

УДК 621.43

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИОНИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ СЖИГАНИИ БЕНЗИНА И МЕТАНА С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

© 2013 А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, И. Р. Галиев

Тольяттинский государственный университет

Экспериментально изучено влияние добавок водорода в метано- и бензовоздушную смеси на электропроводность и скорость распространения фронта пламени. Показано, что ионный ток в пламени метановодородовоздушной смеси определяется массовой долей углерода в этой смеси и скоростью распространения фронта пламени.

Двигатель внутреннего сгорания, скорость, распространение, пламя, ионизация, зонд, ионный ток, массовая доля углерода.

Возрастающие требования законодательства в сфере снижения токсичности в отработавших газах (ОГ) и повышения энергетических показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля предполагают его дальнейшее совершенствование. При этом модернизация ДВС должна исходить из прогноза, что в следующие 30 лет основным автомобильным топливом будет бензин, а его главным конкурентом станет природный газ [1]. В настоящее время существует много методов решения проблем экологической безопасности: совершенствование конструкции ДВС, применение электропривода, улучшение систем каталитической нейтрализации токсичных компонентов ОГ. Однако все эти методы требуют серьёзного конструктивного вмешательства в ДВС, что приводит к увеличению трудовых и материальных затрат. Поэтому использование активизирующих добавок (в малых количествах) в топливо является наиболее перспективным и широко применяемым способом улучшения характеристик двигателя, отвечающего всем мировым стандартам, так как он не требует значительных изменений в конструкции двигателя и автомобиля в целом. Применение именно водорода в качестве активизирующей добавки в топливо является наиболее актуальным, поскольку добавка водорода позволяет повысить эффектив-

ность рабочего процесса двигателей с искровым зажиганием, значительно увеличить экономичность и радикально уменьшить неравномерность циклов и токсичность отработавших газов [2-4]. Добавка водорода приводит к уменьшению задержки воспламенения, увеличению скорости распространения пламени, что существенно влияет на снижение несгоревших углеводородов в ОГ как при работе двигателя на бензине, так и на природном газе [5-10]. За счёт небольших добавок водорода к топливовоздушной смеси (ТВС) увеличивается теплопроводность и уменьшается энергия воспламенения смеси природного газа с воздухом, что позволяет использовать обычную систему зажигания в газовом двигателе, работающем на обеднённых смесях, и способствует более лёгкому пуску двигателя при низких температурах [5].

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что воздействие на физико-химические свойства ТВС с помощью добавок водорода в двигатель, работающий на природном газе и на бензине, улучшает его энергетические и экологические показатели. Однако, несмотря на многочисленные исследования в данной области, до сих пор нет единого мнения об оптимальном соотношении природного газа, бензина с водородом [11-14].

Академик Б.С. Стечкин указывал, что для исследования рабочего процесса ДВС недостаточно информации, полученной только из индикаторной диаграммы – необходимо понимание распространения фронта пламени в камере сгорания (КС).

Следовательно, для разработки методики, позволяющей получить оптимальное соотношение основного топлива с добавкой водорода, необходимо знать влияние добавки водорода, в разных концентрациях, на показатели процесса сгорания.

При исследовании процесса сгорания, в частности при определении скорости распространения фронта пламени, целесообразно использовать явление электропроводности пламени углеводородного топлива. Скорость распространения пламени определяет полноту и длительность процесса сгорания, т.е. отражает влияние турбулентности и физико-химических свойств ТВС, а электропроводность содержит информацию об интенсивности процесса сгорания при изменении физико-химических свойств ТВС [4, 6, 8].

На сегодняшний день не изучено влияние добавок водорода свыше 5% (по массе) на ионный ток и скорость распространения пламени метановоздушной смеси (МВС) в условиях двигателя с искровым зажиганием, что востребовано для обоснования использования водорода в качестве активизирующей добавки в газовой ДВС.

