, состава ТВС и доли в ней водорода на турбулентную скорость распространения и ионный ток ( $I$ ) пламени:  
 $\diamond, \Delta, \square, \circ$  –  $U$ ;  $\blacklozenge, \blacktriangle, \blacksquare, \bullet$  –  $I$ ;  $\times, *$  –  $g_C$ ; сплошная линия –  $\alpha=1$ ; пунктирная линия –  $\alpha=1,3$ ;  
 $\square, \circ, \blacksquare, \bullet$  –  $n_{КВД}=600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\diamond, \Delta, \blacklozenge, \blacktriangle$  –  $n_{КВД}=900 \text{ мин}^{-1}$

амплитуда сигнала на ионизационном датчике, как и скорость пламени, имеет характерную от них зависимость: максимальные значения наблюдаются вблизи стехиометрии, а минимальные – в области бедной и богатой ТВС. Это объясняется тем, что при изменении коэффициента избытка воздуха меняется концентрация топлива и кислорода во фронте пламени, что приводит к изменению кинетики химических процессов, а следовательно, и концентрации заряженных частиц. Анализ экспериментальных данных выявил отсутствие роста значений ионного тока в пламени метано-водородной смеси при добавке водорода в ТВС, превышающей 5 % (рис. 1). Причина, как отмечалось выше, заключается в зависимости электропроводности фронта пламени от концентрации свободного радикала  $\text{CH}$ , которая зависит от доли углерода в ТВС ( $g_C$ ) и скорости распространения пламени. При добавке водорода в ТВС одновременно происходит уменьшение концентрации углерода и увеличение скорости распространения пламени. Данный факт находит подтверждение на рис. 2, на котором показано влияние доли углерода в ТВС на ионный ток.

Для устранения влияния скорости распространения пламени на ионный ток ее постоянное значение обеспечивалось изменением коэффициента избытка воздуха и доли водорода в ТВС. На рис. 2 видно, что снижение доли углерода в ТВС при постоянном значении скорости пламени приводит к снижению ионного тока. При этом стоит отметить рост ионного тока с ростом скорости распространения пламени, достигаемым изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя при постоянном составе горючей смеси. Таким образом, подтверждается правильность предположений о сложной связи электрических явлений метано-водородного

пламени с его турбулентной скоростью распространения и химическим составом ТВС.



**Рис. 2.** Влияние доли углерода в ТВС на ионный ток:  
 $\circ, \bullet$  –  $U$ ;  $\square, \blacksquare$  –  $I$ ;  $\bullet, \blacksquare$  –  $n_{КВД}=600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\circ, \square$  –  $n_{КВД}=900 \text{ мин}^{-1}$

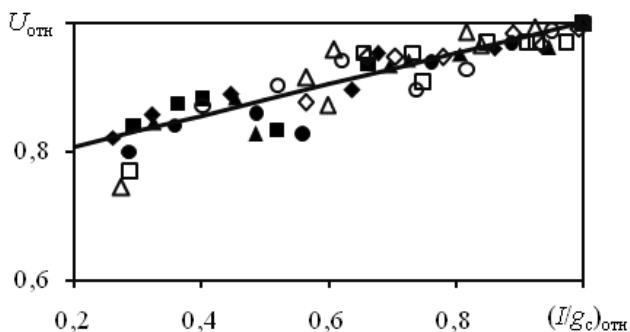
В работе [7] показано, что значение ионного тока углеводородного пламени прямо пропорционально произведению массовой доли углерода в ТВС со скоростью распространения пламени. Следовательно, по изменению ионного тока пламени можно определить изменение скорости распространения пламени, используя отношение ионного тока к доле углерода. На рис. 3 представлена зависимость турбулентной скорости распространения пламени от соотношения ионного тока

с массовой долей углерода в ТВС. С целью обеспечения большей универсальности, т. е. независимости от формы камеры сгорания, размеров и конструкции ионизационного зонда, все значения представлены в относительных величинах – отношения анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе смеси, формулы (1) и (2):

$$U_{отн} = \frac{U_{(a=x)}}{U_{(a=1)}}, \quad (1)$$

$$\left( \frac{I}{g_c} \right)_{отн} = \frac{\left( \frac{I}{g_c} \right)_{(a=x)}}{\left( \frac{I}{g_c} \right)_{(a=1)}}, \quad (2)$$

где  $U_{(a=1)}$  – экспериментальное значение скорости распространения пламени при стехиометрическом составе ТВС, м/с;  $U_{(a=x)}$  – текущее значение скорости распространения пламени, м/с;  $(I/g_c)_{(a=1)}$  – значение соотношения  $I/g_c$  при стехиометрическом составе ТВС, мкА.



**Рис. 3.** Зависимость  $U_{отн}$  от  $(I/g_c)_{отн}$ :  
 $\diamond, \square, \Delta, \circ$  –  $n_{КВД}=600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$  –  $n_{КВД}=900 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $\diamond, \blacklozenge$  –  $g_{H_2}=0 \%$ ;  $\square, \blacksquare$  –  $g_{H_2}=5 \%$ ;  
 $\Delta, \blacktriangle$  –  $g_{H_2}=10 \%$ ;  $\circ, \bullet$  –  $g_{H_2}=15 \%$

На рис. 3 видна линейная зависимость скорости распространения пламени от соотношения ионного тока с массовой долей углерода. При этом корреляция сохраняется при изменении коэффициента избытка воздуха, скоростного режима двигателя и концентрации водорода в ТВС. Таким образом, проведенные исследования позволяют определить значение видимой турбулентной скорости распространения пламени по измерению ионного тока в соответствии с выражением:

$$U_{(a=x)} = U_{(a=1)} \cdot \left[ 0,24 \cdot \left( \frac{I}{g_c} \right)_{отн} + 0,76 \right]. \quad (3)$$

Сравнение скоростей распространения пламени, найденных экспериментально и рассчитанных по предлагаемой формуле (3) при сжигании бедных и стехио-

метрических ТВС, выявило наличие между ними 5 % расхождения, а во время сжигания богатой ТВС расхождение возрастало до 10 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучено влияние скоростного режима работы двигателя (интенсивности турбулентности) и состава горючей смеси на электропроводность и турбулентную скорость распространения метановодородного пламени. При постоянной скорости распространения пламени ионный ток линейно зависит от содержания углерода в ТВС. Турбулентная скорость распространения пламени увеличивается и при добавке водорода, и при увеличении скоростного режима.

