

## Краткие сообщения

04

### Использование хемиионизации для расчета температуры углеводородного пламени

© А.П. Шайкин, И.Р. Галиев

Тольяттинский государственный университет,  
445667 Тольятти, Россия  
e-mail: sbs777@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 12 сентября 2017 г.)

Представлена функциональная зависимость максимальной температуры углеводородного пламени от электронного тока (обусловленного хемиионизацией пламени), ширины зоны турбулентного горения, количества и состава топливозвоздушной смеси в камере сгорания переменного объема. Сравнение температуры, рассчитанной по предлагаемой формуле, с экспериментальными данными показало, что при коэффициенте избытка воздуха от 0.8 до 1.15 сходимость составляет более 85%. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга ионизационным зондом максимальной температуры пламени в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания и других энергетических установок.

DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45735.2478

#### Введение и постановка задачи

В связи с постоянным ростом цен на топливо и законодательным ужесточением концентрации токсичных компонентов в выхлопных газах двигателей не теряют актуальности вопросы дальнейшего улучшения экологических и энергетических характеристик двигателей. Одним из наиболее быстрореализуемых способов решения данной проблемы является использование композитных топлив. Начиная с 2000-х годов, большую популярность набирает *hythane* — смесь природного газа с водородом [1]. *Hythane* успешно сочетает в себе преимущества природного газа (дешевизна топлива) и водорода (экологичность и высокая теплота сгорания) [2]. Для создания новых двигателей и энергетических установок, использующих *hythane*, необходимо глубокое изучение процесса сгорания композитного топлива.

В средствах диагностирования процесса сгорания получили широкое распространение ионизационные зонды (ИЗ), так как они имеют низкую стоимость, простую и надежную конструкцию [3]. В настоящее время существует множество работ [4], посвященных методологии оценки температуры пламени с использованием пика термоионизации с сигнала ИЗ. Однако данный метод обладает сложностью и низкой точностью (погрешность более 20%). Поэтому нами предлагается использовать для оценки температуры величину электронного тока, обусловленного явлением хемиионизации пламени. Так как температура пламени определяется в том числе и процессами горения, а погрешность измерения электронного тока обычно не превышает 5–10%.

Целью настоящей работы является определение температуры пламени с использованием явления хемииони-

зации зоны химических реакций турбулентного пламени, оцениваемой величиной электронного тока.

#### Вывод основных соотношений

Согласно традиционным представлениям электродинамики электронный ток пламени зависит от концентрации электронов в области взаимодействия ИЗ с зоной химических реакций пламени, температуры пламени ( $T_b$ ), площади контакта ИЗ с зоной химических реакций пламени ( $S$ ), заряда ( $e^-$ ) и массы ( $m_e$ ) электрона.

Концентрация электронов в области взаимодействия ИЗ с зоной химических реакций пламени зависит от: 1) количества углеродсодержащих частиц топлива в камере сгорания [5]; 2) количества частиц, проникающих из зоны подогрева в зону химических реакций пламени; 3) доли частиц с энергией достаточной для вступления в химическую реакцию; 4) вероятности, что химическая реакция будет сопровождаться выделением электронов; 5) доли электронов, попадающих на ИЗ.

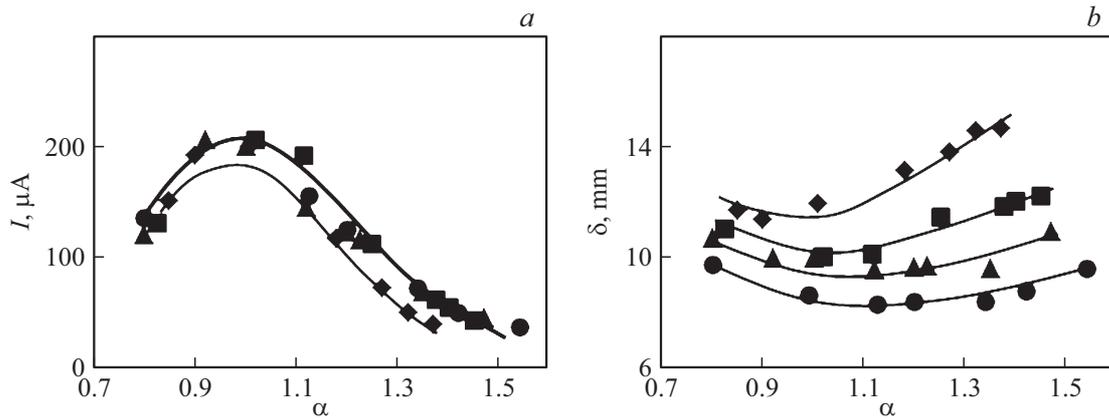
Таким образом, температура пламени описывается формулой (1):