Целью работы является исследование влияния добавок водорода в метано- и бензовоздушную смеси на скорость распространения фронта и ионизацию пламени и взаимосвязь между ними, определяющую основные характеристики рабочего процесса.

Экспериментальная установка и методика проведения испытаний

Эксперименты проводились на одноцилиндровой, четырёхтактной установке УИТ-85 с изменяемой степенью сжатия.

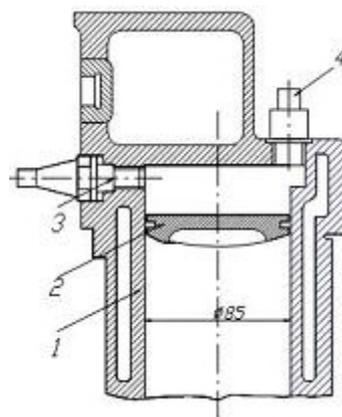


Рис. 1. Расположение ИД в КС УИТ-85:
1 – цилиндр; 2 – поршень;
3 – свеча зажигания с ИД; 4 – ИД

Конструкция УИТ-85 позволяет достаточно точно контролировать режимные параметры работы поршневого двигателя с искровым зажиганием (состав смеси, степень сжатия, обороты коленчатого вала, температуру охлаждающей жидкости, угол опережения зажигания) и варьировать ими независимо друг от друга [15]. Эти особенности конструкции обеспечивают определение влияния конкретного фактора на процесс сгорания. Таким образом, установка УИТ-85 дает возможность повторять режимы испытаний, что необходимо для проведения исследования процесса сгорания при изменяющихся в течение нескольких миллисекунд давлении, температуре и объёме камеры сгорания.

В качестве топлива использовались сжатый природный газ с содержанием метана более 95% и бензин, в которые добавлялся водород в количестве 5, 10, 15% (по массе). Испытания проводились на двух скоростных режимах: 600 и 900 об/мин.

Для мониторинга ионного тока были изготовлены два ионизационных датчика (ИД), представляющих собой электрод, изолированный от корпуса двигателя керамическим изолятором. Фронт пламени, омывая электрод и корпус, замыкает электрическую цепь, в которой возникает импульс ионного тока, обусловленный электропроводностью пламени. На рис. 1 показаны места установки ИД, один из ко-

торых располагается непосредственно в свече зажигания, на расстоянии 7 мм от её электрода, а другой на максимальном удалении от свечи зажигания, равном 85 мм.

Таким образом, показания ИД, расположенного у свечи зажигания, будут информировать о процессах в первой фазе сгорания. Информацию о процессах в основной фазе сгорания предоставит ИД, удалённый от свечи зажигания. Первая фаза сгорания соответствует времени от начала воспламенения до развития устойчивого фронта пламени, а вторая фаза - это время от окончания первой фазы до выгорания основной части ТВС, т.е. (80-90)% ТВС [16].

Методика проведения экспериментов заключалась в регистрации сигнала с

ИД и записи осциллограмм. Осциллограммы импульсов, записанные в отдельных циклах (рис. 2), усреднялись по амплитуде напряжения ионного тока и промежутку времени от искрового разряда до возникновения импульса, т.е. достижения фронта пламени ИД.

По результатам измерений промежутка времени (t) от подачи искрового разряда до возникновения выходного сигнала с ИД (напряжения ионного тока) было определено среднее значение скорости распространения фронта пламени (W):

$$W=L/t, \quad (1)$$

где L – расстояние от свечи зажигания до ИД.