2. Разработан новый метод и предложена эмпирическая зависимость, позволяющие по величине ионного тока и содержанию углерода в ТВС определять видимую турбулентную скорость распространения метановодородного пламени при разных коэффициентах избытка воздуха и скоростных режимах двигателя.

*Данная работа выполнена в рамках государственного заказа, проект № 394.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Park C., Kim C., Choi Y., Won S., Moriyoshi Y. The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine // International journal of hydrogen energy. 2011. № 5. P. 3739–3745.
2. Ma F., Wang J., Wang Y., Li Y. Influence of different volume percent hydrogen/natural gas mixtures on idle performance of a CNG engine // Energy & Fuels. 2008. № 22. P. 1880–1887.
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
4. 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. № 35. P. 12918–12929.
5. Schofield K. The enigmatic mechanism of the flame ionization detector: its overlooked implications for fossil fuel combustion modeling // Progress in energy and combustion science. 2008. № 3. P. 330–350.
6. Ключарёв А.Н. Процессы хемоионизации // Успехи физических наук. 1993. № 6. С. 39–73.
7. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Скорость распространения и ионизация пламени при сжигании бензина и метана с добавкой водорода // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 2. С. 140–148.
8. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени у свечи зажигания и в наиболее удаленной от неё зоне в газовом ДВС // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 209–212.
9. Скорость горения метановодородных смесей при повышенных давлениях и температурах / К.Я. Трошин [и др.] // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 5. С. 76–88.

## REFERENCES

1. Park C., Kim C., Choi Y., Won S., Moriyoshi Y. The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine. *International journal of hydrogen energy*, 2011, no. 5, pp. 3739–3745.
2. Ma F., Wang J., Wang Y., Li Y. Influence of different volume percent hydrogen/natural gas mixtures on idle performance of a CNG engine. *Energy & Fuels*, 2008, no. 22, pp. 1880–1887.
3. Warnatz J., Maas U., Dibble R. *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulations, Experiments, Pollutant Formation*. Berlin, Springer, 2000. 378 p.
4. 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, no. 35, pp. 12918–12929.
5. Schofield K. The enigmatic mechanism of the flame ionization detector: its overlooked implications for fossil fuel combustion modelling. *Progress in energy and combustion science*, 2008, no. 3, pp. 330–350.
6. Klucharev A.N. Chemi-ionization processes. *Physics-Uspexhi (Advances in Physical Sciences)*, 1993, no. 6, pp. 486–512.
7. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R. Flame propagation velocity and ionization in burning gasoline and methane with addition of hydrogen. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 140–148.
8. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R. Relationship characteristics of flame propagation in the volume of the combustion chamber with the spark plugs and in the most remote from it in the area in CNG engines. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 209–212.
9. Troshin K.Y., Borisov A.A., Arutyunov V.S., Politenkova G.G., Rakhmetov A.N. Burning velocity of methane-hydrogen mixtures at elevated pressures and temperatures. *Russian journal of physical chemistry B*, 2013, vol. 7, no. 3, pp. 290–301.

## ON THE ISSUE OF RELATIONSHIP OF TURBULENT VELOCITY OF SPREADING AND IONIZATION OF METHANE-HYDROGEN FLAME

© 2015

**A.P. Shaikin**, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Power Plants and Control Systems

**P.V. Ivashin**, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of Power Plants and Control Systems

**I.R. Galiev**, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of Vehicles Design and Operation

**A.D. Deryachev**, postgraduate student

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** chemo-ionization; turbulent flame velocity; carbon; hythane; piston engine.

**Annotation:** The authors proved the application of a new alternative fuel - hythane (mixture of methane and hydrogen) in transport and stationary installations. The experiments showed that for determining of the optimal composition of proposed fuel for different engine operating modes it is necessary to know its influence on the combustion process. For this purpose the characteristics of turbulent premixed flame of methane and hydrogen were investigated. The experiments conducted in a piston engine with spark ignition showed that the turbulent flame velocity determined by the translational motion of the flame front depending on the air-fuel mixture turbulence and kinetics of the burning chemical reactions. The experiment showed the increase of ionization current of methane-hydrogen flame with increasing intensity of its turbulence achieved by increasing the engine shaft rotation speed and mass fraction of carbon in fuel mixture due to the changes in the hydrogen concentration and excess air ratio. The experiment results were explained on the basis of modern combustion theory concepts. According to the research results the authors developed a new empirical-calculated method for determination of the turbulent velocity of methane-hydrogen flame propagation by means of ionization sensor indications. The comparison of flame propagation velocities found experimentally and calculated by means of proposed method revealed the 5% difference when burning poor and stoichiometric fuel mixtures, while the combustion of rich mixture showed the difference up to 10%. This fact confirms the feasibility of using this method at the stage of design of gas-piston internal combustion engine.