

Взаимосвязь ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скоростью распространения пламени

д.т.н. проф. Шайкин А.П., к.т.н. доц. Ивашин П.В.
Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти
8 (8482) 53-92-65, a_shykin@mail.ru

к.т.н. Галиев И.Р.
Самарская гуманитарная академия, г. Тольятти
8 (927) 61-35-495, sbs777@yandex.ru

Аннотация. В статье экспериментально доказана взаимосвязь ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скоростью распространения пламени. Это подтверждает выдвинутое предположение об определяющем влиянии скорости образования радикала CH^+ на ионный ток и даёт возможность использовать его амплитуду для определения характеристик распространения пламени, что значительно упрощает и удешевляет существующую методику исследования ионизационными зондами процесса сгорания в поршневых двигателях.

Ключевые слова: двигатель, пламя, распространение, скорость, углерод, хемоионизация, ионный ток, электропроводность.

В настоящее время создание двигателя, отвечающего всем мировым стандартам, невозможно без совершенствования процесса сгорания топлива [1, 2]. Согласно классическим представлениям физики горения – процесс сгорания топлива характеризуется скоростью распространения и шириной фронта пламени [3, 4]. Известно, что скорость распространения пламени характеризует воздействие турбулентности и физико-химических свойств топливной смеси на развитие начального очага горения при зажигании, длительность процесса сгорания в цикле и процесс догорания топлива у стенок цилиндра [5 – 7]. Это актуализирует необходимость в определении и исследовании характеристик распространения пламени.

Среди множества способов исследования пламени наиболее простыми и дешёвыми являются методы, основанные на явлении ионизации пламени [8, 9]. Во фронте углеводородного пламени основным механизмом образования заряженных частиц является хемоионизация, протекающая как побочная реакция между компонентами участвующими в основных реакциях горения [10]. Поскольку хемоионизация неразрывно связана с процессом сгорания топлива, то изменение ионного тока говорит об изменении кинетики химических реакций во фронте пламени и, следовательно, характеризует динамику видимой скорости распространения пламени. Так, в работе [11] была показана связь роста ионного тока с ростом скорости распространения пламени (изменение изучаемых величин осуществлялось изменением состава горючей смеси и добавлением в неё водорода в количестве менее 5% по массе). Однако в исследовании [12], проведённом в аналогичных условиях, но с большей концентрацией водорода, было обнаружено, что заметное увеличение ионного тока наблюдается только при 5% добавке водорода в топливо (по массе), при дальнейшем увеличении концентрации водорода не наблюдалось заметного роста ионного тока, хотя видимая скорость пламени росла. Схожие результаты получили ученые из транспортного университета г. Сиань, которые экспериментально показали, что с увеличением доли водорода в топливе с 20 и 40% (по объёму) происходит замедление роста ионного тока [13]. Таким образом, очевидно, что связь видимой скорости распространения пламени с величиной ионного тока имеет сложный, нелинейный характер. Раскрытие этой связи позволит использовать амплитуду сигнала с ионизационного зонда (ИЗ) для определения видимой скорости распространения пламени, что значительно упростит и удешевит методику исследования процесса сгорания ИЗ.

Причина сложной связи скорости пламени с ионным током заключается в зависимости электропроводности фронта пламени от концентрации свободного радикала CH^+ [10, 14], которая, как мы считаем, зависит от доли углерода в топливовоздушной смеси (ТВС) и скорости распространения пламени. Количество углерода в ТВС определяет потенциальный резерв образования CH^+ , а скорость распространения пламени характеризует интенсивность

образования CH^+ во время сгорания топлива. При добавке водорода в ТВС одновременно происходит уменьшение концентрации углерода и увеличение скорости распространения пламени. Согласно этим представлениям нами был предложен параметр Sa :

$$Sa = g_c \cdot U, \quad (1)$$

где: g_c – массовая доля углерода в ТВС; U – видимая скорость распространения пламени, м/с.

Массовая доля углерода в ТВС с добавкой водорода определяется по следующей формуле:

$$g_c = \frac{1 - g_{\text{H}_2}}{1 + [\alpha \cdot L_T \cdot (1 - g_{\text{H}_2}) + g_{\text{H}_2} \cdot L_{\text{H}_2}]} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_T} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: L_T – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг; L_{H_2} – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг водорода, кг; g_{H_2} – массовая доля водорода в ТВС; μ_c – атомная масса углерода, г/моль; μ_T – молекулярная масса топлива, г/моль; α – коэффициент избытка воздуха.

