

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ СКОРОСТИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ

© 2016

А. П. Шайкин доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет, td@tltsu.ru

И. Р. Галиев кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Тольяттинский государственный университет, sbs777@yandex.ru

А. В. Бобровский кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Тольяттинский государственный университет, ba838@yandex.ru

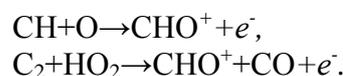
Обоснована целесообразность применения ионизационных датчиков для исследования и диагностики процесса сгорания топлива в поршневых энергетических установках с искровым зажиганием. Показано, что для расширения функциональных возможностей, увеличения надёжности работы и точности обработки сигнала ионизационного датчика необходимо знать влияние на него пульсационной скорости пламени. На основе анализа литературных данных и собственных исследований предложен механизм влияния пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени, оцениваемой величиной ионного тока. Предложена формула для расчёта ионного тока, включающая пульсационную скорость, температуру пламени и концентрацию углеродсодержащих частиц в топливе. Для метановоздушного пламени выявлено, что при $U' < 8$ м/с наблюдается рост ионного тока, который объясняется увеличением температуры пламени и концентрации углеродсодержащих частиц топлива в зоне химических реакций пламени. При $U' > 8$ м/с происходит снижение ионного тока, что вызвано ростом затрат тепла на нагрев поступающего топлива во фронт пламени, которые прямо пропорциональны пульсационной скорости. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга ионизационным датчиком характеристик турбулентности в камерах сгорания энергетических установок.

Хемионизация; электропроводность; пульсационная скорость; турбулентность; ионный ток; пламя; массовая доля углерода.

Цитирование: Шайкин А.П., Галиев И.Р., Бобровский А.В. Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 109-115. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-109-115

В настоящее время среди широкого спектра методов исследования процесса сгорания топлива в поршневых энергетических установках ионизационные датчики (ИД) остаются самыми дешёвыми и надёжными. Поэтому ИД используют для индикации наличия/отсутствия пламени в камерах сгорания двигателей и энергетических установок. Попытки расширить функциональные возможности ИД (например, определение характеристик пламени, турбулентности и токсичности продуктов сгорания топлива) сталкиваются со сложностями, одной из которых является определение влияния пульсационной скорости пламени на показания ИД, т.е. на ионный ток.

Значение ионного тока обусловлено электропроводностью фронта углеводородного пламени, т.е. хемионизацией. Согласно существующим представлениям хемионизация происходит в той части пламени, где наблюдаются максимальные концентрации радикала CH и C_2 [1]:



В работе [2] была выявлена линейная корреляция скорости химионизации со скоростью химических реакций горения. Пиковые значения обеих скоростей наблюдались при стехиометрическом составе топливовоздушной смеси (ТВС). При этом отмечено смещение в область богатой ТВС пика ионного тока относительно пика скорости химионизации. В работе [3] данный факт объясняется влиянием доли углерода на процесс ионизации.

Таким образом, значение ионного тока (I) в углеводородном пламени определяется формулой

$$I = g_c U_x \text{const} , \quad (1)$$

где g_c – массовая доля углерода в топливе; U_x – скорость химических реакций горения, кг/(м³·с).

Концентрация частиц углерода в зоне химических реакций пламени зависит от содержания углерода в горючем и интенсивности его транспортировки молекулярной и турбулентной диффузией из ТВС во фронт пламени (ФП), т.е. от массопереноса.

Влияние массопереноса на ионный ток рассмотрено в работах [1; 4], в которых показано, что в условиях бунзеновской горелки турбулентные пульсации скорости способствуют росту ионного тока в 2-8 раз. В исследованиях [5; 6], проведенных на поршневом двигателе внутреннего сгорания, показан рост ионного тока с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя, которая прямо пропорциональна пульсационной скорости [7]. Стоит отметить, что указанные работы носят экспериментальный характер и не раскрывают механизма влияния пульсационной скорости на ионный ток.