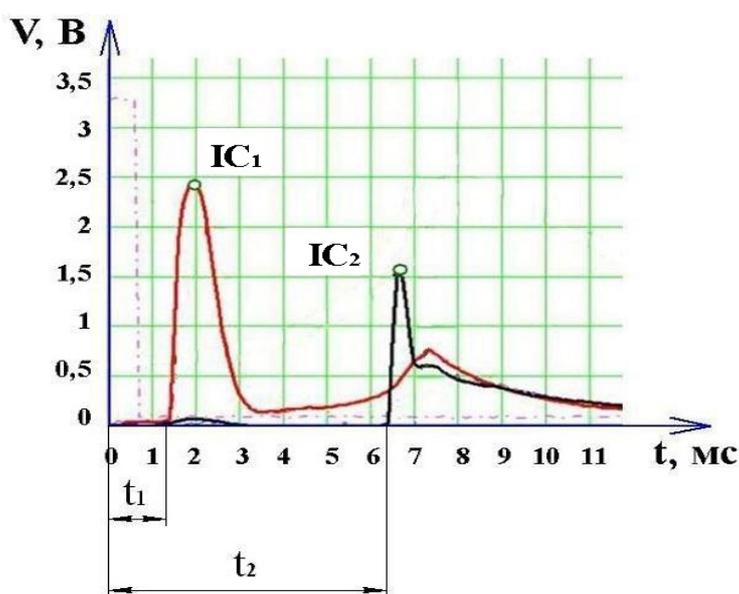


Рис. 2. Осредненная осциллограмма импульсов ионного тока:
 t_1, t_2 – промежутки времени от начала зажигания до появления ионного тока на ИД, расположенного у свечи зажигания, и до появления ионного тока на ИД, расположенного в самой удаленной от свечи зажигания зоне КС, соответственно;
 IC_1, IC_2 – исходные сигналы с ИД, расположенного у свечи зажигания, и с ИД, расположенного в самой удаленной от свечи зажигания зоне КС, соответственно

Результаты исследований

Зависимость средней скорости распространения фронта метановодородовоздушного пламени от состава ТВС, доли добавляемого водорода и скоростного режима представлена на рис.3 и 4.

Из рисунков видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала установки ($n_{КВД}$) с 600 до 900 об/мин происходит возрастание скорости в обеих фазах сгорания. Так, прирост скорости в первой фазе сгорания (W_1) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ составил 22%, а

в основной фазе сгорания (W_2) 17%. При $\alpha=1,3$ увеличение скорости в первой фазе сгорания составило 8%, а в основной фазе сгорания 7%. С обеднением смеси интенсивность прироста средней скорости пла-

мени снижается. Это объясняется тем, что снижение скорости при сильном обеднении смеси уже не компенсируется возрастанием турбулентности.

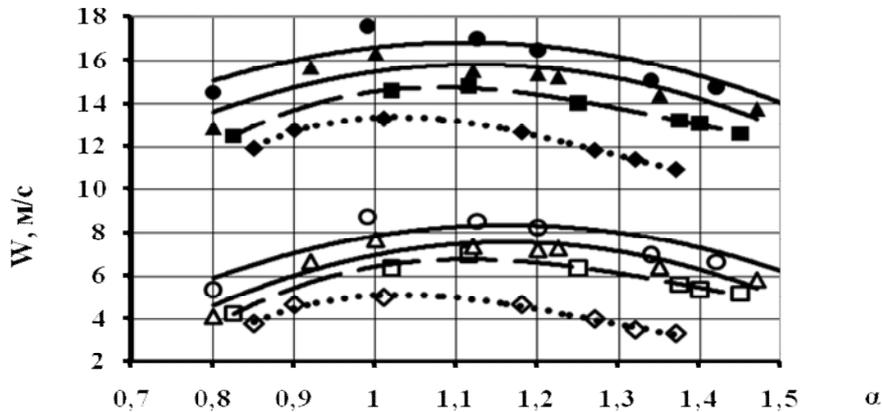


Рис. 3. Зависимость средней скорости распространения фронта метановодородовоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ($n_{\text{КВД}} = 900$ об/мин), где W_1 : \diamond , \square , Δ , \circ ; W_2 : \blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle , \bullet ; $H_2=0\%$: \diamond , \blacklozenge ; $H_2=5\%$: \square , \blacksquare ; $H_2=10\%$: Δ , \blacktriangle ; $H_2=15\%$: \circ , \bullet

