

поддержания коэффициента избытка воздуха в зоне горения в заданном диапазоне перепуск на вход в двигатель или в выхлопную шахту требует значительно меньшего количества воздуха, в сравнении с перепуском в газосборник. Это говорит о том, что с точки зрения поддержания постоянных параметров в камере сгорания и предотвращения ухудшения охлаждения ТВД, перепуск на вход в двигатель является более привлекательным решением, чем перепуск в газосборник. Кроме того, единственная фирма, применявшая в своих ГТУ перепуск в газосборник (МНИ), в своих последних разработках отказалась от этого решения.

Список литературы

1. *C. Barkey, S. Richards, N. Harrop, P. Kotsiopriftis, R. Mastroberardino, D. Squires, T. Scarinci.* Rolls-Royce Industrial Trent: combustion and other technologies. Proceedings of International Symposium of Air Breathing Engines 1999, paper No. ISABE 99-7285.
2. *K.O. Smith, D.C. Rawlins, R.C. Steele.* Developments in dry low emissions systems. Preceedings of 2000 International pipeline conference, V.2, paper No. IPC2000-267.
3. *C.E. Romoser, J. Harper, M.B. Wilson, D.W. Simons, J.V. Citeno, M. Lal.* E-class late fuel staging technology delivers flexibility leap. Proceedings of ASME Turbo Expo 2016 conference, paper No. GT2016-57964, June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
4. *M. Yuri, J. Masada, K. Tsukagoshi, E. Ito, S. Hada.* Development of 1600° C-class high efficiency gas turbine for power generation applying J-type technology. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, V.50, No.3, September 2013.
5. *A. Foust.* Siemens SGT6-5000F Gas turbine technology update. Proceedings of POWER-GEN International conference, Las Vegas, NV, USA, December 8-10, 2015.

УДК 621.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ ИОНИЗАЦИОННЫМ ЗОНДОМ

Шайкин А.П., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти
Галиев И.Р., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Создание двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок нового поколения, которые при низкой токсичности отработавших газов, обеспечивали высокую эффективность работы, требует глубокого изучения процесса сгорания топлива. В средствах диагностирования процесса сгорания получили широкое распространение ионизационные зонды (ИЗ). В настоящее время существует множество работ [1], посвященных методологии оценки температуры пламени с использованием

пика термоионизации с сигнала ИЗ. Однако данный метод обладает сложностью и низкой точностью. Поэтому нами предлагается использовать величину тока химической ионизации пламени, поскольку температура пламени определяется, в том числе и процессами горения.

Целью работы является определение температуры пламени с использованием химической ионизации турбулентного пламени, оцениваемой величиной электронного тока.

Согласно традиционным представлениям электродинамики электронный ток пламени описывается следующей формулой (1):

$$I = n_e \cdot e \cdot \sqrt{T_b \cdot \frac{8 \cdot k}{\pi \cdot m_e}} \cdot S_{уд} \quad (1)$$

где n_e – концентрация электронов в зоне контакта ИЗ с зоной химических реакций пламени, штук/м³; e – заряд электрона, Кл; T_b – температура пламени, К; k – постоянная Больцмана, Дж/К; m_e – масса электрона, кг; $S_{уд}$ – площадь контакта ИЗ с зоной химических реакций пламени, м²;

Концентрация электронов в зоне контакта ИЗ с зоной химических реакций пламени зависит от: 1) количества углеродсодержащих частиц топлива в камере сгорания двигателя [2]; 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, концентрация электронов описывается формулой (2):

$$n_e = \frac{M_m}{M_{mi}} \cdot g_c \cdot \frac{V_{уд}}{V_{кc} \cdot V_{зxp}} \cdot \exp\left[-\frac{a}{D_m + D_t}\right] \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{R \cdot T_b}\right] \cdot P_{хем}, \quad (2)$$

где M_t – масса топлива в КС, кг; M_{ti} – масса одной молекулы топлива, кг; g_c – массовая доля углерода в топливе; $V_{зxp}$ – объем зоны химических реакций пламени, м³; $V_{кc}$ – объем КС, м³; $V_{уд}$ – объем зоны химических реакций пламени, контактирующей с ИД, м³; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $P_{хем}$ – вероятность хемионизации.