На основании современных представлений о турбулентном пламени [8] предлагается гипотеза, что пульсационная скорость (U') определяет интенсивность транспортировки частиц топлива, а значит и углерода, в зону химических реакций пламени (ЗХР). Чем выше значение пульсационной скорости, тем больше углеродсодержащих частиц топлива проникает во ФП. При этом возрастают потери тепла на нагрев этих частиц топлива, что способствует снижению температуры во ФП, а значит и скорости химических реакций. Данный механизм схож с процессом снижения турбулентной скорости распространения пламени и его погасанием при чрезмерно высокой турбулентности [8].

Для проверки правильности гипотезы было изучено влияние пульсационной скорости на электропроводность метановоздушного пламени, которая оценивалась величиной ионного тока. Состав топлива, доля в нём углерода, начальная температура топлива, объём камеры сгорания были постоянны. Пульсационная скорость изменялась от 0 до 26 м/с, т.е. охватывает весь диапазон скоростных режимов работы поршневой энергоустановки. Таким образом, в принятых условиях и в соответствии с формулой (1) влияние пульсационной скорости на ионный ток будет определяться её влиянием на скорость химических реакций, которая зависит от максимальной температуры (T_b) и концентрации топлива в ЗХР пламени ($N_{зхр}$).

Влияние U' на $N_{зхр}$ изучено с применением дифференциального уравнения диффузии [9], которое было приведено к условиям турбулентного горения добавлением в него коэффициента турбулентной диффузии (D_t):

$$\rho U_n \frac{dN}{dx} = \rho (D + D_t) \frac{d^2N}{dx^2} - U_x , \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; U_n – нормальная скорость пламени, м/с; N – относительная весовая концентрация топлива; D – коэффициент молекулярной диффузии ($D=5 \cdot 10^{-4}$), м²/с; x – расстояние, м.

Результатом решения уравнения (2) стало нахождение $N_{зxp}$:

$$N_{зxp} = \exp\left[-\frac{\chi}{D + D_t}\right], \quad (3)$$

$$D_t = U' l, \quad (4)$$

где χ – температуропроводность ($\chi=5 \cdot 10^{-4}$), м²/с; l – путь смешения ($l=10^{-3}$), м.

Значение пути смешения соответствует толщине ФП, т.к. известно [10], что только при масштабе турбулентности, равном (либо меньшем) толщине ФП, турбулентные вихри могут проникнуть во ФП и повлиять на интенсивность переноса топлива из зоны подогрева в ЗХР. Таким образом, из (3) и (4) следует, что зависимость $N_{зxp}$ от U' имеет экспоненциальный характер (рис. 1).

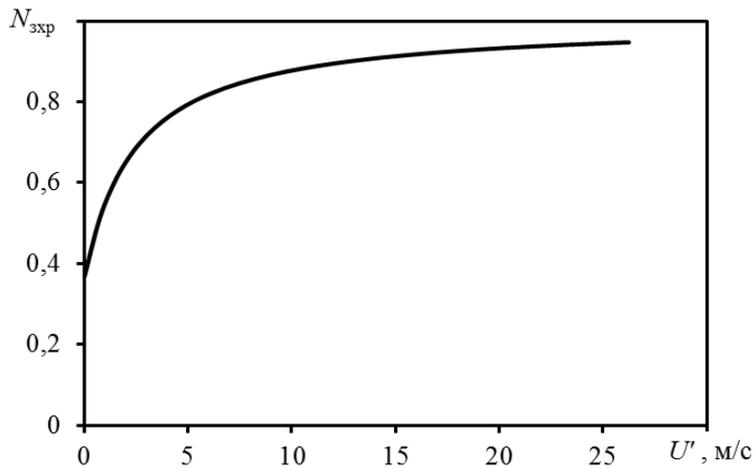


Рис. 1. Влияние пульсационной скорости (U') на концентрацию топлива ($N_{зxp}$) в ЗХР