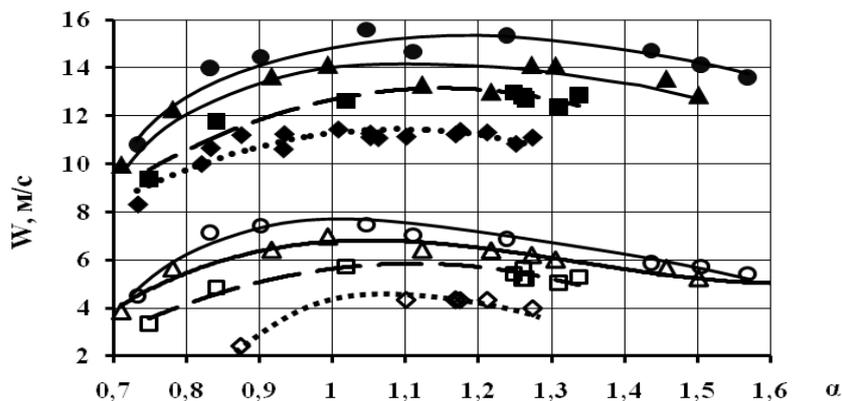


Рис. 4. Зависимость средней скорости распространения фронта метановодородовоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха, доли добавляемого водорода ($n_{\text{КВД}} = 600$ об/мин), где W_1 : \diamond , \square , Δ , \circ ; W_2 : \blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle , \bullet ; $H_2=0\%$: \diamond , \blacklozenge ; $H_2=5\%$: \square , \blacksquare ; $H_2=10\%$: Δ , \blacktriangle ; $H_2=15\%$: \circ , \bullet

Анализ рис. 3 и 4, показывает, что для обоих скоростных режимов наблюдается увеличение средней скорости распространения фронта пламени при 5, 10 и 15% добавки водорода в ТВС. При этом вне зависимости от концентрации водорода сохраняется квадратичный закон зависимости скорости от коэффициента избытка воздуха α . Наибольший рост скорости наблюдается при работе на бедной смеси с добавкой $H_2=5\%$. В первой фазе сгорания при $\alpha=1,3$ добавка $H_2=5\%$ увели-

чивает в среднем скорость сгорания на 40% ($n_{\text{КВД}}=900$ об/мин) и на 30% ($n_{\text{КВД}}=600$ об/мин), а при $\alpha=1$ увеличение скорости W_1 составляет 23% ($n_{\text{КВД}}=900$ об/мин) и 20% ($n_{\text{КВД}}=600$ об/мин). В свою очередь, для основной фазы при $\alpha=1,3$ добавка $H_2=5\%$ повышает скорость сгорания на 20% ($n_{\text{КВД}}=900$ об/мин) и на 15% ($n_{\text{КВД}}=600$ об/мин), а при $\alpha=1$ увеличение скорости W_2 составляет 7% ($n_{\text{КВД}}=900$ об/мин) и 10% ($n_{\text{КВД}}=600$ об/мин). Причиной этому является увеличение доли водорода в

ТВС. Известно, что водород при высоких температурах превращается в активный атомарный водород [2]. Следовательно, можно предположить, что добавка водорода способствует формированию высокоактивных центров химических реакций, снижению энергии воспламенения и расширению пределов сгорания исходного топлива.

Влияние вида топлива на среднюю скорость распространения фронта пламени в основной фазе сгорания представлено на рис.5. Рассматривались метановоздушная (МВС) и бензовоздушная смеси (БВС).