Таким образом, целью данной работы являлась проверка выдвинутой гипотезы о взаимосвязи ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скоростью распространения пламени.

Исследование проводилось на экспериментальном стенде, основу которого составляла установка для определения октановых чисел УИТ-85, являющаяся одноцилиндровым, четырёхтактным двигателем (рисунок 1).

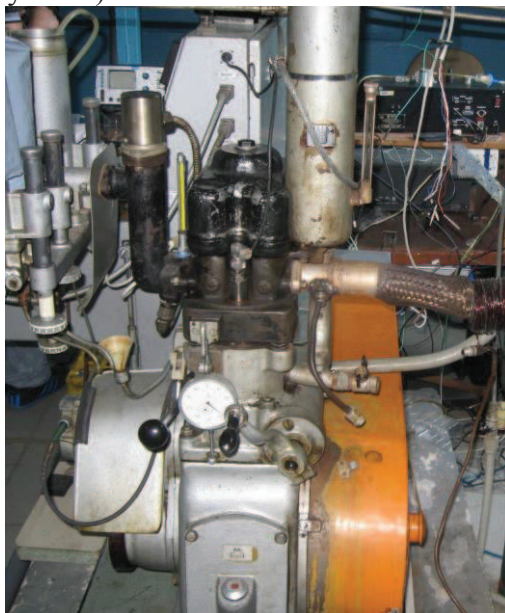


Рисунок 1. Установка УИТ-85

Стенд был оснащен системой подачи природного газа и водорода. Для мониторинга ионного тока использовался ИЗ, представляющий собой электрод, изолированный от корпуса камеры сгорания установки керамическим изолятором. ИЗ располагался на максимальном удалении от свечи зажигания, т.е. на расстоянии 85 мм. Работа установки УИТ-85 осуществлялась со степенью сжатия 7, при угле опережения зажигания равном 13° и на скоростном режиме 900 об/мин. В качестве топлива использовался сжатый природный газ, в который добавлялся водород в количестве 5; 10; 15 % (по массе). Коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах устойчивого сгорания ТВС.

По результатам измерений промежутка времени (τ) от подачи искрового разряда до возникновения импульса ионного тока определено среднее значение видимой скорости распространения пламени по формуле:

$$U = \frac{L}{\tau}, \quad (3)$$

где: L – расстояние от свечи зажигания до ИЗ, м.

Полученные данные обрабатывались в соответствии с ГОСТ 8.207 – 76 «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений» для определения их среднего значения и оценки погрешности. Погрешность полученных результатов не превышала 5%.

В результате проведённых экспериментов была получена зависимость ионного тока от состава ТВС и доли добавляемого в неё водорода, которая представлена на рисунке 2.

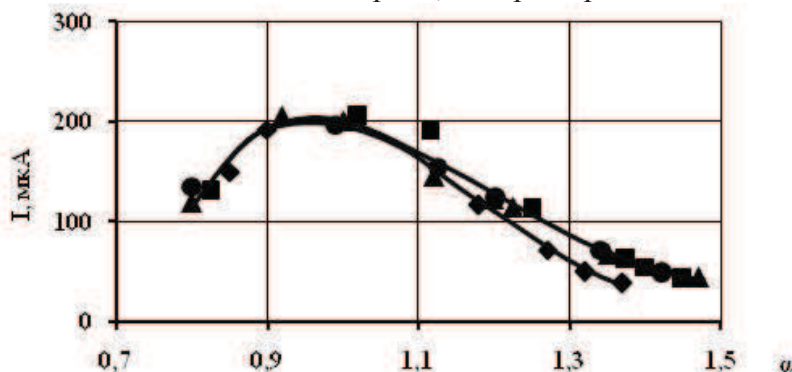


Рисунок 2. Зависимость ионного тока от состава ТВС и доли добавляемого водорода:

♦ – $g_{H_2}=0\%$; ■ – $g_{H_2}=5\%$; ▲ – $g_{H_2}=10\%$; ● – $g_{H_2}=15\%$

Выявлено, что амплитуда сигнала на ИЗ имеет характерную зависимость от состава ТВС. Это объясняется тем, что смена состава ТВС влечёт изменение скорости химических реакций за счёт изменения концентрации реагентов, участвующих в реакции. Также при анализе было выявлено отсутствие зависимости ионного тока от концентрации водорода, превышающей 5%. Причина, как уже отмечалось, заключается в зависимости электропроводности фронта пламени от концентрации свободного радикала CH^+ [14], которая, вероятно, зависит от доли углерода в ТВС и скорости распространения пламени. Количество углерода в топливе определяет потенциальный резерв образования CH^+ , а скорость распространения пламени характеризует интенсивность образования CH^+ во время реакции горения топлива.