Видно, что при $U' < 5$ происходит значительный рост $N_{зxp}$. По мере увеличения U' интенсивность роста $N_{зxp}$ снижается и её значение стремится к единице. Расчёт максимальной температуры пламени T_b проводился по общепринятой методике [11]. При этом учитывалось влияние затрат тепла, выделяющегося при сгорании, на нагрев топлива, поступающего в ЗХР пламени:

$$T_b = \frac{H_u N_{зxp}}{C_p \left(1 + \frac{U'}{N_{зxp}} K\right)} + T_0, \quad (5)$$

где H_u – теплота сгорания топлива ($H_u=55,5 \cdot 10^3$), Дж/кг; C_p – теплоёмкость ($C_p=14,8$), Дж/(кг·К); K – постоянная ($K=0,1$), (м/с)⁻¹; T_0 – начальная температура топлива ($T_0=400$), К.

На рис. 2 представлена зависимость T_b от интенсивности турбулентности. Видно, что при $U' < 5$ происходит значительный рост T_b . Это объясняется тем, что при данной интенсивности турбулентности рост $N_{зxp}$ превышает рост U' , определяющей затраты теплоты на нагрев поступающего в ЗХР топлива.

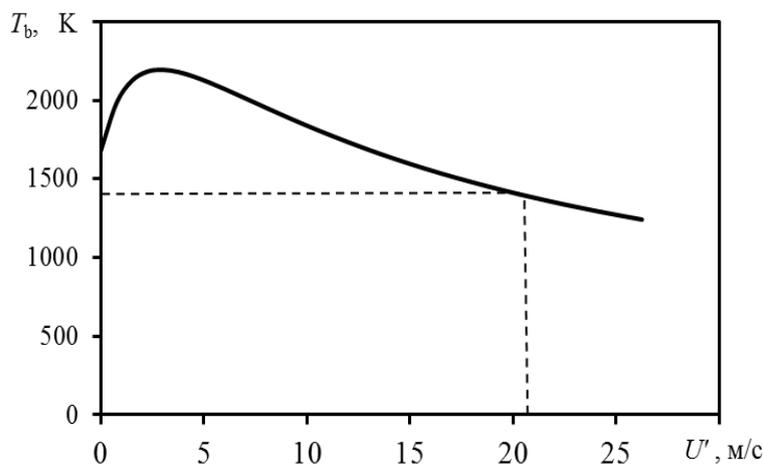


Рис. 2. Влияние пульсационной скорости (U') на максимальную температуру пламени (T_b):
 ---- – предельные значения U' и T_b , соответствующие моменту погасания пламени

Полученный результат соответствует ранее проведенным исследованиям [12], в которых был зафиксирован линейный рост температуры пламени с увеличением турбулентности.

При $U' > 5$ рост U' превышает рост $N_{зxp}$. По мере увеличения U' возрастают затраты тепла и в итоге пламя гаснет. Максимальное значение пульсационной скорости ($U' = 21$ м/с) соответствует пределу горения и наблюдается при минимально возможной температуре пламени ($T_b = 1450$ К), рассчитанной с применением теории пределов горения Я.Б. Зельдовича [9].

Таким образом, по известным значениям максимальной температуры пламени и концентрации топлива в ЗХР были рассчитаны скорость химических реакций и ионный ток. На рис. 3 показано влияние U' на ионный ток, значения которого представлены в относительных величинах

$$I_{отн} = \frac{I_{(U'=x)}}{I_{(U'=0)}}, \quad (6)$$

где $I_{отн}$ – относительное значение ионного тока; $I_{(U'=x)}$ – значение ионного тока при рассматриваемой пульсационной скорости, А; $I_{(U'=0)}$ – значение ионного тока при $U'=0$, т.е. ламинарном горении, А.

Анализ рис. 3 показывает, что электропроводность турбулентного ФП, оцениваемая величиной ионного тока, значительно (в 2 – 7 раз) превышает электропроводность ламинарного пламени ($U' = 0$).