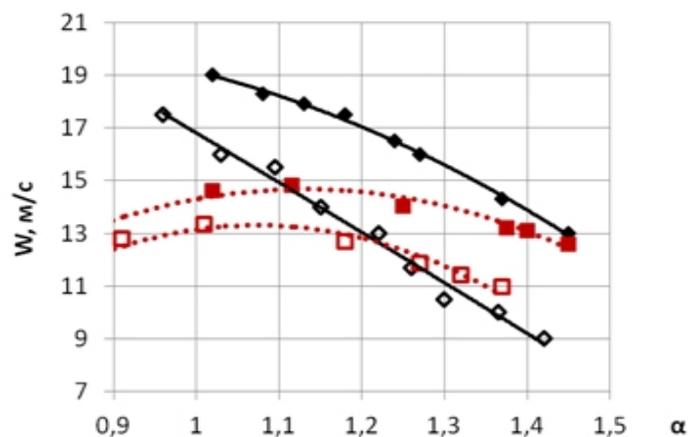


Рис. 5. Зависимость средней скорости распространения фронта бензовоздушного и метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ($n_{КВД} = 900$ об/мин), где ◇ — $H_2=0\%$, бензин; ◆ — $H_2=5\%$, бензин; □ — $H_2=0\%$, метан; ■ — $H_2=5\%$, метан

Сравнительный анализ показал, что добавка водорода в обоих случаях приводит к увеличению скорости распространения пламени. Максимальный рост скорости наблюдается в области бедной смеси. Так при $\alpha=1,3$ добавка $H_2=5\%$ привела к увеличению скорости для МВС на 19%, а для БВС на 40%. В свою очередь, при $\alpha=1$ добавка $H_2=5\%$ привела к увеличению скорости для МВС только на 7%, а для БВС на 12%.

Влияние добавок водорода на плотность ионного тока для метановоздушной и бензовоздушной смесей представлено на рис. 6 и 7.

Плотность ионного тока определялась отношением максимальной величины ионного тока к площади поверхности электрода зонда.

Определено, что вне зависимости от скоростного режима и вида топлива характер изменения амплитуд ионных токов

отражает влияние состава ТВС на характеристики процесса распространения пламени.

Для метановоздушной смеси было выявлено отсутствие зависимости (для обоих скоростных режимов) плотности ионного тока от концентрации водорода, превышающей 5%. Причина этого заключается в зависимости электропроводности фронта пламени от концентрации свободного радикала CH [17], которая, вероятно, зависит от доли углерода в ТВС и скорости распространения фронта пламени. Количество углерода в топливе определяет потенциальный резерв образования CH , а скорость сгорания характеризует интенсивность образования CH во время реакции горения топлива. При добавке водорода в ТВС одновременно происходит уменьшение концентрации углерода в ТВС и увеличение скорости распространения пламени.

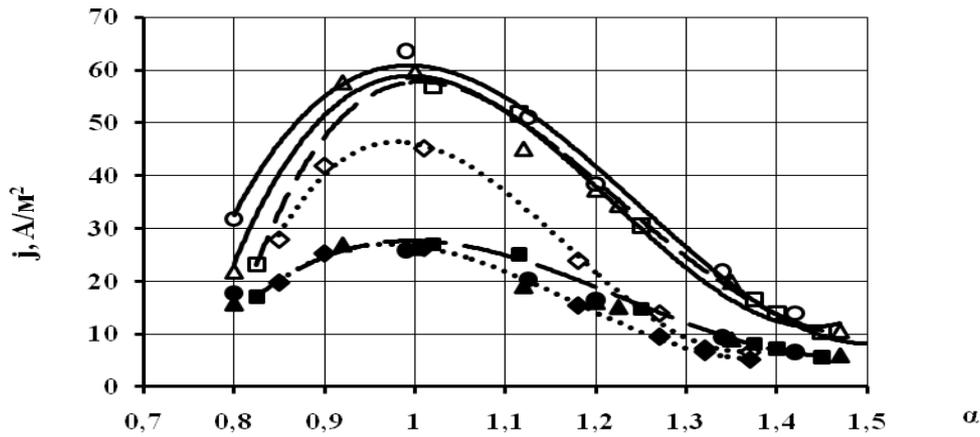


Рис. 6. Зависимость плотности ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в метановоздушную смесь ($n_{КВД}=900$ об/мин), где j_1 : $\diamond, \square, \Delta, \circ$; j_2 : $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$; $H_2=0\%$: \diamond, \blacklozenge ; $H_2=5\%$: \square, \blacksquare ; $H_2=10\%$: Δ, \blacktriangle ; $H_2=15\%$: \circ, \bullet