Экспериментальная зависимость видимой скорости распространения пламени от состава ТВС и доли добавляемого в неё водорода представлена на рисунке 3.

Анализ рисунка показывает увеличение скорости пламени при добавке водорода в ТВС. Выявлено, что чем беднее ТВС и больше добавка водорода, тем интенсивнее рост. Так при $\alpha=1,3$ добавка $g_{H_2}=5\%$ повышает скорость пламени на 20%, а при $\alpha=1$ увеличение скорости составляет 10%. Причиной этому является то, что увеличение доли водорода в ТВС приводит к росту активных центров химических реакций, способствующих увеличению скорости пламени [15, 16]. Таким образом, скорость пламени характеризует интенсивность химических реакций, а значит, и скорость образования радикала CH^+ .

Расчетная зависимость (формула 2) массовой доли углерода от состава смеси и доли добавляемого водорода представлена на рисунке 4.

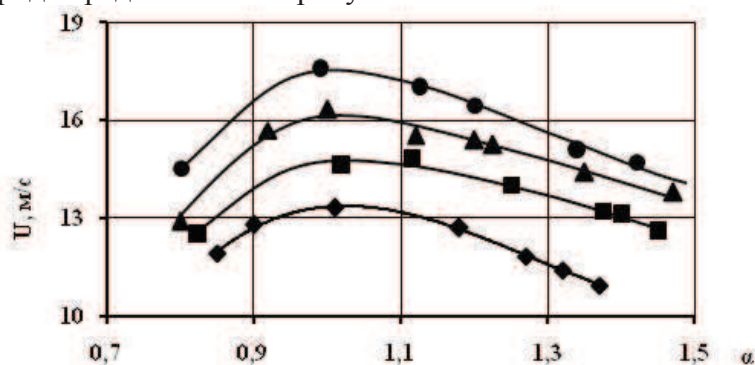


Рисунок 3. Зависимость видимой скорости распространения пламени от состава ТВС и

доли добавляемого водорода: ♦ – $g_{H_2}=0\%$; ■ – $g_{H_2}=5\%$; ▲ – $g_{H_2}=10\%$; ● – $g_{H_2}=15\%$

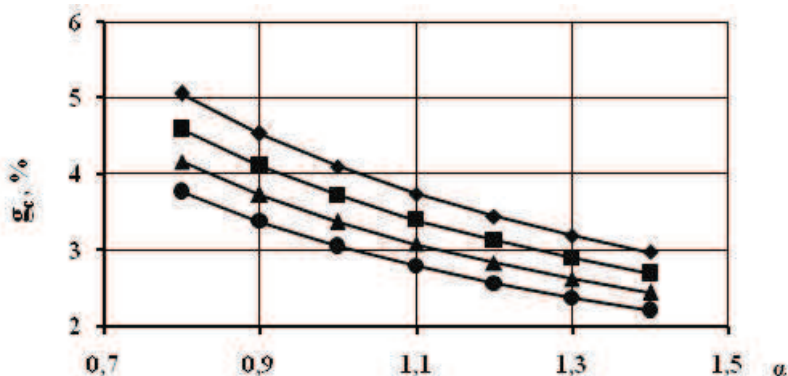
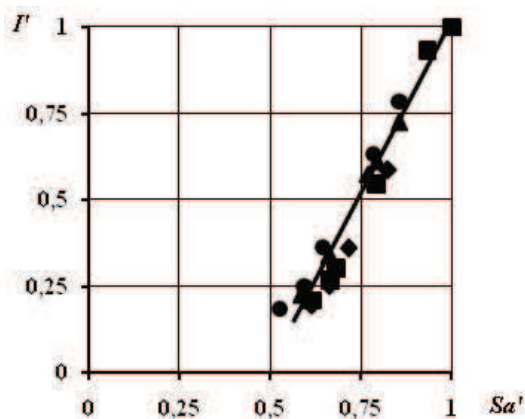


