

03
О влиянии температуры и ширины зоны турбулентного горения на показания ионизационного датчика

© А.П. Шайкин, И.Р. Галиев

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

(Поступило в Редакцию 26 ноября 2015 г.)

Приведена функциональная зависимость показаний ионизационного датчика (ионного тока) от состава топливоздушную смеси, адиабатической температуры пламени и ширины зоны турбулентного горения. Эксперименты на двигателе показали, что при коэффициенте избытка воздуха от 0.75 до 1.15 сходимость расчетных и опытных значений ионного тока составляет более 90%. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга ионизационным датчиком адиабатической температуры пламени и ширины зоны турбулентного горения в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания.

Введение и постановка задачи

При конструировании, доводке и эксплуатации современных двигателей необходимо обеспечить их соответствие законодательным нормам токсичности, которые имеют тенденцию постоянно ужесточаться, а также потребительским требованиям, таким как расход топлива, вырабатываемая мощность, уровень шума и т.д. Поскольку конструктивное изменение двигателя является долгим и дорогостоящим процессом, который не всегда приводит к требуемым результатам, то в последнее десятилетие совершенствование сгорания топлива рассматривается производителями двигателей в качестве основного пути решения проблем, связанных с созданием конкурентоспособной продукции [1]. Однако ввиду сложности и до конца еще не изученности процесса сгорания, его совершенствование на практике остается достаточно трудной задачей. Одним из способов решения этой задачи является точная и малоинерционная диагностика сгорания топлива в двигателе и затем подбор электронной системой управления оптимального режима сгорания путем изменения регулируемых параметров.

В настоящее время для диагностики процесса сгорания в условиях двигателя внутреннего сгорания применяются оптические методы и методы, основанные на явлении электропроводности пламени. Оптические методы диагностики и исследования процесса горения (например, LaVision Flame Master) используют высокоскоростные камеры (Phantom, Memtecam и др.) и высокочастотные PIV-лазеры (например, Litron), позволяющие проводить измерения характеристик пламени, не нарушая его гидродинамической, тепловой и химической структуры. Однако эти методы имеют недостатки: 1) дороговизна — стоимость оборудования свыше 70 тыс. долларов США, 2) применение достаточно трудоемко и требует специальных знаний, 3) необходимы серьезные конструктивные изменения двигателя (наличие прозрачных стенок, специальных окон и т.д.). Поэтому оптические методы используются только в

лабораторных условиях на стадиях, далеких от конструирования и эксплуатации двигателя.

Более простым и дешёвым способом диагностики процесса сгорания является метод, основанный на явлении электропроводности пламени [2,3]. В данном методе по регистрации ионного тока пламени контролируют сгорание топлива в камере сгорания двигателя. На этом принципе достаточно давно и успешно работают датчики контроля пламени, предназначенные для индикации наличия или отсутствия пламени. Недостатком существующих датчиков контроля пламени является невозможность определения ими характеристик пламени и уровня токсичности продуктов сгорания. Следовательно, электронная система управления не может проводить точный анализ эффективности горения топлива и обеспечивать наиболее оптимальные его режимы.

Поскольку хемиионизация является основным механизмом образования заряженных частиц во фронте углеводородного пламени и неразрывно связана с процессом сгорания топлива, то изменение ионного тока, т.е. сигнала с ионизационного датчика (ИД), говорит об изменении кинетики химических реакций во фронте пламени и характеризует процесс сгорания топлива в двигателе [4,5]. Данный факт позволяет существенно расширить возможности и область применения ИД и использовать их не только для индикации наличия (отсутствия) пламени, но и для анализа экологической и энергетической эффективности процесса горения топлива. Таким образом, используя данный датчик, электронная система управления двигателем путем регулирования параметров (состава горючей смеси, времени впрыска топлива и т.д.) сможет обеспечить изменение текущего значения сигнала ионного тока с ИД до оптимального, соответствующего эффективному процессу горения топлива. Также это позволит усовершенствовать модели процесса сгорания при недостаточно исследованной турбулентности и может быть использовано на реальных камерах сгорания без оптического доступа. Однако, несмотря на достигнутые успехи в использовании

ИД, для дальнейшего расширения его возможностей, увеличения надежности работы и точности обработки сигнала необходимо знать влияние на показания датчика процессов в камере сгорания двигателя, которые характеризуются в том числе адиабатической температурой пламени и шириной зоны турбулентного горения.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния адиабатической температуры пламени и ширины зоны турбулентного горения на показания ионизационного датчика, т. е. ионный ток.