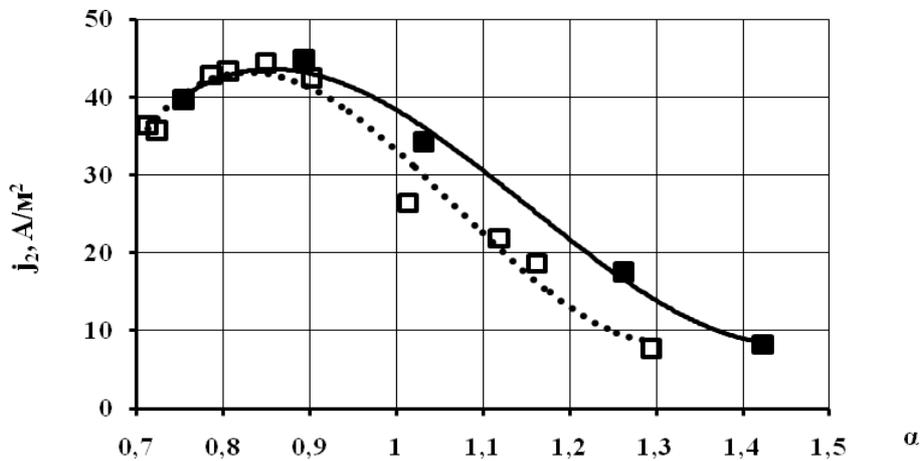


Рис. 7. Зависимость плотности ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавки водорода в бензовоздушную смесь ($n_{КВД}=900$ об/мин), где $H_2=0\%$: \square ; $H_2=15\%$: \blacksquare

Соотношение этих величин должно определять ионизацию пламени и, следовательно, значение ионного тока в пламени. Для анализа этого предположения использовались скорость распространения пламени до электрода (W) ИД и расчётная массовая доля углерода в ТВС (gC), которая была определена по формуле

$$gC = \frac{(1 - g'_{H_2}) \cdot \mu_C}{1 + \alpha \cdot [L_{CH_4} \cdot (1 - g'_{H_2}) + g'_{H_2} \cdot L_{H_2}] \cdot \mu_{CH_4}}, \quad (2)$$

где L_{CH_4} – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг метана; L_{H_2} – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг водорода; g'_{H_2} – массовая доля водорода в топ-

ливной смеси; μ_C – атомная масса углерода; μ_{CH_4} – молекулярная масса метана.

Сравнение проведено в относительных величинах – отношениях анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе смеси:

$$j'_o = j / j_{(a=1)}, \quad (3)$$

где $j_{(a=1)}$ – значение плотности ионного тока при стехиометрическом составе смеси;

$$(gC \cdot W)'_o = (gC \cdot W) / (gC \cdot W)_{(a=1)}, \quad (4)$$

где $(gC \cdot W)_{(a=1)}$ – значение параметра $gC \cdot W$ при стехиометрическом составе смеси.