Рисунок 4. Зависимость массовой доли углерода от состава ТВС и доли добавляемого водорода: ♦ – $g_{H_2}=0\%$; ■ – $g_{H_2}=5\%$; ▲ – $g_{H_2}=10\%$; ● – $g_{H_2}=15\%$

Из рисунка видно, что увеличение доли водорода в ТВС приводит к снижению концентрации в ней углерода, причём с обеднением смеси данный эффект усиливается, что объясняется ростом в ТВС молекул воздуха. Т.е. обеднение ТВС и увеличение в ней концентрации водорода способствует снижению потенциального резерва образования CH^+ во время процесса сгорания.

На рисунке 5 показана в относительных величинах связь результатов измерения ионного тока с параметром Sa .



**Рисунок 5. Связь ионного тока с параметром Sa :
♦ – $g_{H_2}=0\%$; ■ – $g_{H_2}=5\%$; ▲ – $g_{H_2}=10\%$; ● – $g_{H_2}=15\%$**

Для исключения влияния формы и размеров ИЗ на величину ионного тока сравнительный анализ проводился в относительных величинах – отношения анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе смеси:

$$I' = \frac{I_{(\alpha=x)}}{I_{(\alpha=1)}}, \quad (4)$$

$$Sa' = \frac{Sa_{(\alpha=x)}}{Sa_{(\alpha=1)}}, \quad (5)$$

где: $I_{(\alpha=1)}$ – экспериментальное значение ионного тока при стехиометрическом составе ТВС, мкА; $I_{(\alpha=x)}$ – экспериментальное значение ионного тока при произвольном составе ТВС, мкА; $Sa_{(\alpha=1)}$ – значение параметра Sa при стехиометрическом составе ТВС, м/с; $Sa_{(\alpha=x)}$ – значение параметра Sa при произвольном составе ТВС, м/с.

Из рисунка видно наличие линейной зависимости ионного тока от произведения массовой доли углерода и видимой скорости распространения пламени. При этом зависимость сохраняется при изменении коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе, т.к. уменьшение массовой доли углерода компенсируется ростом скорости пламени. Это подтверждает выдвинутое нами предположение об определяющем влиянии скорости образова-

ния радикала CH^+ на ионный ток и даёт возможность использовать амплитуду сигнала с ионизационного датчика для исследования процесса сгорания топлива при $g_{\text{H}_2} > 5\%$, что особенно актуально в свете современных тенденций в двигателестроении по применению добавок водорода к основному топливу [17, 18].

Зависимость коэффициента корреляции (r) от концентрации водорода в ТВС представлена на рисунке 6. Показано, что учёт доли углерода в ТВС приводит к 10 % увеличению коэффициента корреляции на всех режимах работы установки.

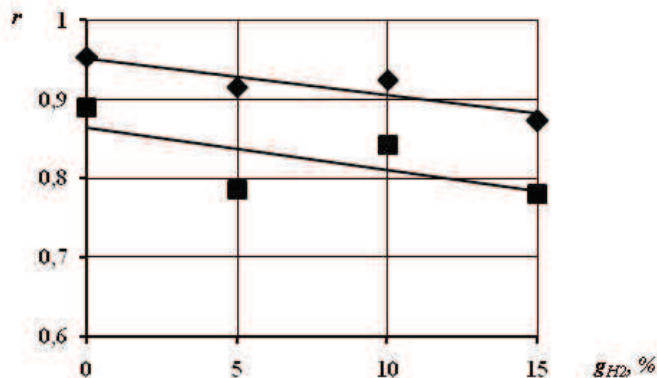


Рисунок 6. Зависимость коэффициента корреляции от концентрации водорода в ТВС:

♦ – коэффициент корреляции между ионным током и параметром Sa; ■ – коэффициент корреляции между ионным током и видимой скоростью распространения пламени

Таким образом, в результате анализа экспериментальных данных выявлено, что ионный ток определяется массовой долей углерода в ТВС и видимой скоростью распространения пламени. Т.е. по относительным изменениям величины сигнала на ИЗ может быть оценена динамика видимой скорости распространения пламени. Вышесказанное подтверждает, что сила тока отражает физико-химические свойства ТВС, влияющие на процесс сгорания и, следовательно, на характеристики распространения пламени. Поэтому, в дальнейшем возможно использование информации с ИЗ для совершенствования процесса сгорания в поршневом двигателе.