Вывод основных соотношений

Поскольку кроме температуры и ширины зоны горения на показания ИД влияет множество других факторов (например, форма, размер и потенциал ИД, газодинамические характеристики и т.д.), то, чтобы исключить их влияние, анализ проводился в относительных величинах — отношения анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе топливовоздушной смеси (ТВС):

$$I_{\text{rel}} = \frac{I_{(\alpha=x)}}{I_{(\alpha=1)}}, \quad (1)$$

где $I_{(\alpha=x)}$ — значение ионного тока при текущем составе ТВС [А], $I_{(\alpha=1)}$ — значение ионного тока при стехиометрическом составе ТВС [А], α — коэффициент избытка воздуха, x — текущее значение коэффициента избытка воздуха.

Согласно традиционным представлениям электродинамики, сила тока, обусловленная движением электронов к положительно заряженному ИД, равна произведению концентрации электронов на их заряд, скорость движения и площадь поверхности ИД. Тогда формула (1) примет вид

$$I_{\text{rel}} = \frac{n_{(\alpha=x)} \sqrt{T_{(\alpha=x)}}}{n_{(\alpha=1)} \sqrt{T_{(\alpha=1)}}}, \quad (2)$$

где n — концентрация электронов во фронте пламени, units/m^3 , T — адиабатическая температура пламени К.

Известно, что именно процесс химионизации во фронте углеводородного пламени является основным источником образования электронов, концентрация которых, предположительно зависит от вероятности химионизации углеродсодержащих молекул топлива во фронте пламени с энергией большей либо равной энергии активации. Таким образом, концентрация электронов во фронте пламени описывается следующей формулой:

$$n = \frac{M g_C K P}{m S \delta} \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

где M — масса топлива в камере сгорания двигателя, кг, m — масса молекулы топлива, кг, g_C — массовая доля углерода в топливе, K — доля топлива, попавшая во фронт пламени, $K \in [0; 1]$, E — энергия активации, $E = 7.1 \text{ kJ/mol}$ [6], R — газовая постоянная, $\text{kJ/mol} \cdot \text{K}$,

P — вероятность химионизации, $P \in [0; 1]$, S — площадь поверхности фронта турбулентного пламени, m^2 , δ — ширина зоны турбулентного горения, m .

Вывод окончательной формулы ионного тока осуществляется из следующих представлений: 1) поскольку в формуле (1) отношение ионных токов происходит для одинаковых по содержанию углерода топлив, то $g_{C(\alpha=x)} = g_{C(\alpha=1)}$; 2) доля (K) попавших во фронт пламени молекул топлива определяется коэффициентом диффузии, который зависит от температуры $D \sim T^{3/2}$ [7], следовательно, $K \sim T^{3/2}$; 3) примем, что для всех составов ТВС вероятность химионизации одинакова $P_{(\alpha=x)} \approx P_{(\alpha=1)}$; 4) концентрация электронов рассчитывалась для объема фронта пламени, равного произведению площади поверхности фронта турбулентного пламени на ширину зоны турбулентного горения, т.е. с изменением состава ТВС и при условии постоянства интенсивности турбулентности меняется только δ . Таким образом, формула (2) примет вид

$$I_{\text{rel}} = \frac{M_{\text{rel}} T_{\text{rel}}^2}{\delta_{\text{rel}}} \exp\left(\frac{E}{R} \left[\frac{1}{T_{(\alpha=1)}} - \frac{1}{T_{(\alpha=x)}} \right]\right). \quad (4)$$

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки полученной теоретически формулы (4) были экспериментально найдены значения входящих в формулу величин: ионного тока, адиабатической температуры и ширины зоны турбулентного горения (рис. 1).

Эксперименты проводились на одноцилиндровом, четырехтактном двигателе УИТ-85. В качестве топлива использовался бензин. Частота вращения коленчатого вала двигателя (т.е. интенсивность турбулентности) была постоянной и равнялась 600 min^{-1} . Коэффициент

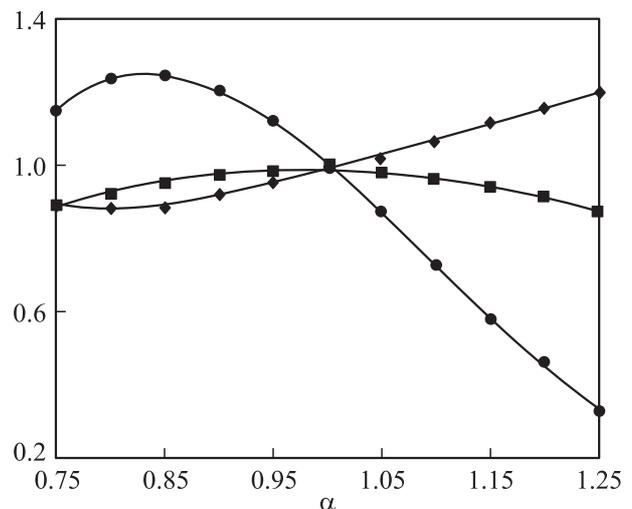


Рис. 1. Зависимость экспериментальных относительных значений ионного тока — ●, ширины зоны турбулентного горения — ◆ и адиабатической температуры пламени — ■ от состава ТВС (α).