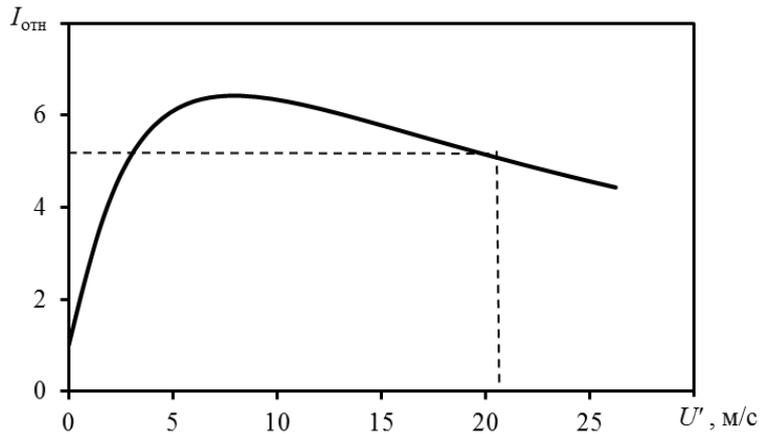


Рис. 3. Влияние пульсационной скорости (U') на ионный ток пламени ($I_{отн}$):
 ---- - предельные значения U' и $I_{отн}$, соответствующие моменту погасания пламени

Полученный результат соответствует ранее проведённым исследованиям [1; 4-6], в которых был зафиксирован рост ионного тока с увеличением турбулентности. Кроме этого, на рис. 3 отмечено снижение $I_{отн}$ при $U' > 8$, что связано с уменьшением скорости химических реакций из-за преобладающей роли тепловых потерь на нагрев топлива поступающего в ЗХР пламени.

Таким образом, в результате проведённых исследований выявлено двойственное влияние пульсационной скорости на электропроводность пламени, оцениваемой величиной ионного тока. При $U' < 8$ м/с зафиксирован рост ионного тока, что объясняется увеличением температуры пламени и концентрации углеродсодержащих частиц топлива в зоне химических реакций пламени. При $U' > 8$ м/с происходит снижение ионного тока, что вызвано возрастанием затрат тепла на нагрев поступающего топлива во фронт пламени, которое прямо пропорционально пульсационной скорости.

Данная работа выполнена в рамках государственного заказа, проект № 394, и при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 5729ГУ/2015.

Библиографический список

1. Семёнов Е.С., Соколик А.С. Термическая и химическая ионизация пламени // Физика горения и взрыва. 1970. № 1. С. 37-48.
2. Аравин Г.С., Семенов Е.С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени // Физика горения и взрыва. 1979. № 5. С. 40-46.
3. Шайкин А.П., Будаев С.И., Галиев И.Р. О взаимосвязи концентрации углерода в топливе и характеристик распространения пламени с величиной ионного тока // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 4. С. 156-163. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-156-163
4. Богословский В.П., Зайчиков В.В., Самойлов И.Б. О зондовых измерениях ионизации в пламени // Физика горения и взрыва. 1974. № 5. С. 705-710.
5. VanDyne E.A., Burcmyer C.L., Wahl A.M., Funaioli A.E. Misfire detection from ionization feedback utilizing the smartfire plazma ignition tecnology // SAE Technical Paper Series. DOI: 10.4271/2000-01-1377

6. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени и их влияние на концентрацию несгоревших углеводородов при добавке водорода в топливовоздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. 203 с.
7. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 931 p.
8. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
9. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
10. Peters N. Turbulent combustion. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 304 p.
11. Лопанов А.Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва. Белгород: Белгородский государственный технологический университет, 2012. 149 с.
12. Shehata M.S., ElKotb M.M., Salem H. Combustion characteristics for turbulent prevaporized premixed flame using commercial light diesel and kerosene fuels // Journal of Combustion. 2014. V. 2014. P. 1-17. DOI: 10.1155/2014/363465