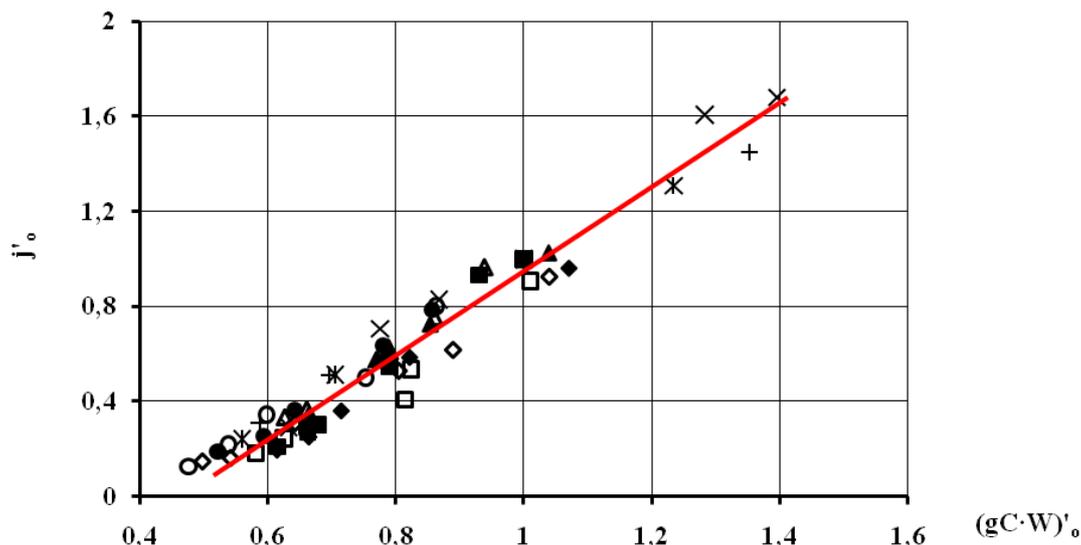


Рис. 8. Зависимость относительной величины плотности ионного тока метановоздушной и бензовоздушной смеси от параметра $gC \cdot W$ ($n_{КВД} = 900$ об/мин), где для метана: j'_o : $\diamond, \square, \Delta, \circ$; j'_o : $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$; $H_2 = 0\%$: \diamond, \blacklozenge ; $H_2 = 5\%$: \square, \blacksquare ; $H_2 = 10\%$: Δ, \blacktriangle ; $H_2 = 15\%$: \circ, \bullet ; для бензина: j'_o , $H_2 = 0\%$: X; j'_o , $H_2 = 3\%$: +; j'_o , $H_2 = 5\%$: *

На рис. 8 представлена зависимость относительного значения плотности ионного тока от относительной величины произведения массовой концентрации углерода в ТВС на скорость распространения пламени для метановоздушной и бензовоздушной смесей, в том числе с добавкой водорода.

Получена линейная зависимость ионного тока от произведения массовой доли углерода и скорости распространения пламени для обоих видов используемых топлив. Следовательно, при сравнительной оценке процессов, происходящих в зоне горения углеводородного топлива, по ионному току наиболее адекватным параметром может быть произведение скорости распространения пламени на массовую долю углерода в ТВС.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали, что добавка водорода в ТВС оказывает одинаковое влияние на скорость распространения пламени и несколько отличное на изменение ионного тока.

1. Добавка водорода значительно увеличивает скорость распространения фронта пламени в первой и основной фазах сгорания метановоздушной и бензовоздушной смесей на разных скоростных режимах.

2. Вне зависимости от скоростного режима и вида топлива характер изменения ионного тока отражает влияние состава ТВС на характеристики процесса сгорания.

3. Отсутствие зависимости ионного тока от количества добавляемого водорода, превышающего 5%, в метановоздушную смесь объясняется меньшей концентрацией в ТВС углерода, определяющего явление электропроводности пламени.

4. Для оценки скорости протекания реакций горения по ионному току в пламени для углеводородных топлив целесообразно использовать произведение массовой доли углерода на скорость распространения пламени.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК № 14.В37.21.0308.