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

Вывод

Экспериментально доказана взаимосвязь ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скоростью распространения пламени. Это подтверждает выдвинутое предположение об определяющем влиянии скорости образования радикала CH^+ на ионный ток и даёт возможность использовать его амплитуду для определения характеристик распространения пламени, что значительно упрощает и удешевляет существующую методику исследования ионизационными зондами процесса сгорания в поршневых двигателях.

Литература

1. Heywood, J.B. Internal combustion engine fundamentals [Text] / J. B. Heywood. – New York : McGraw-Hill, 1988. – 931 p.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов [Текст] / Р.З. Кавтарадзе. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
3. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М. : Наука, 1980. – 478 с.
4. Liberman, M. Introduction to physics and chemistry of combustion [Text] / M. Liberman. – Springer, 2008. – 360 p.
5. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.Н. Воинов. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.
6. Соколик А.С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием [Текст] / А.С. Соколик. – М. : АН СССР, 1951.
7. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты,

- образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова под ред. П.А. Власова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
8. Будаев С.И. Электропроводность пламени и скорость сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием [Текст] / С.И. Будаев, П.В. Ивашин, В.В. Смоленский, А.П. Шайкин // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – №3. – С. 42.
 9. Franke A. Characterization of an electrical sensor for combustion diagnostics [Text] / A. Franke // Doctoral thesis. – 2002. – 137 p.
 10. Степанов Е.М. Ионизация в пламени и электрическом поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. – М. : Металлургия, 1968. – 312 с.
 11. Коломиец П.В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели [Текст]: автореф. дисс. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Коломиец Павел Валерьевич. – Тольятти, 2007. – 19 с.
 12. Шайкин А.П. Взаимосвязь характеристик распространения пламени в объемах камеры сгорания у свечи зажигания и в наиболее удаленной от неё зоне в газовом ДВС [Текст] / А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев // Вектор науки ТГУ. – 2012. – С. 209 – 215.
 13. Gao Z. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends with BSS de-noising method [Text] / Z. Gao, X. Wu, H. Gao, B. Liu // International journal of hydrogen energy. – 2010. – № 35. – P. 12918 – 12929.
 14. Eriksson, L. Spark advance modeling and control [Text] / L. Eriksson // Doctoral thesis. – 1999. – 183 p.
 15. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей [Текст] / А.И. Мищенко. – Киев : Наукова думка, 1984. – 143 с.
 16. Hermanns E. Laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures [Text] / E. Hermanns // Doctoral thesis. – 2007. – 144 p.
 17. Minic D. Hydrogen energy – challenges and perspectives [Text] / D. Minic. – InTech. – 2012. – 326 p.
 18. Ma F. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines [Text] // F. Ma, N. Naeve, M. Wang, L. Jiang // Natural gas. – 2010. – P. 606.

Силовое взаимодействие в кулачково-роликовой муфте

Строков А.М.

Университет машиностроения
+7(495)223-05-23 (1527), asguitar@gmail.com

Аннотация. В статье описаны принципы взаимодействия элементов и зависимость передаваемого момента от управляющего воздействия в кулачково-роликовых муфтах. Представленные зависимости являются необходимыми для проектировочных расчетов или построения математической модели такого механизма.

Ключевые слова: кулачково-роликовая муфта, расчёт, зависимость момента от управляющего воздействия.

В патентах [1] и [2] предложены конструкции муфты сцепления, в которой вместо фрикционного взаимодействия используется взаимодействие кулачков и роликов. Если один из этих компонентов набегает на другой и поверхность кулачка скошена под определённым углом α к направлению взаимного перемещения, усилие взаимодействия может быть разложено на две составляющие – параллельную перемещению и перпендикулярную к нему. Увеличивая прижатие одного к другому, за счёт сближения частей муфты, можно тем самым увеличивать усилие, передаваемое между ними в тангенциальном направлении.

Преимущество кулачково-роликовой муфты (далее – КРМ) по сравнению с фрикционной связано с тем, что в ней связь между усилием сжатия и передаваемым тангенциальным усилием определяется (при одинаковых габаритах) не коэффициентом трения, а характером