INFLUENCE OF FLUCTUATION VELOCITY ON THE ELECTRIC CONDUCTIVITY OF HYDROCARBON FLAMES

© 2016

A. P. Shajkin Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Energy-Converting Machinery and Control Systems, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, td@tltu.ru

I. R. Galiev Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Design and Operation of Vehicles, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, sbs777@yandex.ru

A. V. Bobrovsky Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Design and Operation of Vehicles, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, ba838@yandex.ru

The feasibility of using ionization sensor for the investigation and diagnosis of the fuel combustion process in piston power plants with spark ignition is substantiated. It is shown that in order to expand the functions and increase the reliability of operation and signal processing accuracy of the ionization sensor it is necessary to know the impact of the flame fluctuating velocity on the latter. Based on the analysis of published data and in-house research a mechanism of the effect of fluctuation velocity on the electrical conductivity of hydrocarbon flame is proposed, estimated by the value of ion current. A formula for calculating the ion current is proposed, which includes the fluctuation velocity, the flame temperature and the concentration of carbon particles in the fuel. For methane-air flame, it was revealed that for $U' < 8$ m/s an increase of ion current is observed, which is due to increased flame temperature and concentration of carbonaceous fuel particles in the zone of chemical reactions of the flame. When $U' > 8$ m/s the ion current decreases due to the growth of heat consumption for heating the incoming fuel in the flame front, directly proportional to the fluctuation velocity. The results can be used to predict and monitor characteristics of turbulence in the combustion chambers of power plants with the aid of the ionization sensor.

Chemical ionization; electrical conductivity; fluctuation velocity; turbulence; ion current; flame; mass fraction of carbon.

Citation: Shajkin A.P., Galiev I.R., Bobrovsky A.V. Influence of fluctuation velocity on the electric conductivity of hydrocarbon flames. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 109-115. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-109-115

References

1. Semenov E.S., Sokolik A.S. Thermal and chemical ionization in flames. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1970. V. 6, Iss. 1. P. 33-43. DOI: 10.1007/BF02044894
2. Aravin G.S., Semenov E.S. Connection between rates of chemical ionization and the combustion reaction in a laminar flame. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1979. V. 5, Iss. 5. P. 589-593. DOI: 10.1007/BF00740588
3. Shaykin A.P., Budaev S.I., Galiev I.R. Relationship between carbon concentration in a fuel and characteristics of flame propagation with a magnitude of ion current. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 4. P. 156-163. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-156-163
4. Bogoslovskii V.P., Zaichikov V.V., Samoilov I.B. Probe measurements of ionization in a flame. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1974. V. 10, Iss. 5. P. 705-710. P. 626-630. DOI: 10.1007/BF01463975
5. VanDyne E.A., Burcmyer C.L., Wahl A.M., Funaioli A.E. Misfire detection from ionization feedback utilizing the smartfire plazma ignition technology. *SAE Technical Paper Series*. DOI: 10.4271/2000-01-1377
6. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R. *Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyaniye na kontsentratsiyu nesgorevshikh uglevodorodov pri dobavke vodoroda v toplivovozdushnuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiem* [Characteristics of flame propagation and their impact on the concentration of unburnt hydrocarbons on addition of hydrogen to the fuel-air mixture of spark-ignition power plants]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsent RAN Publ., 2014. 203 p.
7. Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. 931 p.
8. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Springer Berlin Heidelberg, 2001. 299 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04508-4
9. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Mahviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 478 p.
10. Peters N. *Turbulent combustion*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 304 p.
11. Lopanov A.N. *Fiziko-himicheskie osnovy teorii goreniya i vzryva* [Physics and chemistry of the combustion and explosion theory]. Belgorod: Belgorod State Technological University Publ., 2012. 149 p.
12. Shehata M.S., ElKotb M.M., Salem H. Combustion characteristics for turbulent prevaporized premixed flame using commercial light diesel and kerosene fuels. *Journal of Combustion*. 2014. V. 2014. P. 1-17. DOI: 10.1155/2014/363465