По формулам 1 и 2, была найдена температура пламени, формула (3):

$$T_b = 0,5 \cdot \left(\frac{I}{N_e \cdot A}\right)^2 + \frac{E_a}{R} + \frac{I}{2 \cdot N_e \cdot A} \cdot \sqrt{\left(\frac{I}{N_e \cdot A}\right)^2 + 4 \cdot \frac{E_a}{R}}, \quad (3)$$

$$N_e = \frac{M_m}{M_{mi}} \cdot g_c \cdot \frac{V_{уд}}{V_{кc} \cdot V_{фн}} \cdot \exp\left[-\frac{a}{D_m + D_t}\right] \cdot P_{хем}, \quad (4)$$

$$A = e \cdot \left(\frac{8 \cdot k}{\pi \cdot m_e}\right)^{0,5} \cdot S_{уд}, \quad (5)$$

На рис. 1 представлена зависимость температуры пламени в камере сгорания поршневого двигателя от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в ТВС.

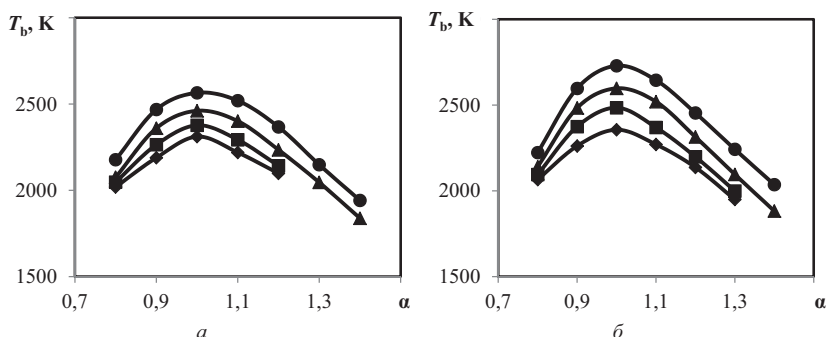


Рис. 1. Зависимость температуры пламени от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в ТВС:

а) $n_{кво} = 600 \text{ мин}^{-1}$, б) $n_{кво} = 900 \text{ мин}^{-1}$;
 $r_n = 0\%$ – \blacklozenge ; $r_n = 29\%$ – \blacksquare ; $r_n = 47\%$ – \blacktriangle ; $r_n = 58\%$ – \bullet

На рисунке видно, что использование стехиометрических смесей и добавок водорода приводит к повышению температуры пламени. Так, например, при $n_{квд} = 900 \text{ мин}^{-1}$ и $\alpha = 1$ добавка водорода в количестве 58% приводит к росту температуры на 22%. Данный эффект качественно схож с результатами отечественных и зарубежных ученых [3], и объясняется промотирующим влиянием водорода на процесс сгорания и повышением теплоты сгорания топлива.

Таким образом, предложенный метод расчета температуры пламени углеводородного топлива, основанный на использовании ионизационного датчика дает адекватные результаты и может быть применен на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгораний двигателей и энергоустановок.

Список литературы

1. Molina D., Restrepo F., Bedoya I. Combustion monitoring system on anatural gas fuelled spark ignition engine with high compression ratio using ionization current sensors // WIT Transactions on Ecology and The Environment. 2015. Vol. 195. P. 209-218.
2. К вопросу о взаимосвязи турбулентной скорости распространения и ионизации метановодородного пламени / А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев, А.Д. Дерячев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 1(31). С. 51-54.
3. Гельфанд В.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 288 с.