$$T_b = 0.5 \left( \frac{I}{NA} \right)^2 + \frac{E_a}{R} + \frac{I}{2NA} \sqrt{\left( \frac{I}{NA} \right)^2 + 4 \frac{E_a}{R}}, \quad (1)$$

$$N = \frac{M_f}{M_{fi}} g_c \frac{V_i}{V_c V_f} \exp \left[ -\frac{a}{D_m + D_t} \right] P, \quad (2)$$

$$A = e^- \sqrt{\frac{8k}{\pi m_e}} S, \quad (3)$$

где  $N$  — концентрация электронов во фронте пламени,  $\text{units}/\text{m}^3$ ;  $M_f$  — масса топлива в камере сгорания,  $\text{kg}$ ;  $M_{fi}$  — масса одной молекулы топлива,  $\text{kg}$ ;



**Рис. 1.** Зависимость электронного тока ( $I$ ) и ширины зоны химических реакций ( $\delta$ ) от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода:  $g_H$ :  $\blacklozenge$  — 0;  $\blacksquare$  — 5,  $\blacktriangle$  — 10,  $\bullet$  — 15%.

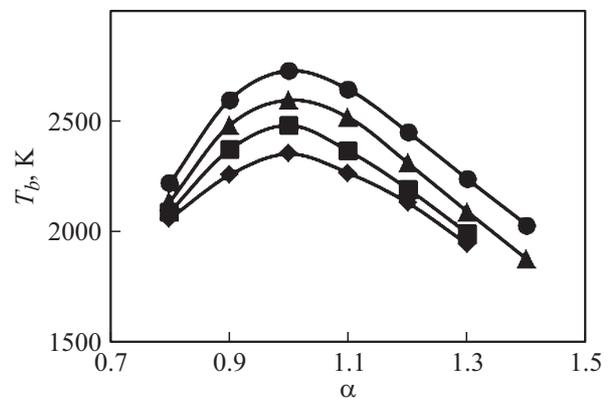
$g_c$  — массовая доля углерода в топливе;  $V_f$  — объем зоны химических реакций пламени (равный произведению ширины зоны химических реакций на площадь поверхности пламени),  $m^3$ ;  $V_c$  — объем камеры сгорания,  $m^3$ ;  $V_i$  — объем зоны химических реакций пламени, контактирующей с ИЗ,  $m^3$ ;  $E_a$  — энергия активации,  $E = 7.1 \text{ kJ/mol}$  [6];  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{kJ/mol} \cdot \text{K}$ ;  $P$  — вероятность хемионизации,  $P \in [0; 1]$ ;  $k$  — постоянная Больцмана,  $\text{J/K}$ ;  $a$  — температуропроводность,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $D_m$  — коэффициент молекулярной диффузии,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $D_t$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки предлагаемого метода расчета температуры пламени были экспериментально найдены величины, входящие в формулы (1)–(3). Эксперименты проводились в камере сгорания переменного объема, в качестве топлива использовался *hythane* с содержанием водорода ( $g_H$ ): 5, 10 и 15% [7].

В результате проведенных исследований были получены значения электронного тока и ширины зоны химических реакций турбулентного пламени, при работе экспериментальной установки при разных добавках водорода в природный газ и коэффициентах избытка воздуха (рис. 1).