Библиографический список

1. Annual Energy Outlook 2011 with projections to 2030 [Text] // Independent statistics & analysis, 2011. – P. 97.
2. Мищенко, А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей [Текст] / А. И. Мищенко. – Киев: Наукова думка, 1984. – 143 с.
3. Русаков, М. М. Водород и токсичность ДВС [Текст] / М. М. Русаков, Л. Н. Бортников, В. Н. Пелипенко // Международный научный семинар «Водородные технологии 21 века». – СПб, 1997. – С. 247-249.
4. Смоленский, В. В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / В. В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2007. – 20 с.
5. Абрамчук, Ф. И. Влияние добавки водорода к природному газу на свойства смесового топлива [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, Г. В. Майстренко // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 24. – С. 45-49.
6. Коломиец, П. В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / П. В. Коломиец. – Тольятти: ТГУ, 2007. – 19 с.
7. Брызгалов, А. А. Добавка водорода в метановоздушную смесь газового двигателя [Текст] / А. А. Брызгалов, А. П. Шайкин // Международный научный симпозиум «Автотракторостроение – 2009». – М.: МГТУ, 2009. – С. 25-33.
8. Ивашин, П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.04.02 / П. В. Ивашин. – Тольятти: ТГУ, 2004. – 23 с.
9. Влияние добавок водорода на экономические и экологические показатели газового двигателя Камаз-820.53-260 [Текст] / Н. А. Гатаулин, Ю. Ф. Гортышов, В. М. Гуреев [и др.] // Водородная энергетика. – 2007. – С. 136-138.
10. Быков, Г. А. Детонационные ограничения при использовании альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием [Текст] / Г. А. Быков // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1995. – № 3. – С. 3-9.
11. Karner, D. High-percentage hydrogen/CNG blend Ford F-150 operating summary [Text] / D. Karner, J. Francfort // Technical report, 2003. – 9 p.
12. Deltoro, A. Development and demonstration of hydrogen and compressed natural gas (H/CNG) blend transit buses [Text] / A. Deltoro, M. Frailey, F. Lynch // Technical report, 2005. – 30 p.
13. Бортников, Л. Н. Определение соотношения бензин-водород для обеспечения устойчивой работы поршневого ДВС на бедных смесях [Текст] / Л. Н. Бортников // Вестн. СГАУ. – 2000. – С. 97-101.
14. Мисбахов, Р. Ш. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Р. Ш. Мисбахов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2010. – 20 с.
15. Одноцилиндровая универсальная установка УИТ-85 для определения октановых чисел топлив [Текст] / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 169 с.
16. Соколик, А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст] / А. С. Соколик. – М.: АН СССР, 1960. – 430 с.
17. Степанов, Е.М. Ионизация в пламени и электрическом поле [Текст] / Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. – М.: Металлургия, 1968. – 312 с.

FLAME PROPAGATION VELOCITY AND IONIZATION IN BURNING GASOLINE AND METHANE WITH ADDITION OF HYDROGEN

© 2013 A. P. Shaykin, P. V. Ivashin, I. R. Galiev

Togliatti State University

The paper is devoted to the effect of adding hydrogen to CNG and gasoline on the electrical conductivity and the speed of the flame front. It is shown that the ion current in the CNG is determined by the mass fraction of carbon and the speed of the flame front propagation.

Internal combustion engine, velocity, distribution, flame, probe, ion current, mass fraction of carbon.

Информация об авторах

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: td@tltsu.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

Галиев Ильдар Ринатович, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: sbs777@yandex.ru. Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

Shaikin Alexander Petrovich, doctor of technical science, professor of the department of power machines and control systems, Togliatti State University. E-mail: td@tltsu.ru. Area of research: combustion processes, working processes of heat engines.

Ivashin Pavel Valentinovich, candidate of technical science, associate professor of the department of power machines and control systems, Togliatti State University. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Area of research: combustion processes, working processes of heat engines.

Galiev Ildar Rinatovich, postgraduate student, Togliatti State University. E-mail: sbs777@yandex.ru. Area of research: combustion processes, working processes of heat engines.