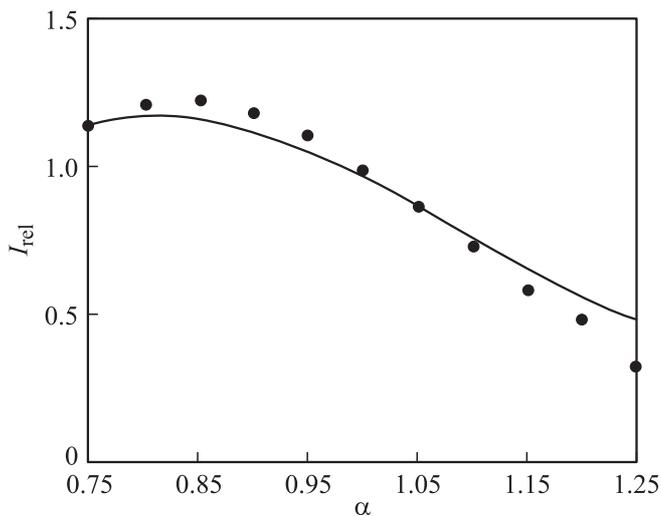


Рис. 2. Сравнение экспериментального относительного значения ионного тока —• с расчетным —.

избытка воздуха изменялся в пределах устойчивого сгорания ТВС от 0.75 до 1.25. Регулирование коэффициента избытка воздуха происходило путем изменения массы топлива в ТВС при постоянной массе воздуха. Таким образом, относительная масса топлива в формуле (4) примет вид

$$M_{rel} = \alpha^{-1}. \quad (5)$$

Экспериментальные значения адиабатической температуры бензовоздушного пламени были взяты из [8]. Для соответствия выбранных значений температуры условиям нашего эксперимента была выполнена поправка данной температуры на величину

$$T = T^* + (T_c - T_0^*), \quad (6)$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{k-1}, \quad (7)$$

где * — значения температур, взятых из [8], T_c — температура в конце сжатия, К, T_0^* — температура ТВС, К, T_a — температура в конце впуска, $T_a = 323$ К, ε — степень сжатия, k — показатель политропы сжатия, $k = 1.382$.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений ионного тока представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в области $\alpha \in [0.75; 1.15]$ наблюдается хорошая сходимость экспериментальных данных с расчетными. Однако с дальнейшим обеднением ТВС расхождение расчетных и экспериментальных данных увеличивается, например для $\alpha = 1.2$ расхождение достигает 15%. Предположительно, это обусловлено снижением вероятности хемиионизации бедных смесей по сравнению со стехиометрическими, следовательно для данного случая $P_{(\alpha=1.2)} < P_{(\alpha=1)}$.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных теоретического и экспериментального анализов получена функциональная зависимость, объясняющая особенности влияния состава ТВС, адиабатической температуры пламени и ширины зоны турбулентного горения на значение ионного тока, т.е. показания ионизационного датчика. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга температуры и ширины зоны турбулентного горения по амплитуде импульса ионного тока. Это приведет к увеличению точности обработки сигнала, количества измеряемых характеристик пламени, упрощению и удешевлению существующей методики диагностирования и исследования ионизационными датчиками процесса сгорания топлива в двигателях.

Настоящая работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 0010547, а также в рамках государственного заказа, проект № 394.

Список литературы

- [1] Merker G.P., Schwarz C., Teichmann R. Combustion engines development. Mixture formation, combustion, emissions and simulation. London: Springer, 2012. 642 p.
- [2] Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B. // Int. J. Hydrogen. Ener. 2010. Vol. 35. P. 12918–12929.
- [3] Franke A. Characterization of an electrical sensor for combustion diagnostics. Lund: Lund Institute of Technology, 2002. 137 p.
- [4] Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 39–43.
- [5] Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. // Известия МГТУ „МАМИ“. 2014. № 3. С. 69–74.
- [6] Гардинер У. Химия горения. М.: Мир, 1988. 464 с.
- [7] Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2003. 352 с.
- [8] Stevens J. Adiabatic Flame Temperature. www.heat-transfer-thermodynamics.blogspot.ru. 2015.