На рис. 1, *a* видно, что только при 5% добавке водорода в топливо происходит увеличение электропроводности зоны химических реакций пламени. Причем с обеднением смеси влияние добавки водорода усиливается. К подобным результатам пришли исследователи из Сианьского университета [8] при изучении влияния на электронный ток добавок (в массовых долях) 4 и 8% водорода в природный газ, в условиях поршневого двигателя. Причина этого заключается в зависимости электропроводности пламени от концентрации свобод-



**Рис. 2.** Зависимость температуры пламени от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в топливо:  $g_H$ :  $\blacklozenge$  — 0;  $\blacksquare$  — 5,  $\blacktriangle$  — 10,  $\bullet$  — 15%.

ного радикала  $\text{CH}^+$ , которая зависит от доли углерода в топливе и скорости химических реакций. Количество углерода в топливе определяет потенциальный резерв образования  $\text{CH}^+$ , а скорость химических реакций характеризует интенсивность его образования во время процесса сгорания. При добавке водорода в топливо одновременно происходит уменьшение концентрации углерода и увеличение скорости химических реакций.

На рис. 1, *b* видно, что добавление водорода приводит к сужению ширины зоны химических реакций турбулентного пламени. Данный эффект объясняется возрастанием скорости химических реакций во фронте пламени. Чем выше скорость реакций, тем быстрее сгорает топливо и сильнее сокращается ширина зоны химических реакций пламени. Отмечено, что уменьшение ширины пламени усиливается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Так, например, при  $\alpha = 1$  добавка 15% водорода приводит к сокращению ширины пламени на 18%, а для  $\alpha = 1.2$  уменьшение ширины пламени составило 26%.

Сравнение  $T_b$ , рассчитанной по формуле (1) с температурой, рассчитанной по общепринятой методике (т.е. с использованием уравнения состояния и функции Виббе) [9], при экспериментальных значениях давления [6], показало наличие хорошей сходимости при изменении коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) от 0.8 до 1.15. Однако с дальнейшим обеднением топлива расхождение расчетных и экспериментальных данных увеличивается, например для  $\alpha = 1.3$  расхождение достигает 14%. На рис. 2 представлена расчетная зависимость температуры пламени в камере сгорания переменного объема [7] от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в топливо.

На рис. 2 видно, что использование добавок водорода приводит к повышению температуры пламени. Так, например, при  $\alpha = 1$  добавка водорода в количестве 15% приводит к росту температуры на 22%. Данный эффект качественно схож с результатами отечественных [10] и зарубежных ученых [11] и объясняется промотирующим влиянием водорода на процесс сгорания и повышением теплоты сгорания топлива.

## Заключение

Таким образом, предложенный метод, основанный на использовании ионизационного зонда, позволяет с требуемой точностью рассчитать температуру пламени углеводородного топлива и может быть применен на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгораний двигателей и энергоустановок.

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

## Список литературы

- [1] *Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P.* // Thermal sci. 2011. N 4. P. 1145–1154.
- [2] *Rakopoulos C.D., Scott M.A., Kyritsis D.C., Giakoumis E.G.* // Energy. 2008. N 33. P. 248–255.
- [3] *Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 39–43.
- [4] *Molina D., Restrepo F., Bedoya I.* // WIT Transactions on Ecology and The Environment. 2015. Vol. 195. P. 209–218.
- [5] *Шайкин А.П., Галиев И.Р.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 87–89. (*Shaikin A.P., Galiev I.R.* Technical Physics. 2016. N 8. P. 1206–1208.)
- [6] *Гардинер У.* Химия горения. М.: Мир, 1988. 464 с.
- [7] *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. Самарский научный центр РАН, 2016. 259 с.
- [8] *Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2010. N 35. P. 12918–12929.
- [9] *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. N. Y.: McGraw-Hill, 1988. 930 p.
- [10] *Арутюнов В.С., Борисов А.А., Политенкова Г.Г., Рахметов А.Н., Трошин К.Я.* // Горение и взрыв. 2012. № 5. С. 28–32.
- [11] *Cho E.S., Chung S.H.* // J. Mechan. Sci. Technol. 2009. N 23. P. 650–658.